

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І**  
**ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**СУХЕНКО В.Ю., СУХЕНКО Ю.Г.,**  
**САРАНА В.В., МУШТРУК М.М.**

**МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ**  
**ПРОЦЕСІВ І ОБЛАДНАННЯ ПЕРЕРОБНИХ**  
**ПІДПРИЄМСТВ АПК**

**МОНОГРАФІЯ**

**за редакцією доктора технічних наук**  
**Сухенка В.Ю.**

**КИЇВ – 2017**

УДК 602.1:621.927  
ББК 22.18:36.81  
С 91

Рецензенти: доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв Гавва Олександр Миколайович (Національний університет харчових технологій); доктор технічних наук, професор кафедри технології м'яса і м'ясних продуктів Пасічний Василь Миколайович (Національний університет харчових технологій); доктор технічних наук, професор кафедри технології м'ясних, рибних та морепродуктів, декан факультету харчових технологій та управління якістю продукції АПК Баль-Прилипка Лариса Вацлавівна (Національний університет біоресурсів і природокористування України)

Рекомендовано вченою радою Національного університету біоресурсів і природокористування України (протокол № 4 від «22» листопада 2017 р.)

**С 91 МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І ОБЛАДНАННЯ ПЕРЕРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ АПК:** Монографія / В.Ю. Сухенко, Ю.Г. Сухенко, В.В. Сарана, М.М. Муштрук / за ред. д.т.н. Сухенка В.Ю. – К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2017. 520 с.  
ISBN 978-966-929-593-4

У монографії приведений аналіз парку м'ясоподрібнювальних машин переробних підприємств АПК. Проаналізовані структурні складові м'ясної сировини, створені їх реологічні моделі, досліджено деформування і руйнування м'ясопродуктів при подрібненні. Проаналізовані енергетичні показники процесів подрібнення і наведена класифікація подрібнювального обладнання за структурою матеріальних потоків та запропонований алгоритм пошуку ефективного способу диспергування, вибору конструктивно-технологічних схем і конструювання обладнання.

Досліджені субмікроструктури різальних інструментів після контактування з сировиною та запропоновані методи і засоби для підвищення зносостійкості інструментів і надійності обладнання.

Монографія буде корисною широкому загалу науковців, технологів, конструкторів, аспірантів і студентів – всім, хто досліджує, експлуатує, конструює і вивчає обладнання для подрібнення матеріалів.

УДК 602.1:621.927

ББК 22.18:36.81

© Сухенко В.Ю., Муштрук М.М.,  
Сухенко Ю.Г., Сарана В.В., 2017

© НУБіП України, 2017

ISBN 978-966-929-593-4

# ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	<b>6</b>
<b>РОЗДІЛ 1. ПРОБЛЕМИ, ДОСЯГНЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ ПОДРІБНЕННЯ М'ЯСА</b> .....	<b>11</b>
1.1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СИРОВИНУ І ТЕХНОЛОГІЮ ВИРОБНИЦТВА М'ЯСНИХ І М'ЯСОМІСКИХ ПРОДУКТІВ .	11
1.2. ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ М'ЯСА .....	12
1.3. ТРАНСФОРМАЦІЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ М'ЯСА В ПРОЦЕСІ АВТОЛІЗУ .....	13
1.4. МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ М'ЯСА ТА М'ЯСОПРОДУКТІВ .....	15
1.5. МЕХАНІКА БІОПОЛІМЕРІВ М'ЯСА .....	21
1.6. ПОДРІБНЮВАЛЬНІ ПРОЦЕСИ ТА ВИМОГИ ДО ПОДРІБНЮВАЛЬНИХ МАШИН .....	27
1.7. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ .....	29
1.8. ШНЕКОВІ ПОДРІБНЮВАЛЬНІ МАШИНИ (ВОВЧКИ) .....	31
<b>1.8.1. Транспортувальні системи вовчків</b> .....	<b>34</b>
<b>1.8.2. Різальні механізми вовчків</b> .....	<b>36</b>
<b>1.8.3. Енергетичне забезпечення процесу різання у вовчках</b> .....	<b>43</b>
1.9. Машини для тонкого подрібнення м'ясної сировини.....	45
<b>1.9.1. Загальна характеристика обладнання</b> .....	<b>45</b>
<b>1.9.2. Конструкції кутерів</b> .....	<b>47</b>
Висновки до розділу 1 .....	50
<b>РОЗДІЛ 2. ВЗАЄМОДІЯ ДЕТАЛЕЙ М'ЯСОПОДРІБНЮВАЛЬНИХ МАШИН З ТЕХНОЛОГІЧНИМИ СЕРЕДОВИЩАМИ</b> .....	<b>52</b>
2.1. КОРОЗИЙНО-МЕХАНІЧНЕ СПРАЦЮВАННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ М'ЯСОПОДРІБНЮВАЛЬНИХ МАШИН .....	52
2.2. ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ М'ЯСОПОДРІБНЮВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	54
2.3. ВПЛИВ НАВАНТАЖЕННЯ НА ЗНОШУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ І КІНЕТИКУ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ.....	57
2.4. ВПЛИВ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІВ.....	58
2.5. ЗАЛЕЖНІСТЬ ДИСЛОКАЦІЙНОЇ СТРУКТУРИ ДЕФОРМОВАНОЇ ЗОНИ ВІД УМОВ І РЕЖИМІВ НАВАНТАЖЕННЯ ПОВЕРХОНЬ ТЕРТЯ ДЕТАЛЕЙ.....	58
2.6. ЗАХИСТ РОБОЧИХ ОРГАНІВ М'ЯСОПОДРІБНЮВАЛЬНИХ МАШИН ВІД СПРАЦЮВАННЯ.....	59
Висновки до розділу 2 .....	67
<b>РОЗДІЛ 3. ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА ПОДРІБНЕННЯ М'ЯСА, РЕОЛОГІЯ ФАРШІВ І ЯКІСТЬ ВИРОБІВ</b> .....	<b>69</b>
3.1. ПОДРІБНЕННЯ СИРОВИНИ РІЗНОГО ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ДЛЯ СИРОКОПЧЕНИХ КОВБАС.....	69
<b>3.1.1. Діслідження впливу хімічного складу сировини на структурно-механічні характеристики фаршу, подрібненого у вовчку</b> .....	<b>69</b>
<b>3.1.2. Дослідження впливу хімічного складу сировини на процес фаршеприготування на лабораторному кутері</b> .....	<b>73</b>
<b>3.1.3. Дослідження процесу кутерування фаршу на кутері середньої продуктивності</b> ..	<b>75</b>
<b>3.1.4. Фаршеутворення на кутері великої продуктивності</b> .....	<b>79</b>
3.2. ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕРМІНУ ПОДРІБНЕННЯ ФАРШУ ДЛЯ СИРОКОПЧЕНИХ КОВБАС.....	83
3.3. АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ВИЗНАЧАЛЬНИХ РЕОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФАРШУ ДЛЯ СИРОКОПЧЕНИХ КОВБАС .....	89
3.4. ВПЛИВ СТУПЕНЯ ПОДРІБНЕННЯ ФАРШІВ НА КІНЕТИКУ ВИСУШУВАННЯ СИРОКОПЧЕНИХ КОВБАС.....	91
3.5. ОСОБЛИВОСТІ ТОНКОГО ПОДРІБНЕННЯ ФАРШУ ДЛЯ ВАРЕНИХ КОВБАС.....	96
<b>3.5.1. Кутерування фаршу для варених ковбас</b> .....	<b>97</b>
<b>3.5.2. Енергетика кутерування</b> .....	<b>109</b>
<b>3.5.3. Оптимальний вологовміст фаршу і термін кутерування</b> .....	<b>112</b>
<b>3.5.4. Вплив вакууму на процес подрібнення</b> .....	<b>121</b>
<b>3.5.5. Комплексне подрібнення м'яса на кутерах і колоїдних млинах</b> .....	<b>122</b>
<b>3.5.6. Методи розрахунку оптимальних режимів подрібнення фаршів для безшпикових ковбас</b> .....	<b>122</b>
3.6. ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ І ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОВБАС І М'ЯСОПРОДУКТІВ.....	123

Висновки до розділу 3 .....	124
<b>РОЗДІЛ 4. ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ МАТЕМАТИЧНОГО І ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПОДРІБНЕННЯ М'ЯСНОЇ СИРОВИНИ .....</b>	<b>126</b>
4.1. ФІЗИКО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ ПОДРІБНЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ .....	126
<b>4.1.1. Способи подрібнення матеріалів .....</b>	<b>126</b>
<b>4.1.2. Сучасна класифікація подрібнювальних процесів .....</b>	<b>127</b>
<b>4.1.3. Ефективність подрібнювально-зміщувальних процесів у харчових технологіях .....</b>	<b>128</b>
<b>4.1.4. Енергетичні показники і напружено-деформаційні процеси при механічному подрібненні м'ясної сировини .....</b>	<b>134</b>
<b>4.1.5. Особливості енергетики вільного різання м'ясної сировини .....</b>	<b>140</b>
4.2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТРАНСПОРТУВАННЯ І ПРОТИСКУВАННЯ М'ЯСА В ШНЕКОВИХ ПОДРІБНЮВАЧАХ .....	142
4.3. ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ЧИННИКІВ І ВИХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ ШНЕКОВИХ ПОДРІБНЮВАЧІВ .....	149
4.4. МОДЕЛЮВАННЯ М'ЯСОПОДРІБНЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ – ОСНОВА ДЛЯ СИНТЕЗУ ЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН .....	154
<b>4.4.1. Сутність проблеми і мета моделювання .....</b>	<b>154</b>
<b>4.4.2. Методологія прогнозування процесів подрібнення .....</b>	<b>154</b>
<b>4.4.3. Класифікаційні ознаки способів і засобів подрібнення .....</b>	<b>158</b>
<b>4.4.4. Енергетична ефективність подрібнювачів .....</b>	<b>167</b>
<b>4.4.5. Математична модель процесу подрібнення біополімерів м'яса .....</b>	<b>173</b>
<b>4.4.6. Моделі руйнування м'яса при подрібненні .....</b>	<b>178</b>
<b>4.4.7. Алгоритм пошуку ефективного способу і обладнання для подрібнення м'ясної сировини .....</b>	<b>184</b>
<b>4.4.8. Вибір напрямків синтезу м'ясоподрібнювальних машин .....</b>	<b>185</b>
Висновки до розділу 4 .....	187
<b>РОЗДІЛ 5. ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ НА СПРАЦЮВАННЯ М'ЯСОПОДРІБНЮВАЛЬНИХ МАШИН .....</b>	<b>189</b>
5.1. Показники надійності м'ясоподрібнювальних інструментів в умовах корозійно-механічного зношування .....	189
5.2. МЕХАНІКА КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ З СИРОВИНОЮ .....	190
5.3. ОБҐРУНТУВАННЯ ОСНОВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ПОДРІБНЮВАЛЬНИХ МАШИН .....	193
<b>5.3.1. Вплив м'ясних середовищ на дислокаційну структуру твердих тіл .....</b>	<b>194</b>
<b>5.3.2. Електричне зарядження деталей м'ясоподрібнювальних машин як засіб підвищення опору спрацюванню .....</b>	<b>204</b>
<b>5.3.3. Ефективні способи підвищення зносостійкості деталей подрібнювальних машин .....</b>	<b>213</b>
5.4. МОДЕЛЬ КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНОГО СПРАЦЮВАННЯ М'ЯСОПОДРІБНЮВАЛЬНИХ МАШИН .....	221
5.5. КЕРУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКІСТЮ М'ЯСОПОДРІБНЮВАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ .....	226
<b>5.5.1. Конструктивно-технологічні способи підвищення зносостійкості .....</b>	<b>227</b>
<b>5.5.2. Застосування вибіркового переносу у вузлах подрібнення м'яса .....</b>	<b>230</b>
<b>5.5.3. Формування сервовитних захисних плівок з використанням плазмового струменя .....</b>	<b>233</b>
<b>5.5.4. Механізм утворення і захисної дії сервовитних плівок .....</b>	<b>235</b>
5.6. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ЗНОСОСТІЙКИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ РІЗАЛЬНИХ ВУЗЛІВ ШНЕКОВИХ М'ЯСОПОДРІБНЮВАЛЬНИХ МАШИН (ВОВЧКІВ) .....	237
Висновки до розділу 5 .....	243
<b>РОЗДІЛ 6. СИНТЕЗ ЕФЕКТИВНИХ КОНСТРУКЦІЙ, ПРОГНОЗУВАННЯ І ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ М'ЯСОПОДРІБНЮВАЛЬНИХ МАШИН .....</b>	<b>245</b>
6.1. Удосконалення конструкцій шнекових подрібнювачів .....	245
6.2. Вовчок-кутер для подрібнення м'яса .....	247
6.3. Пристрій для подрібнення з негайним видаленням фаршу .....	252
6.4. Шнековий насос-подрібнювач м'яса .....	253
6.5. ОБҐРУНТУВАННЯ УМОВ ЕФЕКТИВНОГО ПОДРІБНЕННЯ У НОВИХ МАШИНАХ .....	254



<b>6.5.1. Взаємозв'язок енергозатратності процесу з геометричними параметрами різального вузла .....</b>	<b>254</b>
<b>6.5.2. Міцність біополімерів м'яса в умовах різання .....</b>	<b>257</b>
<b>6.5.3. Міцність м'язової тканини яловичини при різанні за різної температури і швидкості деформування .....</b>	<b>261</b>
<b>6.5.4. Питома енергія, що витрачається на деформування м'яса до початку процесу руйнування при різанні .....</b>	<b>264</b>
<b>6.5.5. Проектування енергоефективних шнекових подрібнювачів .....</b>	<b>267</b>
6.6. Машина для подрібнення шпику .....	268
6.7. Синтез ефективних кутерних ножів .....	270
6.8. Прогнозування показників надійності м'ясоподрібнювальних машин .....	274
6.9. Оцінка ефективності від впровадження результатів роботи .....	279
Висновки до розділу 6 .....	280
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....</b>	<b>282</b>
<b>ЛІТЕРАТУРА .....</b>	<b>285</b>
<b>ДОДАТКИ .....</b>	<b>315</b>

## ВСТУП

Сучасна харчова і переробна промисловість характеризується стрімкими темпами розвитку, що потребує удосконалення процесів і обладнання для отримання високоякісної продукції, забезпечення матеріало- та енергоощадності та високо продуктивності виробництва.

Аналіз сучасного стану парку устаткування м'ясопереробних підприємств України свідчить про те, що його технічний рівень не можна визнати задовільним. Наразі 42% виробничих фондів підлягають заміні, 25% підлягають модернізації і тільки 19% відповідають світовому рівню. Приблизно 30% парку машин відпрацювали вже два і більше амортизаційні терміни, а знос основних засобів складає близько 70%. Більше 27% парку технологічного устаткування складає імпортна техніка, яка не відповідає як фінансовим можливостям виробників м'ясопродуктів, зважаючи на високу ціну устаткування і запасних частин, так і потребам та інтересам України у розвитку вітчизняного харчового машинобудування, створенню додаткових робочих місць і забезпеченню продовольчої безпеки країни.

Випуск продукції переробки м'яса у фізіологічно необхідних для людей об'ємах неможливий без розробки і реалізації перспективних технологій і устаткування, що забезпечують ресурсозберігаючу переробку і виготовлення готової продукції високої якості.

У м'ясній галузі при виробництві м'яса, ковбасних виробів і напівфабрикатів широко застосовуються операції подрібнення, що істотно впливають на якість і вихід готових продуктів. Особливості біологічного походження м'ясопродуктів вимагають поетапного здійснення процесу подрібнення. Тривалість і режими подрібнення м'яса на кожному етапі також вимагають спеціального теоретичного і експериментального обґрунтування [28, 106, 172].

Ряд конструкцій м'ясорізальних машин запозичений з інших галузей промисловості, де їх застосовують для подрібнення мінеральної сировини. Разом з тим, інтенсивний механічний вплив робочих органів на м'ясо призводить до втрати нативних властивостей сировини і навіть до її фізико-хімічної деструкції. Фарш ковбас, отриманий за допомогою таких машин, має пухку консистенцію, дає жиро-водяні набряки у батонах при термічній обробці, а готовий продукт має незадовільні органолептичні показники.

Машина і апарати, що переробляють м'ясну сировину, повинні впливати на оброблюваний продукт таким чином, щоб при цьому втрати

сировини і готової продукції були б мінімальними, а якість виробів висока. Це спонукає до необхідності забезпечення повної відповідності режимів обробки, конструктивних форм і параметрів робочих органів машин структурно-механічним властивостям м'ясної сировини. Поставлена проблема визначила сучасні тенденції конструювання різальних інструментів: оптимізацію профілю і конструктивних елементів, застосування збірних конструкцій, використання зносостійких матеріалів і покриттів. Останнім часом сформувалися прогресивні технологічні методи забезпечення надійності і високої подрібнювальної здатності різальних інструментів завдяки використанню заготовок і напівфабрикатів з порошкових матеріалів, зміцненню методами поверхневої пластичної деформації, хіміко-термічної обробки, лазерної і криогенної дії на інструмент, електроіскрового легування [8, 153, 213].

Відставання наукових розробок від потреб практики пояснюється надзвичайно широким діапазоном властивостей технологічних середовищ м'ясопереробної галузі, різноманіттям використовуваних матеріалів у вузлах тертя машин і відмінністю умов їх експлуатації. Крім того, дослідження процесів м'ясопереробки пов'язане з певною складістю через необхідність залучення до розв'язання проблем сучасних знань і методів з різних галузей науки: металознавства, фізики твердого тіла, металофізики, фізико-хімічної механіки матеріалів, електрохімії, трибоніки.

Практично відсутні роботи, які б враховували хімічні властивості м'яса та м'ясного соку при конструюванні різальних інструментів, виборі сталей і захисних покриттів для їх виготовлення, що унеможливорює збереження характеристик навіть правильно спрофільованого і виготовленого м'ясоподрібнювального інструменту довгий період та знижує якість подрібнення. Тому розробки методів керування властивостями робочих поверхонь інструментів за рахунок створення на них композицій, поєднуючих міцність, твердість і пластичність є перспективним.

Розв'язок задач оптимізації процесів переробки м'яса для забезпечення належної якості фаршів, рівня надійності машин енерго- і ресурсозбереження при розрахунках і конструюванні м'ясопереробних ліній можна здійснити за допомогою адекватних математичних моделей, які зв'язують всі основні процеси різання і параметри м'ясоподрібнювальних органів з фізико-хіміко-механічними властивостями сировини. Використання ПЕОМ для розв'язання таких задач можливе за умови використання побудованого на базі цих

моделей і теоретичних положень фізико-хімічної механіки матеріалів математичного забезпечення.

Навіть враховуючи широке коло питань фундаментального і прикладного характеру, розглянутих дослідниками в області техніки і технології переробки м'яса, комплексні роботи, направлені на використання накопичених знань на загальне моделювання процесів подрібнення для пошуку оптимальних кінематичних і динамічних параметрів різання різноманітної м'ясної сировини, пошук раціональних геометричних параметрів різальних лез і підвищення довговічності м'ясоподрібнювального обладнання не було виконано.

Таким чином, напрям наукових досліджень, викладених у монографії, які направлені на створення узагальнюючої класифікації, фізичне і математичне моделювання, забезпечення ефективності м'ясоподрібнювальних процесів, якості продукції за реологічними і органолептичними показниками та рівня надійності існуючих і підґрунтя для створення нових м'ясорізальних машин та інструментів є актуальним для м'ясопереробних підприємств АПК і має важливе наукове, прикладне і народногосподарське значення.

За основу при роботі над монографією взяті роботи відомих вчених в області подрібнення м'яса та інших матеріалів (С.Т. Антипова, Л.Г. Віннікової, А.В. Горбатова, М.М. Клименка, В.Д. Косого, М.Є. Резніка, А.І. Пелєєва, І.В. Рогова, Т.В. Чижикової, С.Г. Юркова та ін.), оцінка напружено-деформованого стану і реологічних властивостей матеріалів (В.І. Іванова, В.П. Місяця, Л.С. Мороза, П.В. Назаренка, Р. Хонікомба та ін.), визначення показників надійності та зміцнення деталей обладнання (А.А. Вайнберга, В.М. Голубця, Р.С. Гроота, М.І. Пашечка, О.С. Пронікова, Е.В. Рижова, Р. Хаазе та ін.), вивчення взаємодії матеріалів деталей машин з технологічними середовищами (Ф. Боудена, І.В. Васильєва, Г.В. Карпенка, М.В. Кіндрачука, О.І. Некоза, Г.О. Прейса, М.А. Сологуба, М.С. Стечишина, П.А. Ребіндера, Д. Тейбора, М.Д. Томашова та ін.), що дало можливість сформулювати мету і задачу досліджень, виконати теоретичну і експериментальну частину та отримати нові наукові результати. Ця робота є продовженням досліджень названих вчених.

**Мета роботи** – на підґрунті комплексних теоретичних і експериментальних досліджень з застосуванням методів прикладної реології, трибології, матеріалознавства та математичного моделювання удосконалити процеси отримання дисперсних систем з м'ясної сировини, розробити наукові основи і практичні рішення для розрахунку

оптимальних режимів подрібнення, створення енергоефективного і матеріалоощадного технологічного обладнання з підвищеним ресурсом.

Одержані в роботі наукові результати, які розширюють уявлення про процеси подрібнення м'ясної сировини з різноманітними фізико-хіміко-механічними властивостями і класифікаційні ознаки технологічного обладнання дозволили розробити теоретичні основи і експериментально обґрунтувати новий концептуальний підхід у вирішенні на основі математичного і фізичного моделювання проблеми підвищення якості напівфабрикатів, готових виробів і довговічності обладнання м'ясопереробних виробництв АПК, покладений в основу конструктивних і технологічних рішень, вибору геометричних, режимних, кінематичних і динамічних параметрів різальних пристроїв, номенклатури сталей і зносостійких покриттів для різальних інструментів, що забезпечують енерго- та матеріалоощадність при подрібненні м'яса і є підґрунтям для проектування нових надійних подрібнювальних машин.

У монографії узагальнені результати досліджень, виконаних групою співробітників під керівництвом завідувачів кафедр Сухенка Ю.Г. та Сухенка В.Ю. Дана монографія є результатом фундаментальних і прикладних наукових досліджень авторів, які опубліковані у фахових вітчизняних і зарубіжних виданнях, що в свою чергу обґрунтовують **новий концептуальний підхід** про відсутність належної класифікації м'ясоподрібнювальних процесів і обладнання, обґрунтованого вибору матеріалів, конструкцій і режимів експлуатації основних робочих органів, що призводять до зниження енергоефективності подрібнення і якості виробів; низьку довговічність та ефективність м'ясоподрібнювального обладнання, перш за все, пов'язану з некерованою взаємодією деталей з технологічними середовищами, яка включає складний комплекс фізичних і електрохімічних процесів, що впливають на енергетичний стан та дислокаційну структуру зношуваних поверхонь; науково обґрунтований і математично змодельований взаємозв'язок міцностних, зсувних, компресійних характеристик фаршів і готових виробів різного хімічного складу, отриманих на машинах з різною різальною здатністю, що дозволяє розраховувати, визначати, контролювати якість фаршів, скорочувати терміни термообробки і сушки готових виробів, збільшувати їх вихід, підвищувати енерго- та ресурсоощадність процесів і застосовувати отримані результати при конструюванні нового обладнання; енергетичну ефективність, яка дозволяє порівнювати будь-які подрібнювачі; математичні моделі руйнування крихких, високоеластичних і пластичних біополімерів м'яса, що дозволило

сформулювати вимоги до м'ясоподрібнювального обладнання і класифікувати його за структурою матеріальних потоків та обґрунтувати алгоритм пошуку (проекування) обладнання для подрібнення різновидів м'яса; вирішальні чинники, що впливають субмікроструктуру та дислокаційну структуру подрібнювальних інструментів при їх взаємодії з м'ясною сировиною з різною глибиною автолізу, що стало підставою для обґрунтованого вибору матеріалів, технологічних операцій виготовлення і зміцнення з метою забезпечення природної самоорганізації і трибоелектрохімічної енергостабілізації процесів на робочих поверхнях деталей різальних машин; побудову моделі корозійно-механічного зношування матеріалів в технологічних середовищах галузі і, на цій основі, запропонована методика прогнозування властивостей і показників надійності подрібнювального обладнання та розробку нових конструкцій подрібнювальних машин і різальних інструментів, які пройшли промислові випробування.

Автором розділу 2 та висновків до цього розділу, а також підрозділів 5.1, 5.2, 5.3, 5.6, висновком до розділу 5, підрозділом 6.8 є Сухенко Ю.Г. Автором підрозділів 1.7 – 1.9 , висновків по розділу 1, підрозділів 3.5, 3.6 та висновків до розділу 3, підрозділів 6.1 – 6.5 є Сарана В.В. Автором розділів 3.1, 3.2, 4.1 – 4.3 та 6.6 є Муштрук М.М. Вступ, загальні висновки, підрозділи 1.1 – 1.6, 3.3, 3.4, 4.4 та висновків до розділу 4, підрозділів 5.4, 5.5., 6.7, 6.9 та висновків до розділу 6, а також загальна редакція монографії належать Сухенку В.Ю.

## РОЗДІЛ 1. ПРОБЛЕМИ, ДОСЯГНЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ ПОДРІБНЕННЯ М'ЯСА

### 1.1. Загальні відомості про сировину і технологію виробництва м'ясних і м'ясомістких продуктів

М'ясопереробні підприємства АПК України виготовляють понад 700 найменувань ковбас та м'ясомістких продуктів. Ковбаси виготовляють з подрібненого м'яса зі спеціями в ковбасній оболонці. Для доведення ковбас до готовності їх піддають термічному обробленню або ферментації. Залежно від способу підготовки фаршу, термічного оброблення та якості ковбаси поділяють на такі основні групи: варені; сосиски і сардельки; напівкопчені; варено-копчені; сирокочені; сиров'ялені; субпродуктові; інші види ковбас.

Основною сировиною для ковбасного виробництва є м'ясо всіх видів сільськогосподарських тварин і птиці, субпродукти, жирова сировина, яйця та яйцепродукти, рослинні білкові добавки, молочні продукти, крохмаль, борошно та інші продукти. Допоміжна сировина — кухонна сіль, спеції, овочі, бактеріальні та копильні препарати, ковбасна оболонка, вода питна, пакувальні, перев'язувальні та паливні матеріали.

*Яловичина* є основним компонентом фаршу більшості ковбас, який надає йому необхідну липкість, в'язкість, монолітність, високу вологозв'язуючу здатність і колір.

*Свинина* має ніжнішу структуру м'язових волокон і більший уміст жиру. Додавання свинини до фаршу ковбас покращує консистенцію, пластичність, надає продукції специфічного запаху і смаку.

*Шпик* після нарізання на шматки визначеної форми перемішується у мішалці з фаршем. Додавання шпику покращує малюнок на перерізі і підвищує енергетичну цінність ковбас.

Під час соління кухонна сіль рівномірно розподіляється по всій масі фаршу. За тривалого соління в м'ясі відбуваються складні біохімічні процеси, що надає йому специфічного смаку та аромату. Внаслідок дифузійно-осмотичних процесів м'ясо набуває підвищеної липкості та вологозв'язувальної здатності.

При виробництві виробів із солоного м'яса використовують три методи соління - мокрий, сухий та комбінований. При виготовленні ковбас після соління м'ясо подрібнюють на вовчку з діаметром отворів у вихідній ґратці 2-3 мм. Для деяких видів ковбас використовують діаметр отворів 6-9 мм.

Залежно від термічного стану м'ясо поділяють на парне – з температурою 36-38 °С не пізніше ніж через 1,5 години після забою; охололе – яке після розбирання туш доведене до температури не вище 12° С; охолоджене – за температури від 0 до 4° С; підморожене – яке має температуру в товщі від 0 до -2° С; заморожене – яке має температуру в товщі стегна не вище -8° С і розморожене – з температурою в товщі не нижче 1° С.

Ковбаси виготовляють згідно з вимогами діючих ГОСТів, ДСТУ, Технічних умов України та Технологічних інструкцій на кожний вид ковбаси. Залежно від сировини, що використовується, та якості ковбас їх поділяють на вищий, перший, другий та третій ґатунок. Ключові технологічні операції виготовлення ковбасних і м'ясомістких виробів подані у додатку А.

## **1.2. Фізико-хімічні властивості м'яса**

Теплофізичні властивості м'яса (теплопровідність і теплоємність) визначають характер і швидкість перебігу теплових процесів, які застосовують для отримання продуктів з новими якісними показниками. Більшість м'ясопродуктів за нормальних умов класифікують як колоїдні капілярно-пористі тіла [245].

Складна будова, наявність фазових переходів, а також біологічний характер походження роблять визначення теплофізичних і масовогообмінних характеристик дуже складним і здебільшого досить наближеним процесом.

Теплопровідність м'яса залежить не тільки від його стану, а й від напрямку теплотоку відносно поздовжньої вісі м'язових волокон: теплопровідність м'язової тканини в напрямку, паралельному волокнам, становить близько 0,88 теплопровідності у напрямку, перпендикулярному до волокон. Коефіцієнт теплопровідності м'язової тканини пісної яловичини дорівнює 0,5 Вт/(м·К), свинини напівжирної - 0,33, курятини - 0,41 Вт/(м·К) [245].

Електрофізичні властивості відображають структурно-механічні й біохімічні зміни в м'ясі. Структурно-механічні характеристики є функцією багатьох факторів, серед яких важливе значення мають вологість і ступінь подрібнення продукту [103].

Визначені дані питомої електропровідності для подрібненого м'яса і м'ясного соку, який отримали пресуванням м'яса під тиском  $203 \cdot 10^5$  Па, вказують на їх подібність як за абсолютним значенням, так і за



температурою. Подібна картина спостерігається при вимірюванні електропровідності крові. Вона залежить від вмісту води [245].

### 1.3. Трансформація властивостей м'яса в процесі автолізу

Властивості м'яса змінюються у певній послідовності відповідно до основних етапів автолізу (парне м'ясо – посмертне задубіння (Rigor mortis) – послаблення посмертного задубіння і визрівання – глибокий автоліз). Його якісні показники при цьому істотно відрізняються. Парне нормальне м'ясо (до 3 год. після забою) має добру консистенцію і високу водозв'язувальну здатність (рис. 1.1) [245].

Упродовж першої доби після забою розвиток автолізу призводить до різкого зниження водозв'язувальної здатності, зростання механічної міцності, зниження рН від 6,5 - 7,0 до 5,5 – 5,6, погіршення смаку і запаху.

Основою автолітичних перетворень м'яса є зміни вуглеводної системи, системи ресинтезу АТФ, стану міофібрилярних білків.

Оскільки кисень не потрапляє в організм тварин після забою, ресинтез глікогену в м'ясі відбуватися не може, тому починається його анаеробний розпад, який здійснюється у результаті фосфоролізу і амілолізу з утворенням молочної кислоти і глюкози. Швидкість гліколізу можна регулювати: введення хлориду натрію в парне м'ясо пригнічує процес, використання електростимулювання – прискорює.

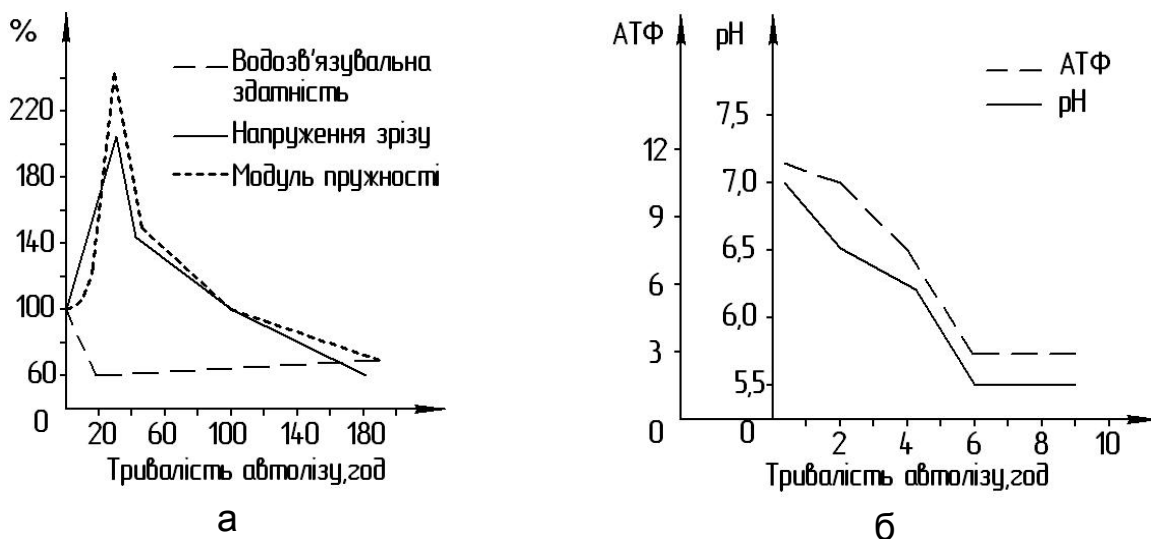


Рис. 1.1 – Трансформація властивостей м'яса під час автолізу: а - водозв'язувальної здатності, напруженості зрізу та модуля пружності під час автолізу; б - активної кислотності рН та вмісту аденозинтрифосфатної кислоти

Через 24 год. гліколіз припиняється внаслідок вичерпання запасів АТФ і накопичення молочної кислоти, яка пригнічує фосфороліз. Накопичення молочної (і фосфорної) кислоти, істотно впливає на стан м'язових білків, що, в свою чергу, визначає фізико-механічні та технологічні властивості м'яса, консистенцію, водозв'язувальну здатність, емульгуючі й адгезійні показники.

Нині питання цілеспрямованого використання сировини і її переробки з урахуванням характеру автолізу набуло особливого значення, оскільки істотно зросла кількість тварин, які потрапляють на переробку після відгодівлі на промислових комплексах. У цих тварин після забою в м'язовій тканині виявляються значні відхилення від звичайного розвитку автолітичних процесів [218, 225].

У зв'язку з цим розрізняють м'ясо з високим кінцевим значенням рН (DFD) і ексудативне м'ясо (PSE) з низьким значенням рН. М'ясо з ознаками DFD (темне, тверде, сухе) через 24 год після забою має рівень рН понад 6,3, темне забарвлення, грубу структуру волокон, високу водозв'язувальну здатність, підвищену липкість. Воно характерне для молодняку великої рогатої худоби, який зазнає впливу різних видів тривалого стресу до забою внаслідок зажиттєвого розпаду глікогену. Кількість утвореної після забою молочної кислоти в м'ясі таких тварин невелика, міофібрилярні білки в м'ясі DFD добре розчиняються. Високе значення рН обмежує тривалість його зберігання, тому м'ясо DFD є непридатним для виробництва сирокочених виробів. Проте, завдяки високій водозв'язувальній здатності, його доцільно використовувати для виробництва емульгованих (варених) ковбас, солених виробів, швидкозаморожених напівфабрикатів.

Ексудативне м'ясо PSE (бліде, м'яке, водянисте) характеризується світлим забарвленням, м'якою пухкою консистенцією, виділенням м'ясного соку внаслідок зниження водозв'язувальної здатності, кислим смаком. Ознаки PSE найбільше має свинина, яку отримують після забою тварин з інтенсивною відгодівлею і обмеженим рухом при утриманні. М'ясо з ознаками PSE через низькі значення рН (5,0 - 5,5) і водозв'язувальної здатності є непридатним для виробництва емульгованих (варених) ковбас, варених і сирокочених окостів, що призводить до погіршення органолептичних характеристик готових виробів (світле забарвлення, кислуватий присмак, жорстка консистенція, знижена соковитість), зниження їх виходу.

#### 1.4. Моделювання структури м'яса та м'ясопродуктів

Серед готових до споживання м'ясопродуктів займають ковбасні вироби. Під час приготування фаршу для ковбас м'ясо піддають інтенсивному ручному і машинному обробленню. Тому аналіз структурних і механічних властивостей м'яса є важливим елементом для раціонального конструювання, вибору м'ясоподрібнювальних машин та інструментів у виробництвах м'ясних виробів, фаршу, напівфабрикатів і ковбасних виробів.

Важливим є створення математичних моделей м'ясних біополімерів і аналітичної оцінки структурно-механічних властивостей м'яса та шпику, визначення зусиль, необхідних для подрібнення м'язових волокон, та з'єднувальної тканини, що суттєво залежать від фізико-механічних властивостей структурних складових і впливає на енергетичні показники різання, технологічні процеси приготування і способи забезпечення високої якості м'ясопродуктів та напівфабрикатів.

Такі дослідження ґрунтуються на аналітичному узагальненні знань з анатомії тварин, закономірностей фізико-хімічної механіки матеріалів, теорії різання органічних і синтетичних матеріалів для оцінки структури та механічних властивостей м'яса та м'ясопродуктів, побудови їх механічних чи електричних моделей для забезпечення раціонального проектування м'ясопереробних машин та інструментів.

Будова тканин м'ясопромислових тварин достатньо повно описана в роботах [27, 170, 208] і наведена в додатку Б.

Колагенові волокна зі збільшення віку тварин товщають, що викликає підвищення опору їх подрібненню. Інколи їх міцність на розривання спів розмірна з міцністю сталі і досягає 600 МПа [208]. Міцність на розривання еластинових волокон не перевищує  $(20\div 30) \cdot 10^5$  Па і вони надають м'ясу пружних властивостей.

Опір різанню колагенових волокон складає близько 41кН/м, а еластинових близько – 28 кН/м. Звичайно, що він залежить від мікрогеометричних параметрів різальних лез. Зусилля, необхідні для розрізання м'язових волокон, значно менші, ніж для руйнування з'єднувальних тканин. Залежно від рівня фізико-механічних властивостей колагенових і еластинових волокон в м'ясній тканині її опір різанню змінюється для різних м'язів від ~1,5 до ~ 9,0 кН/м [170]. Встановлено, що опір різанню м'яса також залежить від тривалості і умов його зберігання після забою [243]. Спроба кількісно пов'язати величину зусиль різання м'яса з кількістю з'єднувальних тканинних білків у ньому [203] не дала досить достовірних результатів через складність

визначення кількісного співвідношення з'єднувальних тканинних білків у м'ясі і зміни їх структури і міцності залежно від породи, способів відгодівлі, віку тварин та інших чинників.

Питоме зусилля різання шпика за температури від 268 до 293К складає  $(0,4 \div 12,8) \cdot 10^4$  Н/м [203].

Загалом м'ясо є складним біополімером, деформаційну поведінку якого при різанні можна описати за допомогою загальноприйнятих механічних моделей реологічних тіл (рис. 1.2). Так, для спрощення складання реологічних рівнянь різних біотехнологічних продуктів застосовують механічні моделі (пружину, пару тертя ковзання, циліндр з рідиною і поршень з отворами), які імітують основні властивості простих ідеальних тіл (пружність, пластичність, в'язкість) [110]. Моделі простих ідеальних тіл можна комбінувати, розташовуючи їх паралельно, послідовно, змішано.

Основними складеними моделями, що застосовуються для моделювання реальних м'ясних продуктів є моделі пружно-в'язкого тіла з релаксацією деформацій (тіло Максвелла), в'язко-пружного тіла з релаксацією напружень (тіло Фойгта-Кельвіна), в'язко-пластичного тіла (Шведова-Бінгама) та деякі інші.

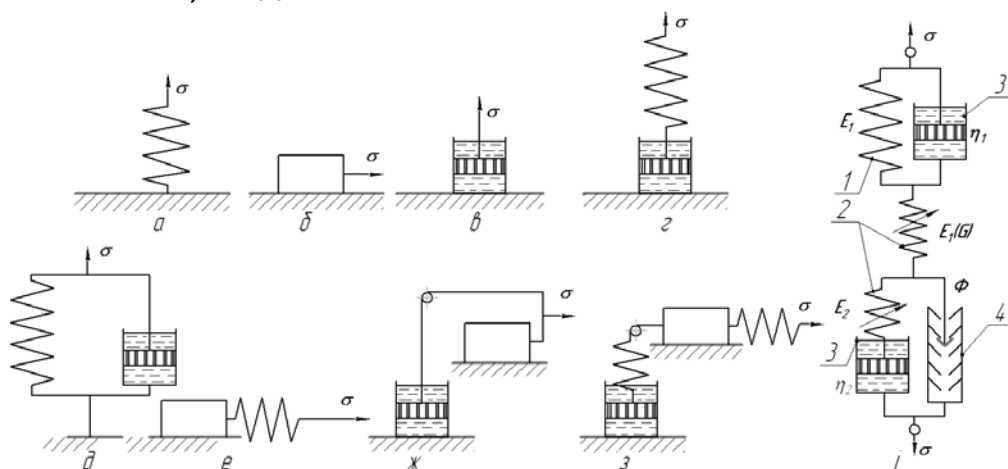


Рис. 1.2 – Механічні моделі реологічних тіл: а – пружного (пружина); б – пластичного (пара тертя ковзання); в - в'язкого (циліндр і поршень з отворами); г – пружно-в'язкого з релаксацією деформацій; д – пружно-в'язкого з релаксацією напружень; е – пружно-пластичного; ж – пластично-в'язкого; з – пружно-пластично-в'язкого з релаксацією деформацій; і – механічна модель незруйнованої м'язової тканини м'яса; 1 – лінійно пружний елемент; 2 – нелінійнопружний елемент; 3 - в'язкий елемент; 4 – елемент, фіксуючий визначене значення деформації

Достатню точність і кореляцію з експериментальними результатами дають моделі, що складаються з трьох, або чотирьох елементів простих моделей (рис. 1.2, а-в). Так, наприклад, для опису поведінки м'ясопродуктів, які мають одночасно пружньо-пластично-в'язкі властивості, може бути запропонована механічна модель, що складається з двох пружних, пластичного і в'язкого тіл (рис. 1.2, з). Така модель достатньо точно описує поведінку м'ясних фаршів, яким притаманні одночасно три властивості – пружність, пластичність і в'язкість [231].

Для моделювання реологічної характеристики суцільної м'язової тканини може бути запропонована механічна модель, подана на рис. 1.2, і. Структура м'язової тканини складається з м'язових волокон, зв'язаних з'єднувальною плівкою. Всі проміжки структури заповнені тканевою рідиною. Такі структури мають ряд властивостей твердих тіл, але, в той же час, еластичні і пластичні, що необхідно враховувати при виборі найбільш доцільних способів і режимів подрібнення і подальшої технологічної обробки.

Загальна деформація механічної моделі м'язової тканини (див. рис. 1.2, і) складається з нелінійно-пружної, з модулем пружності  $E_1(\sigma)$ , що забезпечується елементом 2, еластичної з модулем пружності  $E_1$ , в'язкістю  $\eta_1$ , що забезпечується паралельно з'єднаними елементами 1 і 3 і пластичної з нелінійним модулем пружності  $E_2(\sigma)$ , в'язкістю  $\eta_2$  і фіксатором  $\Phi$ , що забезпечується послідовно з'єднаними елементами 2 і 3 з приєднаним до них елементом-фіксатором 4. Модель математично описується нелінійним реологічним диференціальним рівнянням другого порядку [112]:

$$t \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d}{dt} \left[ \frac{\sigma}{E(\sigma)} \right] + \frac{d}{dt} \left[ \frac{\sigma}{E(\sigma)} \right] + \frac{\tau}{\eta} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta_2}, \quad (1.1)$$

де  $E(\sigma) = E_1(\sigma) \cdot E_2(\sigma) / [E_1(\sigma) + E_2(\sigma)]$  - приведений нелінійний модуль пружності;  $\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 / (\eta_1 + \eta_2)$  - приведений коефіцієнт в'язкості;  $\tau = \eta_1 / E_1$  - період релаксації деформації;  $\varepsilon$  - деформація тіла;  $t$  - час спостереження повзучості;  $\sigma$  - прикладене навантаження.

В процесі різання м'ясопродуктів, коли термін взаємодії різальних органів з ними малий і вони не встигають проявити всі особливості високоеластичної деформації, тоді їхні моделі можуть бути подані у вигляді пружних тіл, що мають деяку в'язкість. Крім того, деформація в зоні різання не завжди пропорційна навантаженню, тому що на цей процес впливає внутрішнє тертя в м'ясопродукті, яке виникає внаслідок

зміщення окремих волокон на величину пластичної деформації. В момент перерізання волокон деформація дещо зменшується за рахунок часткового втягування їх в основну матрицю. Проте, сумарна деформація залишається на досягнутому рівні. Цей вид деформації м'ясопродуктів може бути проілюстрований за допомогою поданої на рис. 1.2, г механічної моделі, яка складається всього з двох елементів – нелінійного пружного  $E^*(\sigma)$  і в'язкого  $\eta^*$ . Тоді величина загальної деформації моделі під дією навантаження  $\sigma$  буде такою:

$$\varepsilon = \varepsilon_n + \varepsilon_v, \text{ або } \varepsilon = \sigma/E^*(\sigma) + \sigma \cdot t/\eta^* \quad (1.2)$$

де  $\varepsilon_n$  і  $\varepsilon_v$  - величина, відповідно, пружної і в'язкої деформацій;  $\sigma$  - величина діючого навантаження, Н;  $t$  – час дії навантаження, с;  $E^*(\sigma)$  та  $\eta^*$  - відповідно, комплексний модуль пружності і в'язкість середовища.

Аналогічно можна скласти механічні моделі і розрахувати біореологічні характеристики будь-якого м'ясопродукту, що є основою для вибору раціонального режиму процесу його подрібнення, оптимізації геометричних параметрів різальних інструментів і підґрунтям для проектування надійних м'ясоподрібнювальних машин з економічним енергоспоживанням.

Детальне вивчення основних реологічних моделей харчових продуктів, зокрема сировини для м'ясопереробної промисловості, сприяло поглибленню знань в області виявлення властивостей біологічної сировини і сприяло використанню моделювання для дослідження пружно-в'язко-пластичних властивостей м'ясних фаршів [224, 225, 231].

Створення в протизага механічним електричних реологічних моделей м'ясних біополімерів і доведення можливостей їх застосування для вивчення пружно-в'язко-пластичних властивостей м'ясопродуктів, необхідних для організації раціональних їх процесів подрібнення має вагомим науковим і практичним значенням.

В'язкість неньютонівських матеріалів, до яких належить м'ясний фарш, залежить від швидкості деформації під дією зусиль різання, пов'язаної із його структурою та її зміною при течії. У свою чергу текучість фаршу залежить від його природи і фізико-хімічних властивостей: форми і розташування молекул, концентрації, температури, вологості, міцелоутворення тощо [224]. Додаванням інгредієнтів до фаршу можна збільшити або зменшити його в'язкість і, тим самим, змінити його здатність до деформування і перетікання.

Для опису текучості ковбасного фаршу прийнятним є рівняння течії бінгамівської рідини [224, 225]:

$$\theta = \theta_0 + \eta_{пл} \cdot \dot{\gamma} \quad (1.3)$$

де  $\theta$  - напруження зсуву;  $\theta_0$  - межа плинності (початкове напруження зсуву);  $\eta_{пл}$  - пластична в'язкість;  $\dot{\gamma}$  - швидкість зсуву.

При течії ковбасного фаршу з високими значеннями градієнтів швидкостей їх структура руйнується і рівень СМХ знижується. Реологічні характеристики різних видів фаршу істотно відрізняються. До певної міри, як буде показано нижче вони показують якісний стан структури м'яса продуктів, тобто склад, ступінь механічної обробки тощо. Течію ковбасного фаршу інколи також можна описати загальним рівнянням Гершеля-Балклі [112].

У табл. 1.1 приведені характеристики граничного напруження зсуву (ГНЗ) і в'язкості різних видів фаршу за температури 10°C. Ці характеристики можуть відрізнятися в залежності від рецептури м'ясних продуктів на різних м'ясопереробних підприємствах досить істотно (до 60%). При розрахунку обладнання для механічної обробки ковбасного фаршу і його робочих органів варто виходити з найбільш вірогідних значень реологічних характеристик продукту, які можуть мати місце на практиці. Для цього необхідний постійний контроль СМХ фаршів.

СМХ фаршу залежать від складу і ряду технологічних чинників (температури, вологоутримання, ступеня подрібнення, тривалості перемішування, тиску тощо).

На основі вивчення механічних моделей Бінгама, Шведова, Шоффільда-Скоттблера, Максвелла, Фойгта-Кельвіна і проведених досліджень [134, 224, 225, 231] для опису поведінки ковбасного фаршу при механічній обробці була запропонована механічна модель, яка складається з моделі Бінгама з елементом, що відображає втрату міцності фаршу при різанні (рис. 1.3).

Таблиця 1.1 – Характеристика різних видів фаршу при 10 °C [134]

Фарш	ГНЗ, Па	В'язкість, Па·с
Яловичий (кутерований з водою)	700	18-20
Свинячий (кутерований з водою)	650	19-22
Ковбаси любительської	700	18-28
Ковбаси докторської	540	16-19
Ковбаси чайної	500	-

Ковбаси ліверної	2200	-
Сосисок свинячих	450	9-11

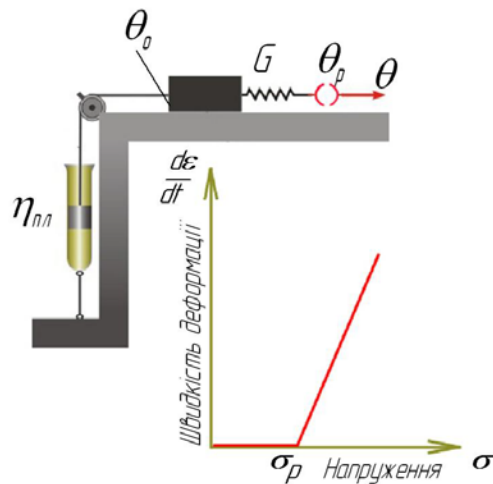


Рис. 1.3 – Механічна реологічна модель ковбасного фаршу при різанні

При подрібненні тиск через ніж передається фаршу, який подрібнюється при напруженні, що перевищує граничне напруження різання ( $\theta_p$ ). Час прикладення сили різання настільки малий, що миттєво досягається граничне напруження різання. Подрібнені частки фаршу спочатку в'язко-пружно деформуються ( $G$ ,  $\eta_{пл}$ ), а потім, при напруженні, що перевищує граничне напруження зсуву ГНЗ ( $\theta_0$ ), фарш пластично деформується і починає текти. При перемішуванні і формуванні фарш поводить себе подібно до тіла Бінгама, що поєднує пружність, в'язкість і пластичність.

Реологічні рівняння механічної моделі ковбасного фаршу можна отримати наступним чином.

Загальна деформація моделі ковбасного фаршу дорівнює сумі деформацій

$$d\gamma = d\gamma_G + d\gamma_H + d\gamma_C + d\gamma_P, \quad (1.4)$$

де  $d\gamma_G$ ,  $d\gamma_H$ ,  $d\gamma_C$ ,  $d\gamma_P$  - деформації, відповідно, тіл Гука, Ньютона, Сен-Венана і елемента, що відбиває втрату міцності фаршу при різанні.

Беручи похідну від лівої і правої частин рівняння (1.4), отримаємо:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{d\gamma_G}{dt} + \frac{d\gamma_H + d\gamma_C}{dt} + \frac{d\gamma_P}{dt}. \quad (1.5)$$

Величину  $\frac{d\gamma_H + d\gamma_C}{dt}$  визначимо з рівняння реологічної моделі тіла

Ньютона з урахуванням умови Сен-Венана:



$$\frac{d\gamma_H + d\gamma_C}{dt} = \dot{\gamma} = \frac{\theta - \theta_0}{\eta_{nl}} \quad (1.6)$$

Величину  $\frac{d\gamma_G}{dt}$  визначимо з рівняння реологічної моделі тіла Гука:

$$\frac{d\gamma_G}{dt} = \frac{1}{G} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (1.7)$$

Величину  $\frac{d\gamma_P}{dt}$  визначимо з рівняння реологічної моделі тіла

Ньютона:

$$\frac{d\gamma_P}{dt} = \dot{\gamma} = \frac{\theta_P}{\eta_{nl}} \quad (1.8)$$

Підставивши рівняння (1.6-1.8) в (1.5), отримаємо рівняння реологічної моделі ковбасного фаршу:

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\theta}}{G} + \frac{\theta - \theta_0 - \theta_P}{\eta_{nl}}, \quad (1.9)$$

де  $\theta_P$  - граничне напруження різання.

Механічна реологічна модель ковбасного фаршу і її математичний опис (1.9) потрібні не лише для об'єктивної оцінки консистенції фаршу, але і для можливості оцінки його поведінки на всіх стадіях комплексної механічної обробки у т.ч. подрібнення.

Нами доведено, що моделювання поведінки пружньо-в'язко-пластичних м'ясних продуктів можна проводити на підґрунті не лише механічних моделей, але і електричних. При цьому механічне напруження можна зіставляти з напругою електричного ланцюга, швидкість деформації – з величиною електричного струму, модуль пружності - із величиною електричної ємності, а в'язкість - з опором електричного ланцюга. Завдяки такому моделюванню дослідження процесу подрібнення м'ясного фаршу значно спрощується.

Послідовне з'єднання елементів механічної моделі еквівалентне паралельному з'єднанню елементів електричного ланцюга, а паралельне - послідовному з'єднанню в електричній схемі. Для складання електричної моделі замість реологічних моделей Гука, Ньютона і Сен-Венана можна застосувати моделі Генрі, Ома і Фарадея (додаток В).

## 1.5. Механіка біополімерів м'яса

При виготовленні основних продуктів переробки м'яса, а саме ковбасних виробів, м'ясо піддають інтенсивному механічному обробленню. Тому аналіз структури цього природного біополімера і

оцінка механічних характеристик м'яса при нормальних і знижених температурах є важливими чинниками, які враховують для раціонального вибору і проектування м'ясоподрібнювальних машин та інструментів у виробництвах м'ясних виробів, фаршу, напівфабрикатів і ковбасних виробів.

Фундаментальні дослідження процесів деформування і руйнування м'яса під навантаженням проведені Горбатовим А.В., Пелєєвим О.І., Клименком М.М., Косим В.Д., Гуцем В.С. та іншими дослідниками. Разом з тим, у результатах досліджень є ряд протиріч, які не дають можливості провести фізичне і математичне моделювання м'ясоподрібнювальних процесів.

Важливе значення має аналітична оцінка впливу напружено-деформованого стану на м'ясну сировину з метою подальшої розробки методів математичного опису деформаційних властивостей м'яса під дією технологічних навантажень при подрібненні, які суттєво впливають на енергетичні показники різання, довговічність і надійність м'ясоподрібнювальних машин, якість м'ясопродуктів і напівфабрикатів. Для цього необхідно узагальнити знання з анатомії тварин, закономірностей механіки суцільних середовищ, порівняти властивості високомолекулярних природних сполук і штучних полімерів, що є підґрунтям у забезпеченні раціонального проектування м'ясопереробних інструментів і машин.

Вище показано, що м'ясопродукти – це складні за структурою і хімічним складом матеріали. Вони мають значну міцність і здатні до дисипації підведеної до них енергії, яка в значній мірі перетворюється в тепло, здатне викликати небажані фізико-хімічні перетворення у біополімерах.

З метою запобігання перегріванню м'яса процес подрібнення здійснюють в декілька стадій. Наприклад, у різальних механізмах шнекових подрібнювачів використовують ряд ножів і ґраток з отворами, діаметр яких ступінчасто зменшується від початкового розміру 0,06 м у приймальних до 0,003-0,002 м у вихідних ґратках. На якісні показники готової продукції впливають також механічні характеристики сировини, спосіб і тривалість ведення процесу різання [25, 206].

Тканини, з яких складається м'ясо, прийнято класифікувати за їх промисловим значенням. Розрізняють м'язові, жирові, сполучні, хрящові та кісткові тканини. Вони належать до природних біополімерів. Тому дослідження їх механічних властивостей на сучасному етапі проводиться у рамках уявлень про механіку полімерів [225].

Деформаційна поведінка хімічних полімерів взагалі і біополімерних тканин м'яса, зокрема, може бути описана сумою трьох складових: пружною деформацією, яка зворотня до напрямку напружень, залишковою деформацією, яка є повністю безповоротною та високоеластичною деформацією, яка є зворотною, але її релаксація проходить із затримкою у часі після зняття напружень [206].

Пружна деформація пов'язується зі зміною міжмолекулярних відстаней, залишкова - з безповоротними переміщеннями молекул на відстані значно більші, ніж молекулярні розміри, а високоеластична - зі змінами конформації біополімерних ланцюгів.

Для характеристики деформованого стану м'яса доцільно використати циклічні діаграми навантаження-розвантаження, які дозволяють простежити поведінку зразка в замкнутому циклі зміни зовнішнього навантаження (додаток Д).

Експериментально встановлені характерні риси пружної  $\varepsilon_y$ , високоеластичної  $\varepsilon_\beta$  і залишкової  $\varepsilon_\psi$  деформацій, які у сукупності дають сумарну деформацію м'яса [24, 34, 101, 224, 225, 246].

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\psi \quad (1.10)$$

Очевидно (додаток Д), що характер деформування м'яса при навантаженні – розвантаженні багато в чому схожий до деформування ізотропних полімерів [41, 224, 225].

Відомо, що ізотропні полімери можуть бути умовно розділені на три групи, в кожній з яких одна з перерахованих складових деформації за даних умов випробувань є переважаючою [41, 149]:

а) жорсткі полімери, що характеризуються малими деформаціями і мають більш високий модуль пружності, ніж інші полімери;

б) м'які еластичні полімерні матеріали, що мають здатність до дуже великих (десятки і сотні відсотків) зворотних деформацій;

г) полімери, що проявляють текучість при дії зовнішніх сил.

Треба мати на увазі, що поділ полімерів на ці групи є дуже умовним, бо, в залежності від режиму навантаження і температури, співвідношення складових загальної деформації в полімері може змінюватись. Все це відноситься також до м'яса, як природного біополімера. Дійсно, м'ясо при звичайних температурах є пластичним тілом, дуже близьким за характеристиками до м'яких полімерів. У міру пониження температури, вода, що міститься в м'ясі, починає вимерзати і різко змінюються його механічні властивості. Так, за температур нижчих

від криогідратних м'ясо за механічними властивостями можна віднести до досить жорстких полімерів [41].

У інтервалі температур між криоскопічною і криогідратною м'ясо одночасно має властивості крихкості і пластичності, тобто в його деформаційній поведінці одночасно присутні особливості усіх трьох розглянутих ізотропних полімерів.

Не викликає сумнівів доцільність встановлення кількісних закономірностей деформаційної поведінки м'яса для забезпечення раціонального конструювання машин для подрібнення, різання і механічної обробки м'яса. Відмітимо, що діаграми розтягування-стискування та інші результати дослідів, які опубліковані в технічній літературі, далеко не завжди можуть бути використані в описі механіки подрібнення м'яса саме в силу некоректності вживаних методик [149].

Використовуючи результати експериментальних робіт з дослідження механічних характеристик м'яса при знижених температурах припускаємо, що м'ясо можна віднести до жорстких (принаймні у напрямі волокон) анізотропних полімерів. У роботі [124] наведені дані результатів випробування м'яса на розтягування в інтервалі температур від  $-5$  до  $-100$  °С. Метою роботи було визначення межі міцності  $\sigma_v$ , ефективних модулів пружності  $E_{эф}$  і коефіцієнта Пуассона  $\mu$  м'яса у двох напрямках, а саме вздовж і поперек волокон у зазначеному інтервалі температур.

Експерименти проводилися на зразках з довжиною і шириною робочої частини, відповідно, 70 і 10 мм.

За температур  $-5$  і  $-18$ °С у всьому інтервалі навантажень лінійного зв'язку між напруженнями і деформаціями не було виявлено. Залишається тільки припустити, що закон Гука все ж має місце за нижчого рівня навантажень, ніж той, що прийнятий за початковий. Відмітимо явно виражену анізотропію м'яса за температури  $-5$ °С, свідченням чого були дуже високі (близькі до одиниці) значення коефіцієнта Пуассона.

Починаючи з температури  $-18$ °С і нижче величини коефіцієнтів Пуассона мало змінюються з ростом навантажень і коливаються навколо значень 0,5, що побічно вказує на зменшення ролі анізотропії м'яса зі зниженням його температури. При криогідратній температурі (близько  $-65$ °С) м'ясо поводить себе як жорсткий скляний полімер, показуючи лінійну залежність між напруженням і деформаціями аж до руйнування. Ефективні модулі пружності, визначені на зразках з поздовжнім і поперечним розташуванням волокон, при цій температурі, відповідно,

склали  $0,51 \cdot 10^4$  і  $0,40 \cdot 10^4$  МПа. Якщо ефективні модулі пружності і коефіцієнти Пуассона відрізняються дуже мало в умовах випробувань, близьких до криогідратних температур, то межі міцності для поздовжніх і поперечних зразків розрізняються суттєво і складають відповідно до 3,95 і 1,9 МПа.

Діаграма розтягування м'язової тканини за кімнатної температури [151, 225] має монотонний характер аж до руйнування (додаток Д). Її дещо незвичайний вигляд, пов'язаний з відсутністю ділянки, де залежність деформації від напружень підкоряється закону Гука, можна пояснити неточністю визначення деформацій в початковий період навантаження [225].

Випробування на стискання в силу простоти виготовлення зразків широко розповсюдженні при дослідженні механічних властивостей м'яса. Зазвичай зразки виготовлялися кубічної форми з довжиною ребра 10 мм [101, 125].

Залежності модулів пружності і меж міцності від температури для м'язових тканин яловичого м'яса приведені на рис. 1.4 і 1.5. Позичії 1 і 2 відповідають напрямам розтягування уздовж і поперек волокон. Очевидно, що залежності, запозичені їх двох різних джерел [101, 125], відрізняються одна від одної не лише кількісно, але і якісно. Якщо порівняти модулі пружності у поздовжньому напрямі, визначені при розтягуванні і стисканні зразків м'яса при одній і тій же температурі, то виявиться, що модуль пружності при розтягуванні приблизно на один порядок вищий за відповідний модуль при стисканні.

На рис. 1.5 показані залежності меж міцності м'язової тканини від температури [125]. Крива 1 відноситься до напрямку стискання уздовж волокон, а крива 2 до напрямку стискання поперек волокон. Цікаво порівняти міцнісні характеристики м'яса за однакових температур ( $-65^{\circ}\text{C}$ ), отримані при проведенні дослідів на розтягування і стискання (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Межа міцності м'яса

Напрямок навантаження	Розтягування, МПа	Стискання, МПа
Уздовж волокон	3,95	17,5
Поперек волокон	1,90	15,0

Можна стверджувати, що м'ясо є тілом, що не однаково чинить опір розтягуванню і стисканню.

Приведемо дані з роботи [101] за результатами досліджень модулів пружності м'яса при стисканні уздовж волокон в інтервалі температур від -20 до +20°C (табл. 1.3).

Аналіз цих даних вказує на дуже велику залежність модуля пружності м'яса від температури. Такого роду залежності взагалі характерні для полімерних тіл.

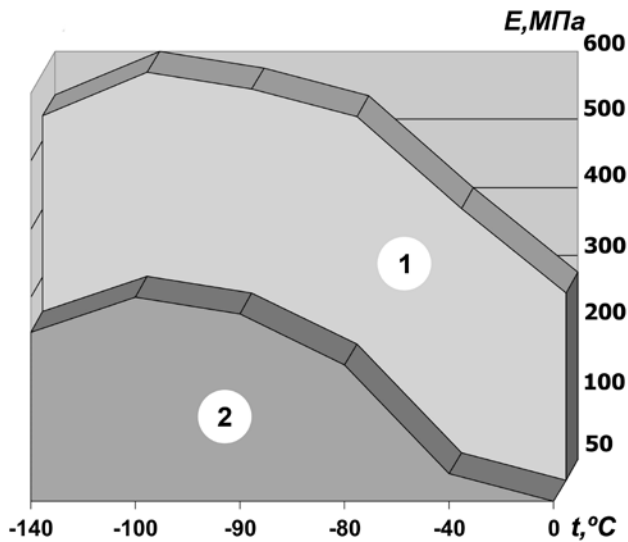


Рис. 1.4 – Залежність модуля пружності  $E$  м'язової тканини яловичини від температури при розтягуванні вздовж (1) і поперек (2) волокон

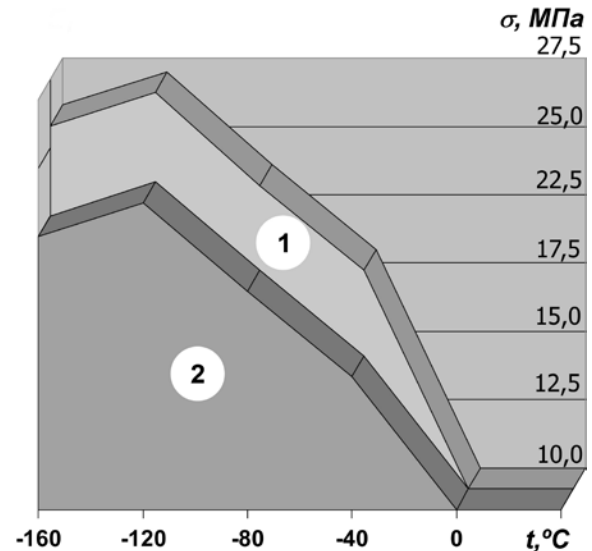


Рис. 1.5 – Залежність межі міцності  $\sigma$  м'язової тканини яловичини від температури при стисканні вздовж (1) і поперек (2) волокон

Таблиця 1.3 – Модулі пружності м'яса при стисканні в залежності від температури

Температура, °C	-20	-15	-10	0	4	8	10	20
Модуль пружності, МПа	8,907	5,14	2,33	0,119	0,038	0,015	0,0126	0,0109

Реономні властивості м'яса зручно вивчати за результатами випробувань на повзучість і релаксацію. Відомо, що випробування на повзучість повинні здійснюватися при постійному напруженні  $\sigma = const$  і постійній температурі  $t = const$  [206]. Деформація визначається як функція часу  $\varepsilon = \varepsilon(\tau)$ . Криві повзучості м'язової тканини при її стисканні з постійними напруженнями в інтервалі навантажень 0,01- 1,0 МПа при кімнатних температурах отримані в роботі [175]. Для порівняно великого напруження, близького до величини межі міцності м'яса, діаграма його повзучості схожа на діаграму повзучості металевих зразків. Спочатку деформація наростає з швидкістю, яка поступово зменшується, а потім –

з постійною швидкістю. Для малих напружень крива деформування набуває вигляду кривої насичення і має горизонтальну асимптоту. З часом величина деформації наближається до деякого граничного значення, а швидкість деформації наближається до нуля. Подібна гранична деформація обов'язково встановлюється лише в тому випадку, коли м'ясо знаходиться у високоеластичному стані і в ньому розвивається рівноважна деформація, що має природу ентропії походження. Високоеластична деформація, що накопичується в процесі повзучості, після розвантаження зразків м'яса з часом зникає. Процес релаксації цієї деформації плине уповільнено.

Аналітичні дослідження інформаційних джерел показали, що об'єм літератури, присвяченої вивченню механічних властивостей м'яса, вкрай обмежений і публікації відносяться, в основному, до останнього десятиліття. Наявних в літературі відомостей недостатньо для розробки методів математичного моделювання деформаційних властивостей м'яса під дією навіть простих (рівномірне розтягування-стискування) видів навантаження, не кажучи вже про складні процеси різання і подрібнення.

## 1.6. Подрібнювальні процеси та вимоги до подрібнювальних машин

Під подрібненням розуміють процес розділення продукту або матеріалу на частини під дією механічних сил з утворенням нової поверхні поділу, що супроводжується пластичними деформаціями, тертям між контактуючими поверхнями м'яса і різального інструменту, підвищенням їх температури.

Кількісно подрібнення характеризується мірою подрібнення  $i$ , рівною відношенню середніх характерних розмірів продукту до подрібнення ( $D_{cp}$ ) і після ( $d_{\bar{n}0}$ )

$$i = D_{cp} / d_{cp} . \quad (1.11)$$

Ступінь подрібнення оцінюють за розмірами шматків, а також двома функціями виду  $F(d)$  розподілення маси шматків за їх розмірами, що характеризуються відношенням маси усіх часток, розмір яких, відповідно, менший  $[F_1(d)]$  і більший  $[F_2(d)]$  за заданий діаметр  $d$ , до загальної їхньої маси. При цьому сума функцій розподілу дорівнює одиниці, тобто  $F_1(d) + F_2(d) = 1$  (рис. 4.1), які перетинаються в точці  $F_1(d) + F_2(d) = 0,5$ .

Знаючи  $F_1(d)$  або  $F_2(d)$ , знаходять середній розмір шматків або часток за рівнянням

$$d_{\bar{n}\delta} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta F_i(d) d_i}{\sum_{i=1}^n \Delta F_i(d)}, \quad (1.12)$$

де  $\sum_{i=1}^n \Delta F_i d = 1$ .

При дисперсному аналізі в'язкопластичних м'ясних продуктів підраховують кількість часток за розмірними класами  $i$ , використовуючи метод варіаційної статистики, визначають ефективний діаметр часток (м)

$$d_{\bar{y}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n N_i d_i^2}{\sum_{i=1}^n N_i}}, \quad (1.13)$$

де  $n$  - загальна кількість розмірних класів;  $N$  - кількість частинок подрібненої сировини;  $d_i$  - діаметр частинок продукту.

Середньоарифметичний лінійний розмір частинок (м)

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n N_i d_i^2}{\sum_{i=1}^n N_i}. \quad (1.14)$$

Середньоквадратичне відхилення розміру частинок (м)

$$q = \sqrt{d_e^2 - L^2}. \quad (1.15)$$

Коефіцієнт неоднорідності складу частинок м'ясної сировини, по якому можна судити про якість подрібнення, розраховують за формулою

$$K = q/L. \quad (1.16)$$

В результаті проведеного Т. В. Чижиковою [244] розмірного аналізу м'ясної сировини до і після подрібнення на різних харчових подрібнювальних машинах запропонована класифікація подрібнення, подана в табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Класифікація подрібнення за розмірами [244]

Вид подрібнення	Середній розмір куска (частинки), мм	
	до подрібнення	після подрібнення
Велике	до 300	до 100
Середнє	до 200	60...10
Дрібне	200...100	10...2
Тонке	10...2	2...0,4
Колоїдне	10...0,4	0,075...0,001



При виробництві ковбас переважно використовується дрібне і тонке подрібнення, яке характеризується дробленням м'ясної сировини з перетворенням її в гомогенну масу.

М'ясна сировина, що має однаковий хімічний склад, але різну ступінь подрібнення, володіє різними значеннями структурно-механічних характеристик (СМХ) і якісними показниками фаршів та готових виробів.

Основні вимоги до машин для подрібнення м'яса наступні:

- повинен забезпечуватися заданий ступінь подрібнення сировини при збереженні якості продукту з мінімальними втратами сировини;

- подрібнення не повинно супроводжуватися великими зусиллями стиснення, створюваними, наприклад, шнеками у вовчках при подачі сировини в зону різання, тому що це призводить до відтискання соку. Разом з тим, при виробленні сирокочених ковбас цей ефект може бути позитивним, тому що вміст вологи у фарші зменшується, але, разом з втратою соку, змінюється його вітамінний і мінеральний склад;

- температура подрібненої сировини повинна бути нижче допустимої;

- виключається попадання в робочі зони змащувальних матеріалів і металевих включень від зношування деталей;

- деталі, що контактують з сировиною, необхідно виготовляти з корозійностійких матеріалів або з матеріалів зі спеціальним покриттям, стійким до агресивного м'ясного середовища;

- робоча зона повинна бути зручною для розбирання і складання вузлів, легкодоступною для санітарної обробки та видалення залишків сировини.

Перші три вимоги впливають на структурно-механічні характеристики і якість подрібненої сировини. Наступні три вимоги до подрібнювальних машин забезпечують збереження якості сировини з огляду на медико-біологічні та санітарні норми.

### **1.7. Загальна характеристика процесу різання**

Механічні властивості м'яса і м'ясопродуктів у різних станах різні. Глибоко заморожену продукцію за механічними властивостями відносять до крихких матеріалів. Продукція, яка знаходиться при плюсових температурах і атмосферному тиску, може бути крихкою (кістка, роги), пластичною (м'ясо, шкіра, шпик, жир-сирець), а по структурі можливо однорідною (кістки, шкура) або складною (м'ясо, шпик, жир-сирець). До складу м'яса, шпика, жиру входить сполучна тканина, яка при плюсових

температурах різко відрізняється за своєю міцністю (у 100-200 разів міцніша за інші тканини м'яса) [171].

М'ясопродукти подрібнюють уклиненням, витискуванням, зрушенням, різанням за допомогою ножів або використовують комбінації цих способів. Найбільш поширене різання за допомогою різноманітних ножів, полотен і інших робочих органів, що не мають парної деталі в механізмі, або ножів в комбінації з додатковою різальною деталлю, виконаною у вигляді ґратки (пласкої, конічної або циліндричної), диска із зубами або пальцями, а також за допомогою ножів, розташованих по конусу, циліндру або площині та ін. Додаткові (парні) деталі можуть бути нерухомими або такими, що обертаються назустріч одна одній, щільно притиснутими до різальних ножів або змонтованими на певній відстані.

Механізми з різальною парою застосовуються при подрібненні м'яса і м'ясопродуктів, що мають у своєму складі сполучну тканину і колагенові волокна, які при плюсовій температурі м'яса майже вільно витягаються з шматків поодинокими (без парної деталі) ножами і не розрізаються.

У м'ясорізальних машинах ножем притаманний обертальний, поступальний, зворотно-поступальний, планетарний і вібруючий рух. Швидкість руху лез ножів лежить в межах 1-100 м/сек, а швидкість подання сировини складає 0,1-0,001 від швидкості руху лез, причому це співвідношення істотно впливає на якість зрізу, величину нормального і дотичного опору різанню і питомі витрати енергії. Дослідами встановлено, що питома енергія руйнування пластичних тіл зростає зі збільшенням швидкості різання. Переведення пластичних тіл у крихкі (глибоке заморожування) знижує витрати енергії. Це пов'язано з тим, що додаткові витрати на пластичні деформації і зовнішнє тертя різко знижуються.

Залежно від форми, кількості і розташування поверхонь поділу, а також залежно від форми шматочків, що отримуються в результаті подрібнення, розрізняють:

- Одночасне або послідовне розділення по одній або декількох паралельних або еквідистантних площинах (поодинокий або багатолодковий пропил по заданій лінії), в результаті отримують пласти заданої або необхідної товщини, що зберігають два інших початкових розміри. Таке різання застосовують при відділенні однієї частини або розділенні одиниці продукції на окремі частини. Різання в цьому випадку здійснюється одним або декількома ножами і пилами, встановленими на одному або декількох паралельних валах.

- Одночасне або послідовне розділення шматків продукції по двох або трьох площинах з отриманням шматочків певної форми (у вигляді куба, паралелепіпеда, циліндра та ін.).

- Подрібнення без збереження певної форми значно збільшує сумарну поверхню поділу і є підготовчою операцією до подальшої переробки.

- Тонке подрібнення, яке перетворює продукцію на гомогенну масу, що має структурно-механічні властивості, відмінні від вихідної сировини.

Продуктивність м'ясорізальних машин визначається за формулою:

$$M = \varphi_0 \cdot F \cdot F_1^{-1}, \text{ кг/с} \quad (1.17)$$

де  $\varphi_0$  - коефіцієнт використання різальної здатності механізму;  $F$  - різальна здатність механізму, або здатність до утворення нових поверхонь,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $F_1$  - поверхня поділу при подрібненні одиниці ваги продукції,  $\text{м}^2/\text{кг}$ .

До машин, що виконують одночасне або послідовне розділення продукції по одній або декількох площинах, відносяться пили, механічні ножі, пластовочні машини і машини для нарізування м'яса на порції; до машин, що виконують одночасне або послідовне розділення продукції по двох або трьох площинах з обов'язковим збереженням форми шматочка, відносяться шпикорізки, машини для нарізування рагу, для нарізування желатину. Для подрібнення продукції без збереження певної форми шматочків служать вовчки, дискові і ножові різальні машини та ін.; до машин для тонкого подрібнення відносяться кутери, відцентрові і ротаційні подрібнювачі, емульситатори, дезінтегратори, колоїдні млини та ін. [171].

Найбільш вживаними на переробних і харчових підприємствах АПК є вовчки і кутери, тому їм приділимо найбільше уваги.

### **1.8. Шнекові подрібнювальні машини (вовчки)**

Вовчки призначені для подрібнення, як замороженого, так і не замороженого м'яса, ендокринно-ферментної, желатинової і жиромісної сировини, хліба, картоплі та ін. Якість подрібнення у різних вовчках, незважаючи на однаковий принцип подрібнення, абсолютно різна. На неї впливають конструктивні особливості, властиві кожному з вовчків, а також ступінь зносу інструменту, корпусу та шнека.

Вовчки складаються з 4 основних механізмів: приводного, живильного, робочого і різального. За призначенням вовчки розділяють на універсальні, призначені для обробки різного виду сировини, яка

знаходиться в різних станах, спеціальні - для обробки конкретного виду сировини і комбіновані - для поєднання декількох технологічних операцій. До останнього типу можна віднести вовчки-мішалки, вовчки-варильники, вовчки-бланширувачі та ін [35]. Ефективність роботи спеціалізованих машин вища, оскільки в них передбачені пристрої, які орієнтуються на конкретні властивості сировини. Наприклад, вовчки для подрібнення жиру забезпечені паровою сорочкою, вовчки для подрібнення мороженого м'яса мають додаткові подрібнювальні органи тощо [69, 132].

За основну характеристику вовчка приймають: діаметр ґратки для промислових типів змінюється від 80 мм до 400 мм; кількість обертів черв'яка за хвилину коливається від 100 до 200 для тихохідних, 200 - 300 для середніх і більше 300 для швидкохідних машин. Для вовчків, призначених не лише для різання, але і для відтискання рідкої фракції, кількість обертів за хвилину вибирають не більшою 70 [206]. За конструктивним виконанням різального механізму вони підрозділяються на вовчки з конічним, циліндричним і плоским різальним механізмом.

Найбільше поширення отримали вовчки з плоским різальним механізмом, що дозволяє здійснити ступінчасте подрібнення м'яса, зробити зручним обслуговування, забезпечити просте виготовлення і надійність машини.

Ступінь подрібнення продукту на вовчку і його продуктивність залежать від розміру отворів ґратки і кількості різальних пар ґратка-ніж. При незначному ступені подрібнення (16-25 мм) досить однієї пари, при тоншому подрібненні (2-3 мм) кількість різальних пар збільшують.

Схеми вовчків без пристроїв для примусового подавання сировини на черв'як із завантажувального бункера показані на рис. 1.6, а, б, е, з, і, з пристроями для примусового подавання - на рис. 1.6, в, г, д, ж, к [171]. Для примусового подавання застосовують: паралельний черв'як (див. рис. 1.6, д), що призводить до помітного подовження робочого черв'яка і циліндра; горизонтальну, перпендикулярну до черв'яка, спіраль, розташовану по днищу завантажувального бункера (див. рис. 1.6, г); перпендикулярний прямовисний шнек (див.рис.1.6, к), встановлений у завантажувальному бункері, що призводить до збільшення висоти машини; дві паралельні спіралі, змонтовані поверх черв'яка з деяким до нього нахилом (див.рис. 1.6, б); дві горизонтальні спіралі, розташовані перпендикулярно до вісі черв'яка і розміщені по днищу окремого завантажувального бункера (див. рис. 1.6, ж).

Найбільше поширення отримали одно- і двохспіральні живильні пристрої, змонтовані перпендикулярно до вісі черв'яка, а також двохчерв'ячні пристрої (див. рис. 1.6, з). Перші, за інших рівних умов, забезпечуючи безперервність подання продукції в робочу частину машини, не збільшують довжини черв'яка і циліндра, що, в результаті, зменшує питомі витрати енергії і підвищує питому продуктивність у порівнянні з поданням сировини вручну [171].

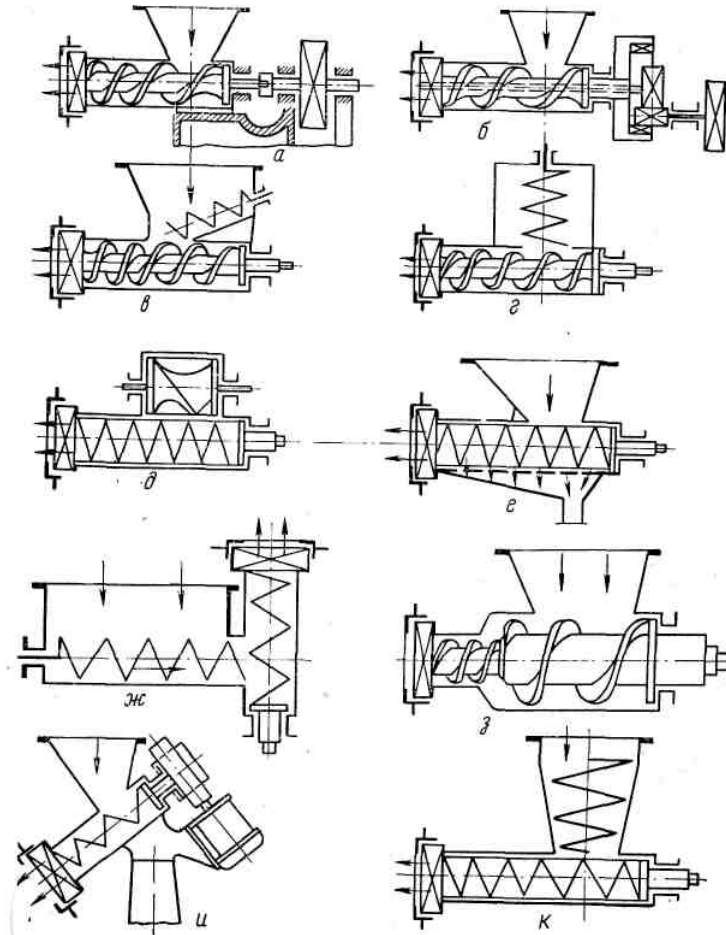


Рис. 1.6 – Схеми вовчків промислового типу [171].

Вовчки можуть бути з горизонтальним (див. рис. 1.6, а-д) або нахиленим (див. рис. 1.6, ж,и) циліндром. Якщо горизонтальне розташування циліндра викликає необхідність в значному підйманні рівня верхнього зрізу завантажувального бункера як за умовами приймання подрібненого м'яса, так і за вимогами техніки безпеки, то при похилому встановленні циліндра з видачею подрібненої продукції вгору рівень розташування верхнього зрізу завантажувального бункера прямого зв'язку з установкою циліндра не має [171].

Циліндр вовчка, призначений для подрібнення продукції при плюсовій температурі, виготовляють з чавуну з подальшим гарячим лудінням; жир сировини - чавунним з забезпеченням обігрівальною

сорочкою або змійовиком; замороженої продукції - литим сталевим або чавунним зі вставними сталевими ребрами, желатинової сировини - чавунним з сталевими ребрами із поздовжніми щілинами, збірником для рідини і ножами, що відсікають зайву продукцію при потраплянні її в циліндр (у цих випадках циліндри можуть бути складеними з колосниковими ґратками). Знос ребер циліндра і зовнішньої крайками черв'яка призводить до зменшення продуктивності вовчка.

Дослідами, проведеними в роботі [120], встановлено, що при подрібненні свинини найбільш ефективні спіральні ребра.

### **1.8.1. Транспортувальні системи вовчків**

Ефективність роботи вовчка суттєво залежить від конструкції транспортувального механізму. Він може бути лопатевим [18], поршневим [206] чи шнековим [35].

Лопатевий транспортуючий механізм має низьку надійність і довговічність. Поршневий механізм характеризується рівномірністю подачі сировини до різального механізму і відсутністю зворотного перетікання сировини, але він не забезпечує безперервності транспортування сировини. Шнековий транспортувальний механізм виключає описані вище недоліки, до того ж він відрізняється простотою конструкції. Шнекові і спіральні живильники використовуються у більшості промислових вовчків [25, 90].

Шнековий транспортувальний механізм працює у парі з циліндром, усередині якого він розташований. Робота такої пари здійснюється за рахунок різниці між силами тертя продукту по робочому циліндру і по поверхні шнека. Для збільшення різниці цих сил на внутрішній поверхні циліндра нарізаються спіральні канавки. Якщо канавки нарізані по усій довжині циліндра, то це може призвести до збільшення зворотного переміщення подрібненої сировини.

Проведемо аналіз роботи шнека. По довжині будь-який шнек можна умовно поділити на три зони. Перша зона - зона захоплення кусків м'яса з бункера; друга зона - зона транспортування, з одночасним підпресовуванням м'яса в робочому корпусі; третя зона - зона контакту кінця шнека з приймальними ґратками, що включає опорний палець для підтримання шнека і, як правило, передачі обертання ножем [132].

У більшості вовчків в першій зоні (від 200 до 500 мм) - всього один або півтора витка шнека. Головним завданням витків є захоплення шматків м'яса в нижній частині бункера і передача їх у другу зону. На

такому принципі виконані шнеки вовчків фірм «УралМясоМаш», «Zeydelmann», «KG», «KS» і ряду інших провідних виробників.

У другій зоні у більшості вовчків розташовані 3 - 5 витків шнека зі змінним кроком, що поступово зменшується у бік вивантаження. Ця частина шнека повністю розміщена у робочому корпусі. Роль цієї частини шнека - передати шматки м'яса з першої зони в третю, поступово підпресовуючи їх до досягнення заданого тиску.

Третя зона шнека є тільки у деяких конструкцій вовчків. Це зона з круто відігнутою частиною останнього витка з кутом приблизно 100-110°, яка виконує функцію ножа, відрізаючого шматки м'яса, що потрапляють в отвори приймальних ґраток.

Фірма «MaDo» (Німеччина) запропонувала ряд запатентованих новинок в конструкціях вовчків. Науковими дослідженнями було доведено, що тільки 10-30% енергії, що витрачається машинами, потрібні для того, щоб подати сировину шнеком. Різальний комплект споживає значно більшу частину потужності - 70-90 %. Розуміння цього спонукало до розробки нового шнека MADO GmbH, що складається з двох частин - вала і транспортуючої частини. Вал, на якому встановлений різальний комплект, виготовлений з високоякісної нержавіючої сталі, а транспортуюча частина - з досить міцної пластмаси, яка має необхідні експлуатаційні характеристики і низький коефіцієнт тертя по сировині, знижуючи тим самим витрати енергії на тертя сировини по поверхні шнека.

Детальний огляд транспортуючих систем сучасних вовчків поданий у додатку Е.

Він показав, що напрямки удосконалення конструкцій подаючи шнеків наступні:

- виконання останнього витка шнека з виступом для більш інтенсивного подавання сировини до різальних ґраток [132];
- застосування шнека зі змінним кроком, в останньому витку якого виконані отвори з гострими кутами заточування, спрямованими в бік обертання шнека, для додаткового подрібнення зворотного потоку сировини [132];
- виключення закручування сировини при подачі її до різальних органів з високим тиском [19, 22];
- виконання двохзахідного шнека для забезпечення руйнування сировини по всій довжині шнека під час транспортування до різального механізму [34];
- виконання витків шнека з різальними крайками [132];

- застосування автоматичного регулювання подачі сировини до зони подрібнення [4];
- поєднання у шнекові робочих функцій транспортування і перемішування сировини [10, 131] та ін.

### 1.8.2. Різальні механізми вовчків

Основним конструктивним вузлом вовчка, що впливає на ступінь і якість подрібнення сировини, є його різальний механізм. Довговічність і продуктивність роботи різального механізму залежить від багатьох чинників: конструкції ножів і ґраток; матеріалів з яких вони виготовлені і способів термічної обробки; сили затягування різального механізму; способу виконання різання тощо.

Різальний вузол вовчка складається з нерухомих підрізних ґраток, ножів, що обертаються, і набору нерухомих ножових ґраток з отворами різних діаметрів. Нерухомі підрізні ґратки мають зовнішні і внутрішні кільця, сполучені трьома перетинками, заточеними з одного боку. Різальна крайка перетинок розташована під гострим кутом до радіуса. Ножі, що обертаються, мають лопаті з двома різальними площинами (двохсторонні ножі). Різальні крайки лопатей можуть бути виконані: прямолінійними; криволінійними частково у формі Архімедової спіралі і частково логарифмічної спіралі; утворені відрізками дуг кіл, центри яких лежать на поруч розташованому пері на відстані, рівному половині радіусу кола торцевих граней, причому кут різання кожного леза складає 35-50°, твірна передньої поверхні леза – пряма, по колу, по архімедівській спіралі, по логарифмічній спіралі.

Нерухомі ножові ґратки виконані у вигляді дисків з круглими отворами і є парними різальними деталями з ножами, що обертаються. Для підвищення ефективності роботи в ножових ґратках для подрібнювача м'ясо-кісткової сировини виконані, як правило, круглі отвори перфорації, розташовані рядами по концентричних колах. Робоча поверхня диска умовно розділена на концентричні кола, радіуси яких визначаються за формулою [163]:

$$R_n = (1,272)^n; R_0, n = 1,2,3,4. \quad (1.18)$$

де  $n$  - порядковий номер умовного кола;  $R_0$  - радіус центрального посадочного отвору;  $R_n$  - зовнішній радіус умовного кола.

Круглі отвори перфорації розташовані на центральних радіусах умовних кіл і їх кількість в кожному ряду визначається за формулою [163]:



$$Z_{n+1} = [(1,618)Z_n], \quad (1.19)$$

де  $Z_n$  - кількість отворів на попередньому радіусі,  $n = 1,2,3,4$ .

Квадратні дужки означають цілу частину числа, кількість круглих отворів перфорації на  $n$ -му умовному колі. Кількість круглих отворів перфорації на першому, відлічуючи від осі диска, умовному колі дорівнює одному з чисел Фібоначчі, починаючи з числа 5, або 8, або 13, або 21, або 34 і так далі. Круглі отвори перфорації на суміжних умовних колах розташовані в шаховому порядку [120].

Аналіз параметрів плоскообертової різальної пари в площині різання вказує на велике значення форми лінії леза ножа для здійснення різання. Форма лінії леза повинна забезпечувати найменшу витрату енергії на різання матеріалу, мінімальну нерівномірність навантаження на робочий вал диска і виключити затискання сировини різальними крайками пари по усій робочій довжині леза [120].

Для вовчка з прямолінійними лезами ножів рівняння лінії леза може бути подане у наступному вигляді (рис. 1.7) :

$$r \cdot \sin \beta = \text{const} \quad (1.20)$$

Кут ковзання із зростанням радіуса зменшується

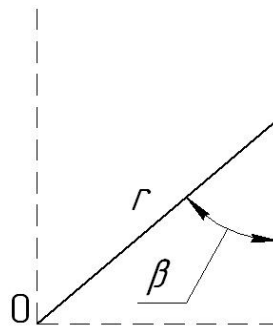


Рис. 1.7 – Схема до аналізу плоскообертового різального вузла з прямолінійними лезами.

Для вузла з лезами ножів, обкресленими за формою гіперболічної спіралі, рівняння лінії леза буде (рис. 1.8):

$$R\varphi = \text{const} \quad (2.24)$$

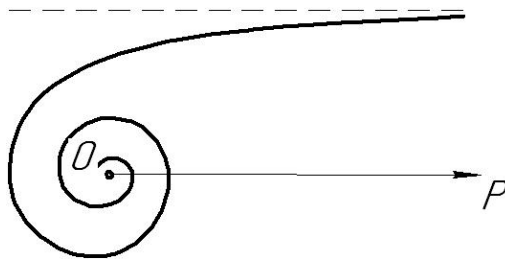


Рис. 1.8 – Схема до аналізу плоскообертового різального вузла з лезами ножів, обкресленими за формою гіперболічної спіралі.

Для вузла з лезами ножів, обкресленими за формою логарифмічної спіралі, рівняння лінії леза буде (рис. 1.9):

$$r = r_0 + e^{\varphi \cdot \text{ctg} \beta} \quad (2.25)$$

Кут ковзання крайки леза у цьому випадку залишається постійним.

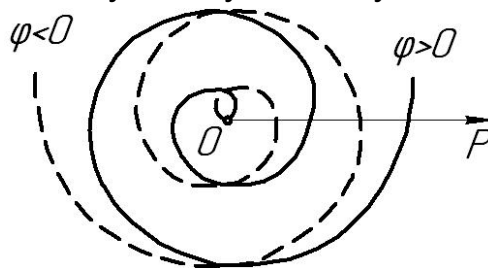


Рис. 1.9 – Схема до аналізу плоскообертового різального вузла з лезами ножів, обкресленими за формою логарифмічної спіралі.

Для вузла з ножами, обкресленими за формою архімедової спіралі, рівняння лінії леза буде (рис. 1.10):

$$r = r_0 + A\varphi \quad (2.26)$$

Кут ковзання крайки леза у цьому випадку збільшується зі збільшенням радіуса.

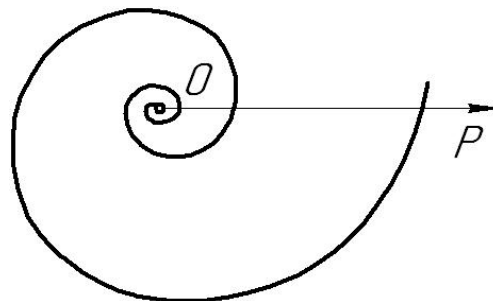


Рис. 1.10 – Схема до аналізу плоскообертового різального вузла з лезами ножів, обкресленими за формою архімедової спіралі.

Німецька фірма MADO GmbH випускає вовчки з ножами, різальна крайка яких описує ексцентричне коло (рис. 1.11). Кут ковзання такої кривої змінюється від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Таким чином, значна частина різальної крайки має кут ковзання близький до нуля, здійснюючи «рубачуче» різання.

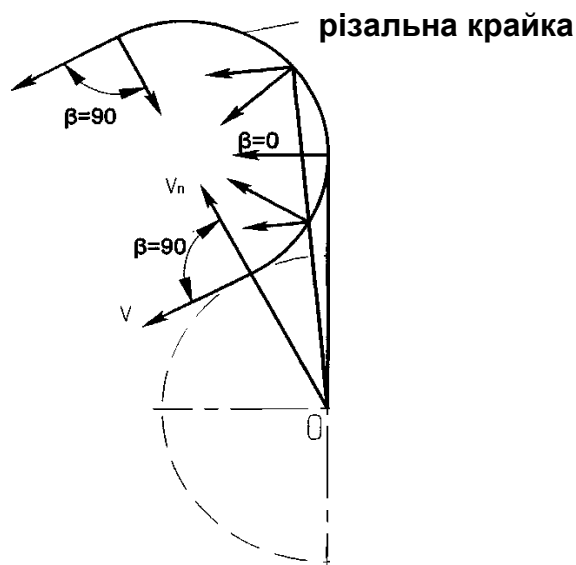


Рис. 1.11 – Схема до аналізу плоскообертового різального вузла з лезами ножів, обкресленими за формою ексцентричного кола.

Конструкційні форми і лінійні параметри різальних робочих органів вибираються з урахуванням умов їх роботи, фізичного стану матеріалу, що розрізається, кінематики різального органу і подрібненого продукту, міцності і жорсткості робочого органу, потужності потоку сировини та інших чинників. На підставі аналізу даних, приведених в роботах [49, 224, 112 та ін.], конструкційні форми різальних інструментів можуть бути покладені в основу їх класифікації (рис. 1.12).

Різальні інструменти, що знаходяться в одній класифікаційній групі, окрім конструкційної схожості, як правило, виконують однотипні види робіт за близьких умов різання. Класифікаційна схема робочих різальних органів відбиває їх загальні виробничі функції і конструкційні характеристики і може бути покладена в основу створення нормативної документації і стандартів на м'ясорізальний інструмент.

З урахуванням досвіду експлуатації м'ясорізального інструменту і робіт [134, 206 та ін.] найбільш загальні вимоги до м'ясорізальних робочих органів можна узагальнити у такому вигляді:

- відповідність конструкційних форм і експлуатаційних властивостей конкретним умовам роботи; достатня жорсткість і висока зносостійкість; безпека в роботі;

- конструкційні форми корпусів інструментів і ножів, а також спосіб установки ножів треба вибирати такими, щоб різальну частину збірних інструментів можна було заточувати за одну установку на заточному верстаті (у пристосуванні);

- пайка чи інше закріплення змінних ножів на маточині має бути високоякісним з тим, щоб міцність шва у декілька разів перевищувала напруження, що виникає в зоні роботи ножів;

- різальні крайки ножів мають бути заточені і доведені (завали, тріщини і припалювання на них не допускаються);

- конструкція різальних органів повинна сприяти швидкій заміні їх у машині, легкості переточування (заточування) і високій точності установки інструменту на робоче місце;

- різальний інструмент повинен легко звільнитися від залишків продукту і промиватися з метою підтримки (забезпечення) санітарно-гігієнічного стану машини.

А.І. Пелеєв відмічає, що конструкцію промислових вовчків копіювали з м'ясорубок, вживаних в побуті і системі громадського харчування, причому для підвищення їх продуктивності збільшували геометричні розміри деталей робочих органів при деякому збільшенні швидкостей їх обертання. Ребіндер П.А. [192] вважає, що пряме геометричне копіювання привело до значного збільшення металомісткості конструкцій, росту питомих витрат енергії і температури подрібнюваного продукту.

Найбільше поширення отримав різальний механізм, що складається з трьох- чотирьохлопатових ножів (рис. 1.13) і набору плоских перфорованих дисків-граток. Перші (по ходу сировини) гратки носять назву приймальних (рис. 1.14), остання – вихідної.

З наведеного аналізу (додаток Ж) видно, що удосконалення різальних вузлів вовчків ведеться у наступних напрямках:

- отвори у вихідних гратках розташовують з нахилом до їх площин та виконують комічними у вигляді конусів або сопел [20];

- приймальні гратки виконують з «живим» перерізом, що збільшується по ходу обертання ножа [17];

- леза ножів виготовляють криволінійними, інколи зубчастої форми [37];

- надають ножу підвищену кількість обертів у порівнянні зі шнеком [6];

- застосовують ножі з підпружиненими лопатями [205];

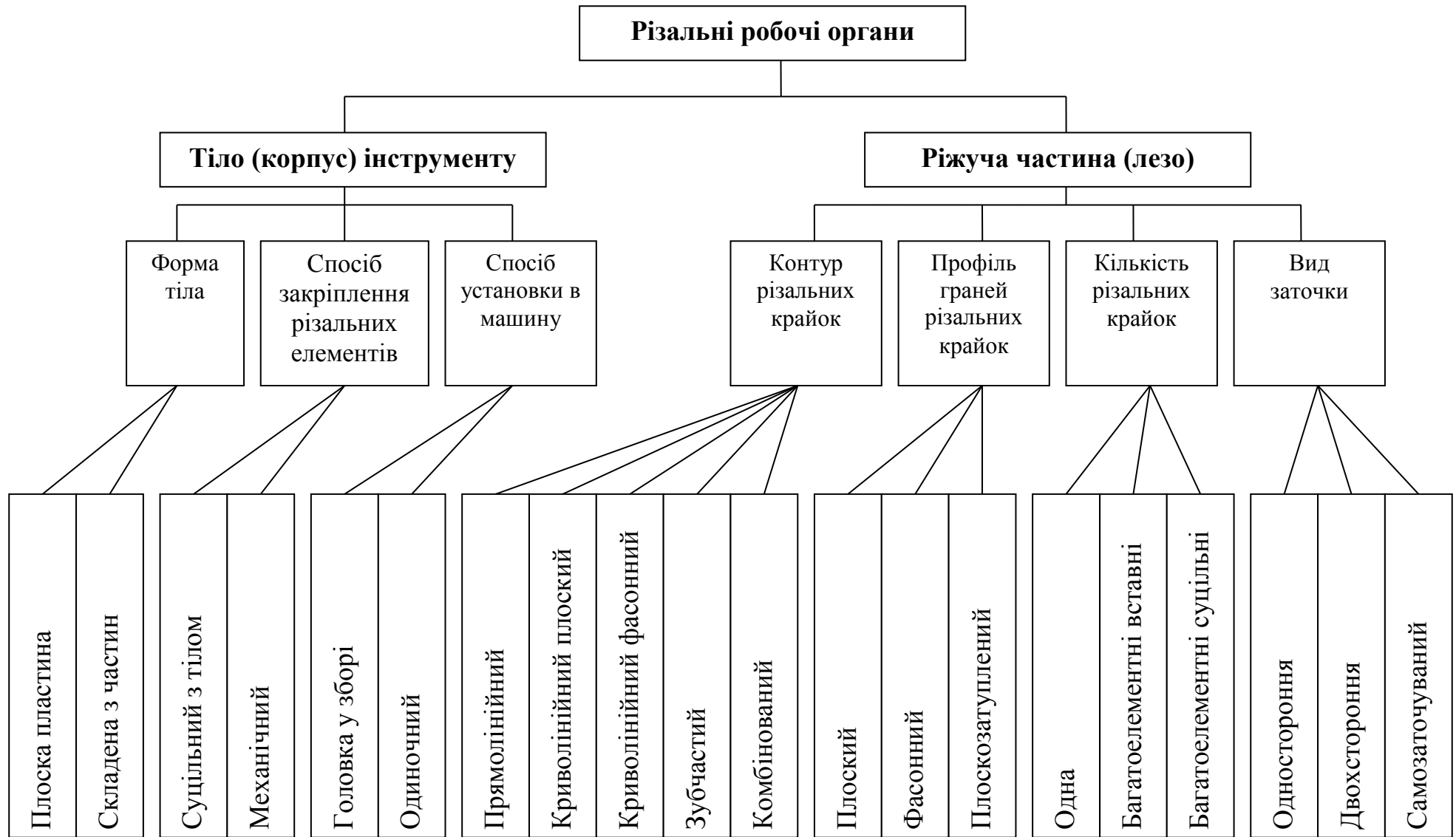


Рис. 1.12 – Класифікація різальних ножів шнекових подрібнювачів

- застосовують для різання зворотно-поступальний рух притиснутих ґраток [207];
- замінюють ножі ґратками, що обертаються [120];
- забезпечують оптимальний питомий тиск на контакті ґраток і ножів [65] та ін.

Форма крайки ножа та отворів у приймальних та вихідних ґратках грають вирішальну роль в процесі подрібнення м'яса. Важливе також конструктивне виконання м'ясоподрібнювальних вузлів шнекових м'ясоподрібнювальних машин поданий у додатку Ж.

Технологічні отвори в ґратках виконують різних діаметрів (25, 13, 9, 6, 4, 3, 2 мм), і форм (рис. 1.15, 1.16).

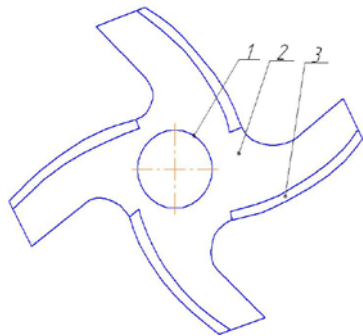


Рис. 1.13 – Чотирьохлопатевий ніж: 1 - центральний отвір; 2 - різальне перо; 3 - лезо

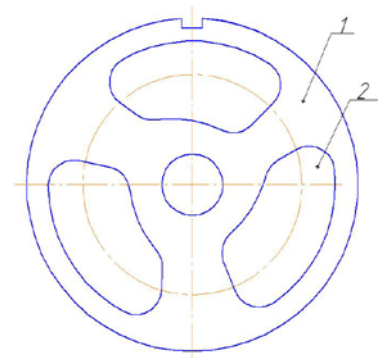


Рис. 1.14 – Приймальна ґратка: 1 - диск; 2 - отвори

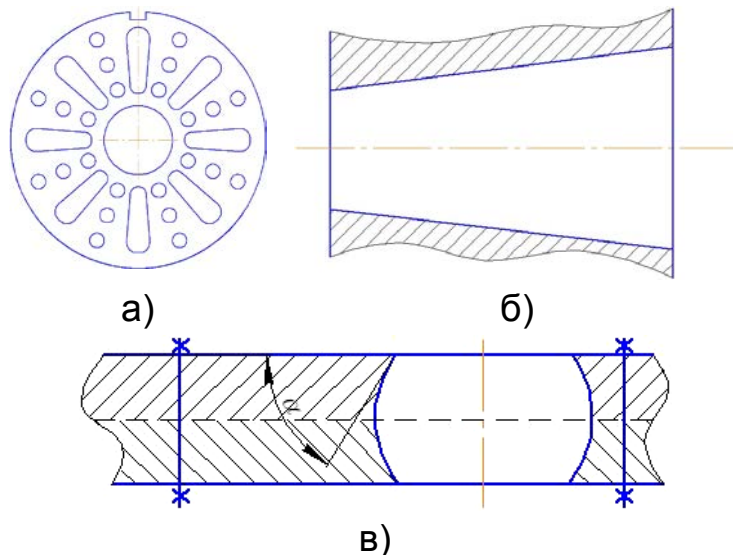


Рис. 1.15 – Різні форми отворів ґраток вовчка: а - каплеподібної форми; б - у формі сопел; в – у формі зрізаної з двох сторін кулі

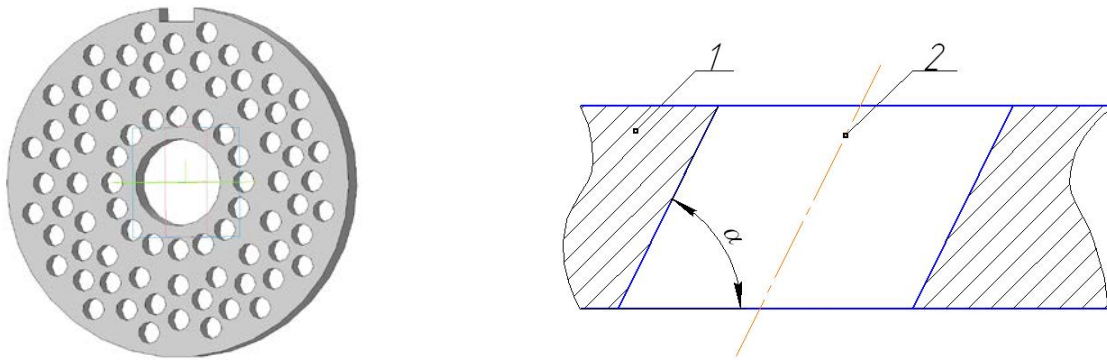


Рис. 1.16 – Гратка з прохідними отворами, виконаними під кутом до різальної поверхні ножа: 1 - робоча поверхня гратки; 2 - вісь отворів, яка нахилена під гострим кутом  $\alpha$

### 1.8.3. Енергетичне забезпечення процесу різання у вовчках

У роботі Полещука О.Б. [176] отримані рівняння, які описують механізм процесів подрібнення і придатні для їх енергетичної оцінки.

Так, потужність, необхідна для подрібнення продукту виражається таким чином:

$$P_1 = A_1 \cdot n = \int_{r_{1\min}}^{r_{1\max}} q_b \cdot z_n \cdot z_b \cdot \rho \cdot d \cdot \rho = 0,5 \cdot q_b z_n \cdot z_b (r_{1\max}^2 - r_{1\min}^2) \cdot n, \quad (1.21)$$

де  $A_1$  - робота на подрібнення продукту за оберт шнека, Н·м;

$n$  - частота обертання шнека,  $c^{-1}$ ;

$q_b$  - питомий опір сировини різанню, Н/м;

$z_n$  - кількість лез підрізного ножа;

$z_b$  - кількість лез обертового ножа;

$r_{1\max}$  та  $r_{1\min}$  - відповідно максимальна і мінімальна відстань лез підрізного ножа від осі обертання шнека, м;

$\rho$  - поточна відстань лез підрізного ножа від осі обертання шнека, м.

Потужність, необхідна для подрібнення сировини лезами обертового ножа і крайками отворів гратки, також визначаються через роботу подрібнення продукту за один оберт вала шнека  $A_2$ :

$$P_2 = A_2 \cdot n = q_b \cdot \pi \cdot r_0^2 \cdot z_b \cdot z_0 \cdot \psi \cdot k_1 \cdot n, \quad (1.22)$$

де  $r_0$  – радіус отворів в ножових гратках, м;

$z_0$  – кількість отворів в ножових гратках;

$\psi$  - коефіцієнт використання площі отворів ножових граток;

$k_1$  – коефіцієнт, що враховує зміну висоти шару м'яса, впровадженого в отвори гратки, безпосередньо перед відсіканням його лезами обертового ножа.

Потужність, що витрачається на тертя в деталях подрібнювального механізму вовчка, описується рівнянням:

$$P_3 = \pi \cdot n \cdot k_2 \cdot z_b \cdot f_1 \cdot p_1 \cdot a_2 (r_{2\max}^2 - r_{1\min}^2), \quad (1.23)$$

де  $k_2$  - кількість площин контакту ножів і ґраток;

$f_1$  - коефіцієнт тертя ножів по ґратках;

$p_1$  - питомий тиск на поверхні контакту ножів і ґраток вовчка, Па;

$a_2$  - ширина задньої грані леза ножа, м;

$r_{2\max}$  і  $r_{1\min}$  – відповідно, максимальна і мінімальна відстань лез обертового ножа від осі обертання шнека, м.

Для отримання рівнянь тертя сировини по робочих органах вовчка за основу було взяте рівняння, що характеризує тиск, необхідний для витікання фаршу через отвір:

$$p_2 = p_3 + p_4 = 790B^{0,4} \cdot d_0^{-0,86} \cdot W^{0,56} + 2600 \frac{l}{d_0} \cdot \eta_{\text{эф}} \cdot W, \quad (1.24)$$

де  $p_3$  і  $p_4$  - втрати тиску, відповідно, в місцевому опорі (при вході продукту в отвір) і по довжині отвору, Па;

$B$  - ефективна в'язкість фаршу при швидкості  $W=l$  м/с, Па·с;

$d_0$  - діаметр отвору, м;

$W$  - швидкість екструдування фаршу через отвір, м/с;

$l$  - довжина отвору, м;

$\eta$  - коефіцієнт, залежний від ефективної в'язкості фаршу.

Потужність, необхідну для подолання тертя сировини по торцю шнека можна розрахувати так:

$$p_4 = M_4 \cdot \omega = \frac{4}{3} \cdot \pi^2 \cdot n \cdot [790B^{0,4} (d_{0,1}^{-0,86} \cdot W_1^{0,56} + d_{0,2}^{-0,86} \cdot W_2^{0,56}) + 2600 \cdot B \cdot l (d_{0,1}^{-1} \cdot W_1^{0,18} + d_{0,2}^{-1} \cdot W_2^{0,18})] \cdot (r_n^3 - r_{\text{вн}}^3) \cdot \text{tg}(\beta + \rho), \quad (1.25)$$

де  $M_4$  – момент тертя сировини по шнеку, Н·м;

$\omega$  - кутова швидкість обертання шнека, с<sup>-1</sup>;

$d_{01}$  і  $d_{02}$  – відповідно, діаметри отворів в першій і другій ґратках вовчка, м;

$r_{\text{вн}}$  і  $r_n$  – відповідно, внутрішній і зовнішній радіуси гвинтової нарізки останнього витка шнека;

$\beta_n$  - кут підймання гвинтової лінії останнього витка шнека;

$\rho$  - кут тертя продукту.

Потужність, що витрачається на екструдування сировини, описується рівнянням:



$$p_5 = M_5 \cdot \omega = 3466,7 \cdot \pi^2 \cdot B \cdot l \cdot n (r_n^3 - r_{\text{вн}}^3) \cdot \text{tg}(\beta_n + \rho) \cdot (d_{01}^{-1} \cdot W_1^{0,18} + d_{02}^{-1} \cdot W_2^{0,18}), \quad (1.26)$$

де  $M_5$  – момент, який необхідно прикласти для безперервного витікання фаршу через отвори ґратки вовчка, Н·м.

Потужність, що витрачається на провертання продукту обертовими ножами виражається рівняннями:

- при провертанні продукту ножом, розташованим між підрізним ножом і ґратками:

$$p'_{\text{в}} = \frac{4}{3} \pi^2 \cdot n \cdot [790B^{0,4} \cdot (d_{01}^{-0,86} \cdot W_1^{0,56} + d_{02}^{-0,86} \cdot W_2^{0,56}) + 2600 \cdot B \cdot l \cdot (d_{01}^{-1} \cdot W_1^{0,18} + d_{02}^{-1} \cdot W_2^{0,18})] \cdot \left\langle \left\{ \frac{1}{\pi} (r_{2\text{min}} - r_{2\text{max}}) [\pi (r_{2\text{min}} + r_{2\text{max}}) - 4a_3] + r_{2\text{min}}^2 \right\}^{1,5} - r_{2\text{min}}^{30} \right\rangle \cdot f_3, \quad (1.27)$$

- при провертанні продукту, що знаходиться між двома ґратками:

$$p''_{\text{в}} = \frac{8}{3} \pi^2 \cdot n \cdot (790B^{0,4} \cdot d_{01}^{-0,86} \cdot W_1^{0,56} + 2600 \cdot B \cdot l \cdot d_{02}^{-1} \cdot W_2^{0,18}) \cdot \left\langle \left\{ \frac{1}{\pi} (r_{2\text{max}} - r_{2\text{min}}) [\pi (r_{2\text{max}} + r_{2\text{min}}) - 4a_3] + r_{2\text{min}}^2 \right\}^{1,5} - r_{2\text{min}}^2 \right\rangle \cdot f_3, \quad (1.28)$$

де  $a_3$  - середня ширина лопаті обертового ножа, м

$f_3$  - коефіцієнт тертя сировини по ґратці.

На нашу думку запропоновані залежності є достатньо коректними і можуть застосовуватись для енергетичної оцінки процесу різання у вовчках.

## 1.9. Машина для тонкого подрібнення м'ясної сировини

### 1.9.1. Загальна характеристика обладнання

Для тонкого подрібнення м'яса при виготовленні варених ковбас (у тому числі сосисок і сардельок) використовують кутери, емульситатори, мікрокутери, колоїдні млини або агрегати тонкого подрібнення.

Ступінь подрібнення м'яса встановлюють відповідно до виду й сорту ковбасних виробів. Для більшості варених ковбасних виробів застосовують тонке подрібнення м'ясної частини фаршу. Для варених ковбас з неоднорідною структурою (фаршированих, шинково-січених та ін.) пастоподібна структура подрібненого м'яса потрібна для зв'язування

більших складових фаршу (шматки м'яса, жирна свинина, шпик, язик та ін.).

Основними технологічними вимогами до функціональних властивостей фаршу варених ковбасних виробів є: високий ступінь руйнування первинної структури компонентів фаршу; забезпечення зв'язаного стану вологи і жиру під час технологічного оброблення та в готовому продукті; забезпечення монолітності структури, соковитості та необхідних органолептичних показників готового продукту (ніжна консистенція, добрий смак, колір та ін.).

*Тонке подрібнення* — найважливіша операція у виробництві варених ковбас. Від якості її виконання залежить вихід і якість готової продукції.

Машина для тонкого подрібнення поділяють за принципом роботи різального механізму. Подрібнювачі, що працюють за схемою «ніж — гратка», порівняно прості за конструкцією, компактні. Однак при їх використанні спостерігається підвищене нагрівання подрібненого продукту за рахунок тертя ножів і ґратки, різальний механізм швидко спрацьовується і метал потрапляє у фарш. До таких подрібнювачів належить подрібнювач агрегату К6-АТИМ-2 та емульситатори.

Агрегат К6-АТИМ-2 забезпечує змішування основної сировини з іншими компонентами фаршу і його тонке подрібнення. Сировину, що надходить в агрегат, попередньо подрібнюють на вовчку (діаметр отворів 2 – 3 мм). Завантажені в місильне корито складові фаршу змішуються за допомогою спіралеподібних шнеків. Після закінчення процесу змішування (2 – 3 хв) фарш направляють у накопичувальну місткість змішувача, звідки, за допомогою шнека, передають насосом для транспортування фаршу через фаршепровід у приймальну горловину подрібнювача. Потрапляючи в зону різання між обертовим ножом і нерухомою ґраткою, сировина подрібнюється. Ступінь подрібнення фаршу залежить від діаметра отворів ґратки і комплексу різального механізму. Продуктивність агрегата до 3000 кг/год.

У м'ясній промисловості широко використовують колоїдні млини. Колоїдний млин має робочий орган у вигляді нерухомого зубчастого статора і розміщеного симетрично йому зубчастого ротора. Проходячи крізь зазор між статором і ротором м'ясо подрібнюється за рахунок перетирання, перерізання і кавітації. Недоліком конструкції є збільшення через деякий період експлуатації зазору між поверхнями статора і ротора, внаслідок чого зменшується ступінь подрібнення. Конічна форма ротора і статора дає змогу регулювати розмір зазору.

Ножові подрібнювачі мають елементи звичайних кутерів, але працюють безперервно і обладнані великою кількістю серпоподібних ножів, розміщених у нерухомому циліндричному корпусі. Загальний недолік цих подрібнювачів — значні витрати часу на переточування ножів.

Найпоширенішими машинами для тонкого подрібнення і приготування фаршу варених ковбас є кутери [245].

### **1.9.2. Конструкції кутерів**

Кутери призначені для середнього і тонкого подрібнення сировини у м'ясних та рибних виробництвах. Широке використання кутерів на харчових підприємствах пов'язано з їх перевагами: високою продуктивністю, можливістю виготовлення фаршу певного хімічного складу згідно рецептури, інтенсивного перемішування подрібнюваної сировини, простотою конструкції основних механізмів, легкістю розбирання для санітарної обробки і підготовки для наступної роботи, оснащенням передавальних механізмів запобіжними пристроями на випадок перевантаження, зручністю в обслуговуванні і експлуатації, надійністю в роботі та можливістю автоматизації та включення в потоково-механізовані лінії [30, 97].

Розрізняють кутери періодичної й безперервної дії. Сировина в кутерах подрібнюється за допомогою швидкообертових серповидних ножів, встановлених на валу. Ножі поперемінно поринають із частотою до  $0,3 \text{ с}^{-1}$  в обертову чашу, місткістю від 20 до 1200 літрів, частково заповнену сировиною. Подрібнення відбувається у відкритих або герметичних умовах під вакуумом.

Кутер складається зі станини, приводу, ножового валу, чаші, різального механізму, який включає приводний вал і серповидні ножі, закріплені у ножовій головці, кришки, що закриває робочу зону кутера. До кришки прикріплені шкребки, що забезпечують видалення продукту із периферії чаші на середину чаші. Вони направляють продукт під різальний механізм при обертанні чаші.

На відкритому кінці ножового вала, який у перерізі має форму шестигранника, закріплюють ножі під кутом  $180^\circ$  попарно, або через  $120^\circ$  при кількості ножів кратній трьом. Таке розміщення ножів викликає дисбаланс ножового вала. До того ж ножі по масі не повинні відрізнитись більше ніж на 2...5 г. Між ножами, для забезпечення відстані, встановлюються шайби. Ножі попередньо затискаються шайбою і виставляються таким чином, щоб відстань між найбільш віддаленою

різальною крайкою і чашею кутера була в межах від 0,3 до 3 мм в залежності від точності виготовлення кутера. Більш сучасний спосіб установки ножів на валу – установка ножової головки з попередньо установленими загостреними і відбалансованими ножами (рис. 1.17).

Ножі мають різальну крайку, яка має форму спіралі або лому лінію (додаток 3). Лезо ножа (рис. 1.18,б) має кут загострення в межах  $\beta_0 = 15-18^\circ$  для подрібнення м'яса в охолодженому стані [75].

Серповидна форма леза ножа (рис. 1.18, б) сприяє його кінематичному загостренню. Тобто різання м'яса відбувається лезом з кутом  $\beta$ , який менший кута фізичного загострення леза:

$$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} \beta_0 \cdot \cos \alpha = \operatorname{tg} \beta_0 / \sqrt{1 + \left( \frac{V_\tau}{V_n} \right)^2}, \quad (2.32)$$

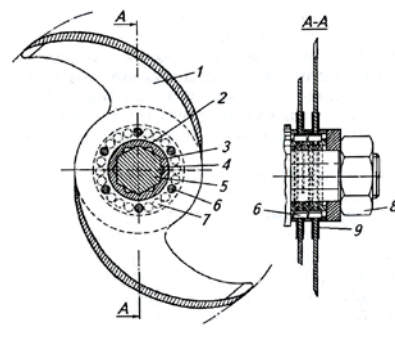
де  $\beta_0$  – кут загострення леза, град;

$\alpha$  - кут між нормаллю до різальної крайки і напрямком швидкості різання, град;

$V_n, V_\tau$  - складові швидкості руху ножа в нормальному (перпендикулярній до лінії різальної крайки) і тангенціальному (вздовж ділянки різальної крайки) напрямках, м/с.

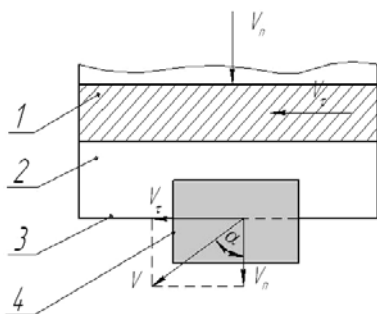


а)

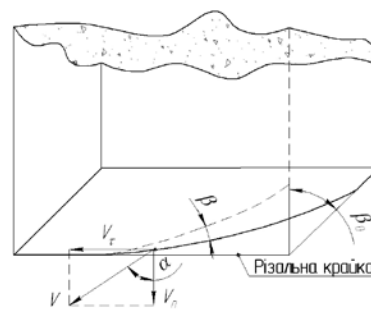


б)

Рис. 1.17 – Ножова головка кутера: а - встановлення ножової головки на вал, б - схема ножової головки кутера: 1 - ніж; 2 - посадочна частина; 3 - втулка; 4 - отвір; 5 - вал; 6 - штифт; 7 - отвір; 8 - гайка; 9 – диск.



а



б

Рис. 1.18 – Складові різального органу: 1 – корпус (тіло) ножа; 2 – лезо ножа; 3 – різальна крайка ножа.

Серповидна форма леза сприяє сповзанню не перерізаних волокон сполучної тканини з різальної крайки, тобто очищенню ножа. Різальне лезо у вигляді ломаних ліній використовується для подрібнення, переважно, підмороженого м'яса [143].

Основний показник технічної характеристики кутера - місткість чаші, кількість ножів та частота їх обертання. Для малих підприємств застосовують кутери із чашею місткістю 0,015...0,125 м<sup>3</sup>, для великих - до 1 м<sup>3</sup>. Чашу кутера завантажують або вручну, або завантажувальними пристроями (підймальниками з підлоговими візками).

Кутерування під вакуумом дозволяє отримати фарш і готові вироби більш високої якості за рахунок поліпшення їхнього кольору, смаку й виключення утворення великих пор і повітряних порожнеч. Ковбасні вироби, виготовлені під вакуумом, більш довго зберігають свій смак і запах та мають подовжений термін зберігання.

Кутерування є досить інтенсивним механічним процесом різання, перемішування, масування, що викликає фізико-механічні і хімічні зміни у фарші. Комплексне вивчення нами процесу кутерування дозволило установити його основні параметри, що впливають на якісні показники сирого фаршу і готової продукції.

Процес кутерування м'яса для варених ковбас, сосисок і сардельок здійснюють у три фази на протязі 6-12 хв (в залежності від конструкції кутера). **На першій фазі** здійснюють руйнування первинної структури м'яса – подрібнення пісного, найбільш жорсткого м'яса – яловичини. На другій фазі до м'яса додається від 20 до 40 % води і білкової добавки. Утворюється водно-білкова емульсія. Наприкінці **другої фази** в чашу завантажують жирну сировину, яка подрібнюється і стабілізується водно-білковою емульсією. На **третьій стадії** утворюється вторинна структура – фарш. Тривалість фаз приблизно однакова за часом.

В заключному періоді відбувається інтенсивне подрібнення жирової сировини, загальна поверхня часток збільшується, волога з вільної переходить у поверхнево-зв'язану, утворюється нова структура фаршу. Граничне напруження зсуву досягає максимального значення. Надалі має місце деяке «розмелювання» волокон, граничне напруження зсуву фаршу знову зменшується. Підвищення температури, збільшення ступеня диспергування і аерування фаршу, а також емульгування жиру призводять до вторинного структуроутворення фаршу; одночасно, відбуваються його колоїдно-хімічні зміни. Еталонні умови подрібнення сировини є економічно найбільш доцільними [111, 225].

Дослідження реологічних властивостей фаршу, отриманого при різній швидкості різання ножів кутера й тривалості кутерування показали, що зі зростанням швидкості різання підвищується в'язкість фаршу. При цьому загальна витрата енергії на подрібнення не збільшувалася за рахунок скорочення тривалості кутерування. Максимальна в'язкість (636 Па·с) і найкраща якість (по органолептичній оцінці) були у фарші, який кутерувався 9-12 хв за частоти обертання ножів 3000 хв<sup>-1</sup> [167].

Тривалість процесу обробки фаршу в кутері в значній мірі залежить від гатунку м'яса, ступеня його попереднього подрібнення, коефіцієнта завантаження чаші, відстані між крайніми ножами й чашею (мінімальна 0,3 мм), кількість і форми заточки ножів та частоти їх обертання [143, 159].

Для подрібнення м'ясної сировини застосовують і ряд інших машин, характеристика яких подана у додатку И.

### **Висновки до розділу 1**

1. Розмаїття способів і машин для подрібнення м'ясопродуктів свідчить про те, що для практичного використання немає єдиної методики пошуку раціональних умов реалізації процесу подрібнення, забезпечення його найбільшої ефективності.

2. Виготовлювачі м'ясоподрібнювальних машин для переробки однакової за фізико-механічними властивостями сировини застосовують різні за принципом дії машин, профілем і конструкцією різальні інструменти, що свідчить про відсутність загальнопризнаного підходу вибору способу подрібнення.

3. Режими подрібнення і геометрична форма ножів у більшості випадків вибирається на основі досвіду експлуатації машин і, значно рідше, з використанням даних теоретичних і експериментальних досліджень, що пояснюється недостатнім рівнем розвитку теорії подрібнення м'ясопродуктів, відсутністю необхідного методичного і апаратного забезпечення для визначення їх структурно-механічних характеристик.

4. Приведена класифікація м'ясорізального інструменту, яка відображає їх загальнопромислові і конструктивні характеристики, може бути покладена в основу створення вітчизняних стандартів на м'ясорізальний інструмент.

5. Аналіз основних шляхів інтенсифікації процесу різання м'ясних продуктів показує, що удосконалення м'ясорізальних машин здійснюється, в основному, за рахунок збільшення швидкостей різання,

пошуку раціональних кінематичних і динамічних параметрів різання з урахуванням якості готового продукту та енергозатрат на процес різання.

6. Перспективним для забезпечення високої якості готового продукту є ступінчасте багатостадійне подрібнення сировини на «м'яких» режимах, які виключають дисипацію енергії в тепло, денатурацію і коагуляцію білка м'язової тканини, не зменшують вологоутримувальної здатності фаршу і не погіршують його структурно-механічних характеристик (СМХ).

7. Аналіз літературних джерел показав, що оцінка поведінки біополімерів м'яса в процесах його механічної обробки може ґрунтуватися на математичному апараті і методах механіки хімічних полімерів.

8. Набір пружних констант, характеризуючий ступінь анізотропії властивостей м'яса, діаграми деформації та інші залежності, що визначаються експериментально для математичного опису механіки біополімерів м'яса під час подрібнення в різних температурних інтервалах, повинні встановлюватись досить коректними експериментальними методами, які забезпечують однорідність поля деформацій і напружень.

9. Основним недоліком майже всіх типів шнекових подрібнювачів є той, що конструкція їхніх подаючих органів не пов'язана з структурно-механічними характеристиками м'ясної сировини, не забезпечує раціонального режиму її переміщення до різальних органів, а процес протискування м'яса через ґратки супроводжується великим опором і при цьому виконується непродуктивна робота та знижуються якісні показники м'ясопродукту.

10. Для вовчків і кутерів не обґрунтовані кінематичні і динамічні параметри різання та геометричні параметри інструментів, а тому фарш часто має неоднорідну структуру і низьку якість.

## **РОЗДІЛ 2. ВЗАЄМОДІЯ ДЕТАЛЕЙ М'ЯСОПОДРІБНЮВАЛЬНИХ МАШИН З ТЕХНОЛОГІЧНИМИ СЕРЕДОВИЩАМИ**

### **2.1. Корозійно-механічне спрацювання робочих органів м'ясоподрібнювальних машин**

М'ясопереробним підприємствам притаманна своя специфіка і різноманітність технологічних процесів. Тому машинобудівна промисловість випускає для неї обладнання великої номенклатури, в ряді випадків металовмісне та кінематично складне. Характерною особливістю м'ясоподрібнювального обладнання (МО) є наявність рухомих робочих органів, що механічно впливають на продукт, безпосередньо контактують з робочими середовищами, які активно впливають на процес їх зношування. Ці середовища, в більшості випадків, є електролітами і, при контактуванні їх з металами, розвивається електрохімічна корозія [106, 223, 230].

Робочі середовища галузі за своїм складом і природою дуже різноманітні. Їх умовно можна розділити на газоподібні, рідкі, напіврідкі (напівсухі), які містять хімічні та поверхнево-активні речовини. Потрапляючи на поверхню рухомих деталей обладнання вони викликають корозійне руйнування і зношування, або комплексне корозійно-механічне спрацювання. Це визначення корозійно-механічного зношування (КМЗ) знайшло своє відображення в ГОСТ 23.002-78, де цей вид зношування трактується, як «зношування в результаті механічної взаємодії, яке супроводжується хімічною і (або) електричною взаємодією матеріалу з середовищем».

Необхідно відмітити, що МО експлуатується в умовах підвищеної вологості. Пари води, адсорбуючись на поверхні деталей, а також розчинені в ній гази ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  та ін.) створюють умови для протікання електрохімічних реакцій. Робочі середовища м'ясної промисловості в більшості випадків є електрохімічними суспензіями. Тому процес корозійно-механічного зношування МО в більшості випадків протікає в умовах електрохімічного впливу середовищ.

Деталі пар тертя м'ясоподрібнювальних машин, які працюють в технологічних середовищах, можна розглядати, як металеві електроди, заглиблені в електроліт. Вони електрично заряджаються відносно розчину, що призводить до виникнення різниці потенціалів [225, 223].

Зміна вільної енергії поверхні тіла, зануреного в електроліт, обумовлена різницею потенціалів «тверде тіло – рідина» і адсорбцією Гіббса. У зв'язку з цим вбачається можливість керувати зносостійкістю



деталей МО завдяки зміні чинників, які впливають на величину вільної енергії (додаток К1, формули К1, К2, К3).

Одним з шляхів зміни величини вільної енергії є наявність в середовищі поверхнево-активних речовин (ПАР). Роботи П.А. Ребіндера, Г.І. Єпіфанова, Н.Н. Петрової [193], а також інших авторів [157] показали, що наявність ПАР в робочому середовищі суттєво впливає на інтенсивність зношування деталей. Різке збільшення інтенсивності зношування при введенні ПАР пояснюється з позицій фізико-хімічної механіки матеріалів. У відповідних умовах у поверхневих шарах контактуючих при терті деталей виникають високі розтягуючі напруження. Ці напруження будуть зростати при адсорбції ПАР з технологічного середовища і, у деякий момент, можуть перевищити критичні, що призводить до утворення мікротріщин з чистими незахищеними стінками. Адсорбуючись на цих стінках, молекули ПАР викликають розклинюючу дію, що призводить до підсилення деформацій поверхонь.

Таким чином, проникнення адсорбованих речовин в деформований поверхневий шар призводить до його пластифікування і розмягчення, полегшує його пластичну течію, а іноді навіть викликає розривання, внаслідок чого може збільшитися зношування. Зміна вільної енергії поверхні визначається різницею потенціалів системи «тверде тіло – рідка фаза». В зв'язку з цим важливо дати кількісну оцінку впливу електричної поляризації поверхні металів і сплавів на величину їх поверхневої енергії [223, 230].

Необхідно відмітити, що зміна потенціалу відносно нульового заряду впливає на адсорбційну здатність металу. А.Н. Фрумкін [252] показав, що адсорбція органічних з'єднань максимальна при потенціалі нульового заряду  $\phi$  н.з. буде впливати на механічні властивості металів.

Утворення на поверхнях металів плівок-продуктів взаємодії з середовищем призводить до зміни їх потенціалів [214], що впливає на механічні властивості і, відповідно, на інтенсивність зношування. Природа плівок буде обумовлена хімічними властивостями середовища, його складом, наявністю розчиненого кисню та інших газів. Крім того, плівки можуть виконувати роль мастила і зумовити зменшення коефіцієнту тертя. Інтенсивність корозійних процесів визначається щільністю, адгезійною здатністю плівок по відношенню до основного металу, їх зносостійкістю [225, 223].

Тертя деталей м'ясоподрібнювальних машин представляє собою імпульсний коливальний процес [249], внаслідок чого можуть коливатись

значення  $\varphi$ . Коливальні процеси на електродах роблять суттєвий вплив на процеси адсорбції [186].

Вперше дослідження потенціалів поверхонь тертя в процесі корозійно-механічного зношування були проведені І.В. Васильєвим [46]. Показано, що незалежно від концентрації розчину NaOH зношування нормалізованої сталі 45 зростає по мірі зменшення різниці між значеннями потенціалу при зачистці поверхні та терті. Коли ця різниця наближується до нуля, настає інтенсивне зношування.

Найбільш перспективним є електрохімічний метод дослідження поверхонь тертя. Застосування і подальший розвиток цього методу дозволяє глибше вивчити механізм і закономірності корозійно-механічного зношування металів і сплавів в технологічних середовищах галузі. Для цієї мети було необхідно створити установку, яка дозволяє проводити електрохімічні дослідження в процесі тертя в широкому діапазоні температур, швидкостей, рН-середовища і навантажень. При розробці методики і експериментальної установки враховані особливості середовища, в якій працюють деталі м'ясоподрібнювального обладнання (додаток К).

Дослідження засобів зменшення зносу деталей при терті в агресивних середовищах галузі має проводитися в основному в двох напрямках: використання матеріалів, які можуть протистояти корозії і зношуванню в різних експлуатаційних умовах; використання електрохімічного захисту для зменшення КМЗ деталей, виготовлених з недефіцитних металів і сплавів.

## **2.2. Особливості експлуатації м'ясоподрібнювального обладнання**

Робочі середовища м'ясопереробної промисловості, в більшості випадків, є водними суспензіями і їх контактування з деталями обладнання, викликає на їх поверхні корозію, яка спричиняє не тільки втрати металів, але також зниження механічної міцності конструкцій машин і апаратів. Пошкодження від корозії призводять до зменшення точності і тривалості роботи механізмів, зокрема м'ясоподрібнювальних машин. Продукти корозії забруднюють деталі, пошкоджують зовнішній вигляд і, потрапляючи в харчовий продукт, знижують його якість. Взаємодія робочих середовищ з поверхнею деталей, що зумовлює корозійне руйнування металу, визначається рядом внутрішніх та зовнішніх чинників.

Внутрішні фактори визначаються природою і будовою металу деталей, способом їх обробки, напруженням, які виникають в деталях

при експлуатації. Зовнішні фактори пов'язані з характеристиками корозійних середовищ і умовами навантаження деталей [153, 234, 229].

Технологічні середовища на м'ясопереробних підприємствах крім білків і ліпідів містять, ряд органічних кислот та інших сполук, які надають їм значної хімічної (рН 5,4-5,6) та поверхневої активності.

За призначенням в технологічному процесі м'ясопереробного виробництва робочі середовища можливо розділити на три класи: м'ясо і м'ясопродукти; технологічні водні середовища (розсоли-розчини, лускатий лід, холодна і гаряча вода, пара тощо); неорганічні і органічні мийні і чистячі засоби для санітарної обробки обладнання. До неорганічних мийних засобів відносяться їдкі луги, кальцинована сода, фосфати, силікати (метасилікат натрію, рідке скло), а до чистячих – неорганічні кислоти (азотна, сірчана, соляна, фосфорна).

В інструкції по «Миттю і профілактичній дезінфекції підприємств м'ясної та птихопереробної промисловості», затвердженій 14.01.2004 р. (розділ № 4, п.п. 4.1, 4.2, 4.7, 4.8, 4.27, 4.29, 4.30) рекомендовані такі розчини для миття, знежирювання та дезінфекції обладнання: мильно-содовий (1-2%-вий кальцинованої соди; 0,1-0,2%-вий каустичної соди; 0,15-0,3%-вий препарату соди); складений (0,15% кальцинованої соди, 0,075% їдкого натрію; 0,075% метасилікату натрію); складений (0,3% метасилікату натрію, 0,5% кальцинованої соди); освітлений розчин хлорного вапна з вмістом 0,4-0,5% активного хлору; 0,05-0,07%-вий розчин трихлорізоціанурової кислоти по активному хлору; 0,1%-вий розчин дихлорізоціанурата натрію; 0,8-1,0%-вий розчин хлораміну при дезінфекції металевого обладнання.

Органічні мийні засоби в основному представлені натрієвими і калієвими солями вищих жирних кислот або милами, а чистячі – різними органічними кислотами. Крім того м'ясопродукти містять мікроорганізми, життєдіяльність яких залежить від активної кислотності. В процесі збереження і переробки м'яса і м'ясних продуктів мікроорганізми, які в них присутні швидко розмножуються, окислюючи при цьому органічне середовище [98].

За характером взаємодії з металами робочі середовища галузі (РСГ) можна розділити на хімічно - і поверхнево-активні. В групу хімічно-активних середовищ входять водні розчини кислот, лугів, солей. Їх особливістю є та, що молекули розчинених в них речовин можуть дисоціювати і, тим самим, обумовлюють можливість протікання електрохімічних корозійних процесів.

В роботах [223, 230] висвітлено питання про вплив електрохімічних корозійних процесів на механічні властивості металів. Вказано, що цей вплив проявляється в значній мірі і при терті та зношуванні металів. Наявність хімічно активного середовища на поверхні тертя може у декілька разів збільшити знос і навіть змінити характер цього процесу [201].

В нейтральних середовищах (вода, розчини кухонної солі) переважає киснева деполяризація за рахунок розчиненого в середовищі кисню.

В лужних середовищах (м'ясні суспензії з лужною реакцією, мийні засоби тощо), великого значення в процесі деполяризації набувають захисні плівки оксидів. Однак, наявність в лужних середовищах таких стимуляторів корозії, як іони Cl, F та інших, значно інтенсифікує процес розчинення повневіх шарів металу.

При корозійно-механічному зношуванні агресивне середовище може інтенсифікувати процес руйнування поверхонь тертя металів внаслідок зниження їх поверхневої енергії, обумовленої фізичною і хімічною адсорбцією різноманітних хімічних і поверхнево-активних речовин, які знаходяться в середовищі, тобто внаслідок реалізації ефекту Ребіндера [67].

Незалежно від величини рН корозійно-активні середовища (КАС) галузі сприяють локалізації деформації в більш тонких поверхневих шарах деталей у порівнянні з тертям без змащування. Підвищення рН активних середовищ сприяє збільшенню відносної деформації робочих поверхонь деталей подрібнювачів м'яса та зменшенню глибини деформаційної зони. В слабкислому середовищі висока локальна концентрація дислокацій призводить до крихкого руйнування поверхонь тертя [238, 210, 222]. Лужне середовище викликає їх адсорбційне пластифікування [135]. Тому багато деталей технологічного м'ясоподрібнювального обладнання піддаються значному зносу. В ряді випадків його інтенсивність настільки велика, що термін служби деяких деталей не досягає часом і декількох діб, наприклад, ножів м'ясоподрібнювальних вовчків, кутерів та інших подрібнювачів [228].

Хоча більшість дослідників вважають, що ведучим при КМЗ є корозійний вплив середовища [50, 119], природа і характер цього процесу вивчені ще не повністю і до теперішнього часу немає єдиної точки зору про співвідношення корозійного і механічного чинників при руйнуванні деталей. Від оцінки рівня взаємовпливу цих чинників

залежить вибір зносостійких матеріалів і методів боротьби з КМЗ деталей обладнання.

### **2.3. Вплив навантаження на зношування деталей і кінетику електрохімічних процесів**

Умови навантаження фрикційного контакту визначають характер та інтенсивність зношування металів. Вони впливають на процес підвищення чи зниження міцності поверхневих шарів, температурний режим роботи спряження, фазові та структурні перетворення на поверхнях тертя [226, 129]. Вузли тертя технологічного обладнання м'ясопереробних підприємств працюють в широкому діапазоні швидкостей (від  $5 \cdot 10^{-3}$  до 1 м/с) і тисків (від 2 до 10 МПа, а в деяких випадках – до 40 МПа) [187].

В корозійно-активних середовищах на поверхнях тертя металів утворюються і стираються плівки вторинних структур, властивості яких залежать від хімічного складу технологічних рідин, природи і структури металів контактних гальванічних пар і умов навантаження вузлів тертя. Вид руйнування і властивості поверхневих плівок визначають характер деформування поверхонь тертя. Дослідження, виконані Б.І.Костецьким показали, що існує два принципово різних процеси руйнування-відновлення вторинних структур [31]. В одному випадку це аморфізовані пластичні поверхневі плівки, які ще зберігають ознаки металевого стану. В другому випадку – крихкі, високотверді плівки, які руйнуються шляхом утворення тріщин, дроблення і відколювання мікрочастинок з поверхні металу. Ці плівки за своїми властивостями мають відмінність від вихідного металу. Стан поверхонь тертя в електролітах, процеси утворення і руйнування на них плівок вторинних структур прийнято характеризувати величиною електродного потенціалу [47]. За даними роботи [47] в лужному середовищі зміна електродного потенціалу, як і об'ємного зносу зразків, пропорційна часу проведення випробувань. В кислому середовищі електродний потенціал не змінюється, але об'ємний знос зразків збільшується зі збільшенням часу проведення експерименту. Таку різницю у зміні електродних потенціалів І.В. Васильєв пояснив розчиненням в кислому середовищі поверхневих плівок.

Б.І. Костецький зі співробітниками вважав, що стабілізація значень електродного потенціалу за певних умов тертя свідчить про динамічну рівновагу процесів руйнування і відновлення вторинних структур. Величина електродного потенціалу при терті визначається параметрами

навантаження. Зі збільшенням швидкості ковзання електродний потенціал зразків тертя зменшується до деякого значення, а потім зростає до моменту зриву [31].

Дослідження багатьох вчених, особливо виконані в останні роки, показали, що при терті металів виникають електричні струми, які іноді досягають досить значних величин. При цьому спостерігається різноманітні електронні, термомагнітні, гальваномангнітні і емісійні ефекти, які, можливо, вносять значні зміни в кінетику електрохімічних процесів на деталях м'ясоподрібнювального обладнання, викликаючи той чи інший вид поляризації системи [38, 225].

#### **2.4. Вплив електрохімічних процесів на механічні властивості металів**

При контакті різних металів в електролітах утворюються гальванічні пари, електродні потенціали яких залежать від електрохімічних властивостей металів, середовищ і умов навантаження. Під впливом трибоелектричних ефектів істотно змінюється кінетика електродних процесів, відбувається поляризація вузлів тертя.

Вивчення впливу поляризації на механічні властивості твердих тіл пов'язане з відкриттям П.А. Ребиндером і Е.К. Венстрем електрокапілярного ефекту пониження твердості металів [48]. Було виявлено, що твердість, ступінь пластичної деформації під напруженням і фрикційні властивості металів в електролітах залежать від величини їх електродних потенціалів. Причому, ці параметри набувають екстремального значення при потенціалі нульового заряду  $\phi_{н.з.}$  [40, 126, 194, 223, 230].

Це не так давно відкрите і надзвичайно цікаве явище ще не вийшло з рамок лабораторних досліджень. Ще немає чіткого пояснення впливу кінетики електрохімічних процесів (поляризації) на механічні характеристики поверхневих шарів металів в електролітах, багато що вимагає подальшого вивчення, але розробка способів керування поверхневою міцністю і руйнуванням металів в електролітах представляється перспективним способом підвищення довговічності робочих органів м'ясоподрібнювального устаткування.

#### **2.5. Залежність дислокаційної структури деформованої зони від умов і режимів навантаження поверхонь тертя деталей**

Проблема руйнування твердих тіл знайшла відображення в різних галузях знань - механіці, фізиці твердого тіла, металофізиці,

матеріалознавстві, фізико-хімічній механіці матеріалів, електрохімії, трибоніці. Розвиток її на межі декількох наукових напрямів обумовлений тим, що ця проблема включає макро-, мікро- і субмікроскопічні аспекти механізмів руйнування [82, 228]. Як відмічав І.В.Крагельський, тепер уже не можна складні завдання тертя і зносу деталей обладнання розглядати, не враховуючи фізичних і фізико-хімічних процесів, що відбуваються на атомно-молекулярному рівні в тонкому поверхневому шарі [119]. Тому надзвичайно важливим є вивчення тертя і зношування деталей використанням дислокаційної теорії, що пояснює атомний механізм пластичної деформації, будову границь зерен і блоків мозаїки, процесів дифузії, руйнування та ін. [36, 77, додаток К2].

Б.І.Костецький з співробітниками показав особливості зміни структури поверхневого шару металів при терті у присутності ПАР, роль структури і орієнтації монокристалів у формуванні процесу зовнішнього тертя [116], взаємозв'язок процесів руйнування металів з типами їх кристалічних ґраток [117], а також розробив дислокаційну модель процесів захоплення і окиснення металів при терті [118]. Вплив реверсу при терті ковзання на субмікроструктуру робочої поверхні присвячена робота В.Д.Євдокимова [81]. В той же час, результат дослідження деформацій і руйнування металу при терті ковзанні в мікрооб'ємі і на атомно-молекулярному рівні ще не може пояснити багато явищ і в цій області йде накопичення експериментальних даних. Так, при КМЗ металів не вивчений вплив на дислокаційну структуру деформованої зони хімічного складу і рН активних рідких середовищ, властивостей металів, типу їх кристалічних ґраток і напружень в них, режимів електрохімічної поляризації, величини і характеристик струму, що пропускається через фрикційний контакт, умов навантаження спряжених поверхонь та ін. [223, 228].

Фізико-електрохімічна механіка фрикційного контакту деталей МО і технологічних середовищ на сучасному етапі майже не розкрита.

## **2.6. Захист робочих органів м'ясоподрібнювальних машин від спрацювання**

При рішенні питання збільшення довговічності деталей, які працюють в умовах впливу на них корозійно активних середовищ (КАС), значних швидкостей, навантажень і температур все більшого значення набуває пошук нових методів і прийомів захисту деталей від руйнування. КМЗ являє собою складний багатофакторний процес основна роль у якому відводиться властивостям утворюваних на поверхнях металу

захисних плівок: їх міцності, адгезії, захисних властивостей тощо. В ряді робіт [50, 119] показано, що зносостійкість металів в хімічних і корозійно-активних середовищах визначається в основному їх корозійною стійкістю, обумовленою характером та інтенсивністю протікаючих на поверхнях тертя хімічних (електрохімічних) процесів і швидкістю утворення продуктів корозії. В той же час, важко передбачити поведінку матеріалу при терті в агресивних середовищах за даними, отриманими при дослідженні корозійної стійкості матеріалу без тертя. Використання раціональних матеріалів і захисних покриттів, які характеризуються високою зносостійкістю в середовищах м'ясного виробництва, ускладнюється через відсутність належної кількості достовірних даних.

При правильному виборі, наприклад, дифузійних покриттів термін служби деталей обладнання м'ясо-молочної промисловості збільшується в 5...8 разів [154].

В процесі тертя ковзання деталей може відбуватися крихке, в'язке і втомне руйнування спряжених поверхонь, яке залежить від величини і градієнта деформації по глибині металу і розподілу її між пружною і пластичною складовою. Величина останньої, в свою чергу, залежить від жорсткості фрикційного контакту, властивостей поверхневих шарів металів і плівок вторинних структур, густини локальних концентраторів напружень у вигляді корозійних руйнувань поверхонь. Іншими словами, зносостійкість металів в активних рідких середовищах галузі залежить не тільки від їх складу і структури, але і від електрохімічних властивостей контактних гальванічних пар вузлів тертя [179].

Багаточисельними експериментами вітчизняних і зарубіжних вчених встановлений вплив термічної, хіміко-термічної та інших видів зміцнювальної обробки металів на їх корозійну стійкість, корозійно-втомлювальну міцність і корозійне розтріскування в корозійно-активних середовищах [23, 84]. Однак, виконано дуже мало досліджень, спрямованих на вивчення впливу вказаних режимів обробки металів на їх зносостійкість в корозійно-активних середовищах м'ясопереробної галузі.

Немає єдиної думки про вплив величини напружень на електрохімічну гетерогенність металів в середовищах-електролітах. На думку Карпенка Г.В. [94] деформація не підсилює загальну корозію, а збільшує електрохімічну неоднорідність металу, причому на цей процес впливає знак діючих напружень. Ю.Р. Эванс [266] встановив, що в 0,1 н розчині хлористого натрію розтягуючі напруження зміщують значення електродного потенціалу в катодну область, а стискаючі – викликають



його облагороджування. У відповідності з роботою [266] збільшення напружень в металі в межах пружних деформацій призводить до лінійної зміни його електрохімічного потенціалу. За даними Е.М. Гутмана [71] пружна деформація не впливає на активність металу, а пластична – може прискорити його взаємодію з середовищем на декілька порядків. Тієї ж думки притримується Романов В.В. [199], який вважає, що напруження, при яких виникають пружні деформації, не викликають суттєвого зниження благородності потенціалу. Це можливо тільки в області дії пластичних деформацій.

Інша точка зору приведена в роботах [86, 87]. На думку авторів знак і величина відхилення електродного потенціалу зразків при прикладанні до них розтягуючих напружень визначається типом адсорбованого іона на знову утвореній ювенільній поверхні металу. Час існування цього відхилення залежить від міцності утворених зв'язків.

Основними чинниками, що визначають вид зношування, є середовище, в якому працює деталь, динаміка і кінематика відносного переміщення взаємодіючих тіл, характер контакту і властивості матеріалу зношеної деталі. Вони характеризують зовнішні умови експлуатації деталей машин, визначають якість і кількісну сторону явищ.

Якість виконуваної роботи м'ясоподрібнювальним інструментом залежить від комплексу параметрів, які поділяються на наступні категорії:

- форма, кінематика, стан і геометричні параметри різальних крайок інструментів;
- фізико-хімічні властивості подрібнюваного продукту;
- експлуатаційні умови роботи: зазор між ножами і ґратками, зусилля взаємного притиснення різальних деталей, частота обертання ножів.

Зазвичай результати зношування робочих м'ясоподрібнювальних органів машин оцінюються вимірами зносу, які поділяються на характеристики службові і матеріальні [178].

До службових характеристик зносу відносяться показники, що характеризують якість технологічного процесу. Для вовчків, наприклад, основними службовими показниками можуть бути однорідність фракційного складу фаршу та його вологовміст.

Найбільш вживаними матеріальними характеристиками зносу можуть бути товщина різальної крайки леза і форма його поперечного перерізу, форма контуру по довжині зуба леза ножа та кут різальної крайки леза.

Істотний вклад в дослідження процесу зношування ножів м'ясоподрібнювальних машин з метою підвищення їх довговічності внесли Г.О.Прейс, О.І.Некоз, В. К.Кукшин [123, 121].

У роботі [178] автори підкреслюють, що навіть при дуже ретельному заточуванні будь-якого різального інструменту відбувається округлення різального леза, що впливає на його роботу. Ці висновки підтверджують дані А.А. Івашко, згідно яких від мікрогеометричних параметрів леза прямо залежать різальні властивості ножів [88]. Враховуючи це, автори роботи [178] показали, що зі збільшенням радіуса заокруглення леза значно зменшується кількість м'ясного соку у фарші, що погіршує його якість (рис. 2.1).

Тому товщина різальних крайок лез хрестоподібних ножів є одним з найважливіших параметрів, що визначають якість роботи вовчків. Ножі, що мають кут заточування 60, 75, 90 градусів при роботі мали різний радіус заокруглення. Чим більший кут заточування, тим більший радіус округлення леза (рис. 2.2).

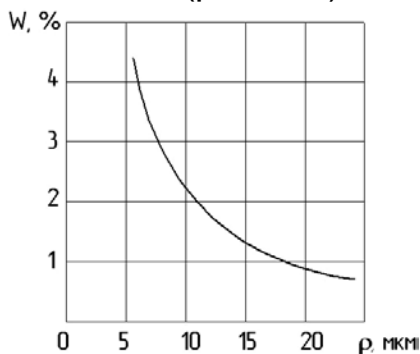


Рис. 2.1 – Залежність відносного вологовмісту фаршу  $W$  від радіуса округлення різальної крайки леза  $\rho$

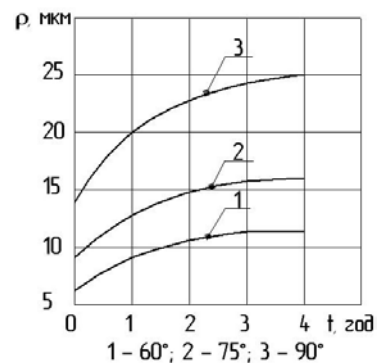


Рис. 2.2 – Залежність радіуса округлення різальної крайки леза  $\rho$  від часу роботи  $t$  при різних кутах заточування

З графіка (рис. 2.2) видно, що впродовж двох-трьох годин роботи ножів зміна радіуса округлення практично підкоряється прямолінійній залежності, а далі зростання затуплення сповільнюється і радіус округлення прагне до деякої постійної величини [122]. На останній ділянці відбувається порушення нормальної роботи вовчків, а тому такий стан лез ножів автори вважають граничним за якого потрібно виконувати заміну різальних органів.

У роботі [121] автори пропонують для підвищення зносостійкості подрібнювальних органів вовчків гратки виготовляти із сталі У8А твердістю 56-62 HRC<sub>e</sub>, а ножі зі змінними лезами з різних матеріалів –

У8А, Р18, 9ХС, ШХ15, Х12М, 40Х13 – тих які мали високі показники при лабораторних випробуваннях у модельному м'ясному середовищі. Отримані результати виробничих випробувань ножів зі вставками з різних сталей. Найбільш зносостійкими були вставки із сталі Р18, але знос ґраток у цьому випадку був більш інтенсивнішим, ніж знос ґраток працюючих в парі з ножами, в яких змінні вставки були виготовлені з інших сталей. Це пояснено тим, що карбіди, що містяться в сталі Р18, при викришуванні в процесі роботи інтенсивно зношують ґратки.

Сталям 9ХС і ШХ15 притаманна висока зносостійкість, добрі різальні властивості і невелика схильність до викришування лез. Значно меншу зносостійкість мали змінні вставки із сталей ХВГ і Х12М, причому пропорційно ножем інтенсивно зношувалися і ґратки.

Найменш зносостійкими виявилися змінні вставки із цементованої сталі 20, а також сталей У8А і 40Х13.

На підставі проведених випробувань автори рекомендують змінні вставки або цілісні ножі виготовляти із сталі 9ХС або ШХ15. Ці сталі у м'ясному середовищі мають високу зносостійкість, технологічні, не дефіцитні. Вони в 3-4,5 рази за зносостійкістю перевершують ножі із сталі У8А [177].

Основні вимоги до різального інструменту сформульовані в ГОСТ 28533-90, де обумовлені його типи, основні розміри, а також твердість ґратки і ножа, що становить відповідно до 61 і 52 НRC<sub>e</sub>. Термін безперервної роботи до перезаточки має бути не меншим 24 год. Проте залишається не зрозумілим, спосіб досягнення цих показників стандарту, тому що відсутні рекомендації по використанню конкретних марок сталей і технологій виготовлення різальних інструментів.

Причиною виходу з ладу різальних інструментів (більше як 80% випадків) є не їх поломка, а поверхнєве руйнування [152]. Тому, підвищення зносостійкості робочих поверхонь різальних інструментів є основним способом збільшення їхньої працездатності. Поверхнєві покриття, наприклад, у загальному машинобудуванні дозволяють підвищити довговічність різальних інструментів в 2 - 10 разів [148].

Зношування різального інструменту, як правило, обумовлене, окрім подолання фізико-хімічних і механічних зв'язків, механічних зчеплень, що визначають коефіцієнт тертя, сильним об'ємним пружно-пластичним процесом деформування, що призводить до виникнення мікротріщин. Мікротріщини поширюються під дією поля напружень і обумовлені як накопиченням дислокацій, так і зовнішнім джерелом - тертям, що створює частки процесу зношування. При цьому важлива роль

локальних поверхневих деформацій, а також наявність локалізованого в малих об'ємах неоднорідного напруженого стану. Відома модель зношування від втоми з встановленням подібності дислокаційних структур, які виникають при втомному руйнуванні і при зношуванні. Звідси зроблено висновок про можливість використання дислокаційних моделей втомного руйнування і до явищ зношування [197].

Відомі класифікації видів зношування [197], які розділяють його на дві великі групи, об'єднані загальними ознаками (рис. 2.3). Визначають чотири основні види зношування різального інструменту: адгезійний, дифузійний, абразивний, втомний [161]. Наявність протікання того чи іншого виду зношування залежить від режиму різання, марок інструментальних і характеристик оброблюваних матеріалів [29].

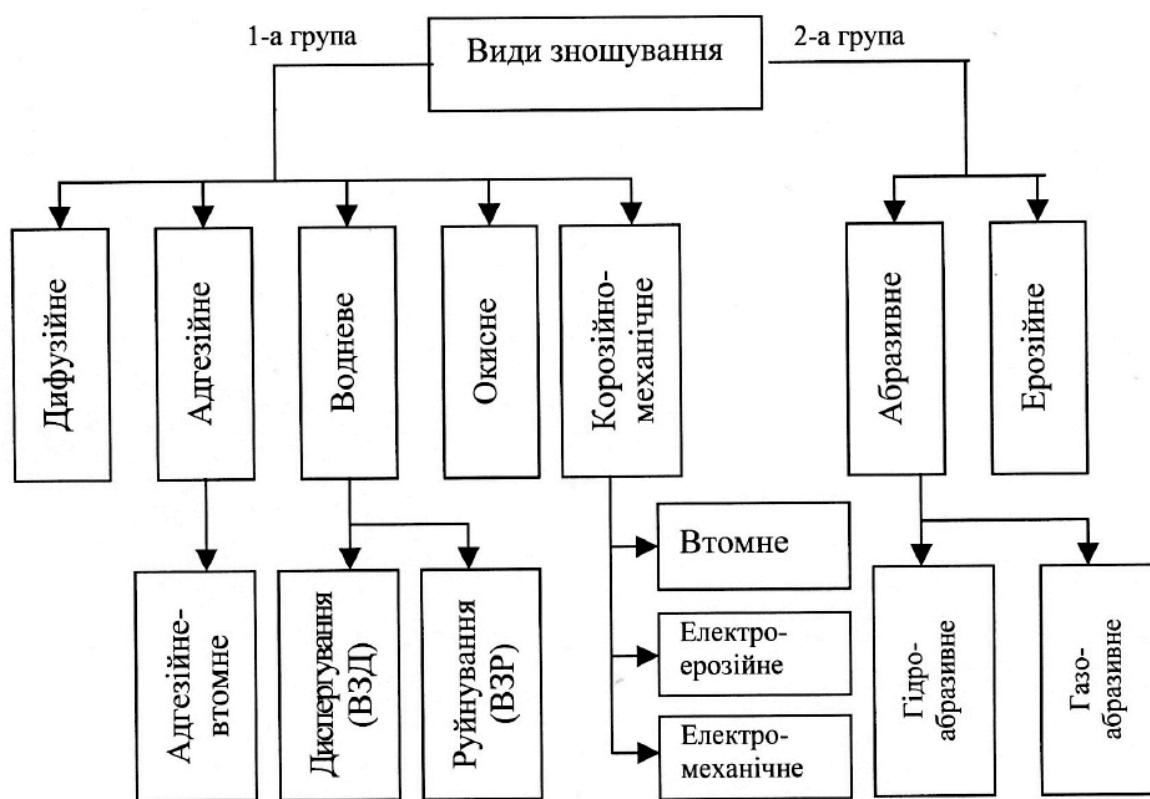


Рис. 2.3 – Види зношування

Досвід експлуатації м'ясорізальних інструментів показує, що саме інструментальні матеріали мають обмежене використання в галузі, хоча за рядом фізико-механічних властивостей повинні були б отримати більш широке поширення [155]. Тому обробка м'яса різанням супроводжується технологічними проблемами, пов'язаними з необхідністю зниження рівня режимів обробки, значним зменшенням стійкості інструментів, збільшенням динамічного і термічного навантаження на м'ясопродукти. В сукупності це призводить до різкого зниження продуктивності м'ясопереробки та робить проблемним

досягнення високого рівня якості продукції. Одним із шляхів вирішення зазначених проблем є застосування інструментальних матеріалів з високим рівнем різальних властивостей. Засоби оцінки силової взаємодії різальних інструментів з м'ясопродуктами подані у додатку К3, а метод дослідження напружено-деформованого стану біополімерів м'яса у додатку К4.

В останні роки з'явилась широка гамма нових інструментальних матеріалів [155]. Так, поряд з класичними швидкорізальними сталями, твердими сплавами і оксидною керамікою, все ширше розповсюджуються швидкорізальні сталі, які одержують методами порошкової металургії, тверді сплави з дрібнокристалічною структурою, різальна кераміка, надтверді полікристалічні матеріали з щільних модифікацій нітриду бору та синтетичного алмазу.

При створенні нових інструментальних матеріалів для подрібнення м'яса з метою поліпшення їх різальних властивостей бажано мати такі властивості, як твердість і зносостійкість алмазу, хімічну стабільність мінералокераміки і питому в'язкість швидкорізальної сталі [156].

Поряд з цим необхідна висока теплопровідність і низька чутливість до перепаду температур. Доки такий матеріал ще не створений, одним з перспективних шляхів підвищення стійкості різальних інструментів є застосування зміцнювальних покриттів [29, 234].

Шляхами підвищення стійкості різального інструменту є як традиційні методи: використання раціональних режимів різання, вибір оптимальної конструкції різальних частин інструментів, так і використання нових інструментальних матеріалів та застосування способів зміцнювальної обробки, в тому числі використання зносостійких покриттів (рис. 2.4).

Для виготовлення різальних інструментів м'ясопереробних машин, в силу різних причин широко використовуються сталі, що характеризуються низькою зносостійкістю і підвищеною корозійною активністю, а ножі впродовж трьох-чотирьох змін гранично затупляються і вимагають капітального ремонту. Тому різальний інструмент економічно доцільно відновлювати або зміцнювати зносостійкими покриттями, стверджують автори роботи [52]. Для підвищення довговічності деталей використовуються сучасні методи відновлення, зварювання, наплавлення, газотермічне напилення, термічна і хіміко-термічна обробка, гальванічні і хімічні покриття, лазерні зміцнення [73, 74].

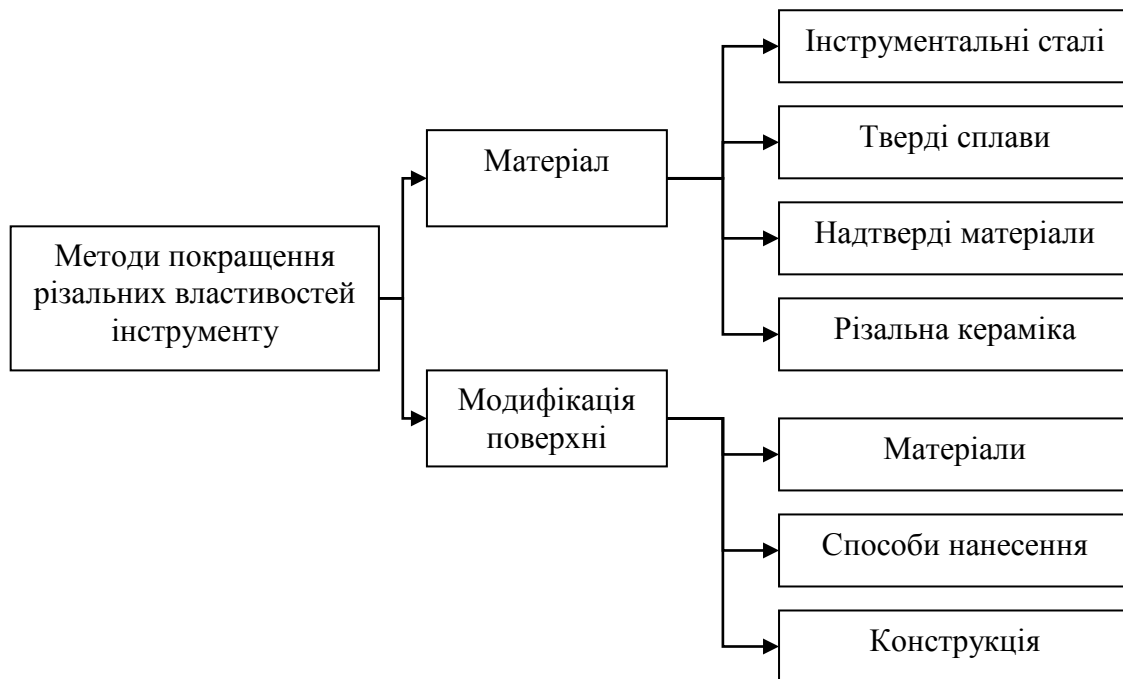


Рис. 2.4 – Методи покращення різальних властивостей інструментів

Прикладом ефективного використання електродугового наплавлення є технологія відновлення хрестових ножів вовчків зносостійкими електродами ЭН-60М і ОЗШ-3. Застосування наплавлення дозволяє підвищити довговічність хрестових ножів в 3,5 - 4 рази поліпшити їх різальні властивості і збільшити продуктивність вовчків на 20-25 % при зниженні енерговитрат на 18-20% [262].

Перспективним є спосіб наплавлення пластинчастим електродом. Спосіб простий, не вимагає спеціального устаткування дозволяє легко керувати властивостями і складом наплавленого металу за рахунок легування через електрод, а також через керамічні флюси або легуючу порошкову шихту визначеного складу [204].

Перспективними способами зміцнення деталей вовчків і кутерів є нанесення порошкоподібних твердих сплавів, оксидів, карбідів, боридів, оксидів кераміки [52].

Широке поширення отримало детонаційне напилення захисних покриттів. Ці методи широко використовуються в США такими фірмами як Atlantic Sow Co і Tiger Ran для зміцнення інструментів карбідом титану [54].

Останніми роками успішно розвивається нанесення зносостійких покриттів іонно-плазмовим методом, що дозволяє отримати товщину покриття 0,05-0,1 мм при високій твердості HV 2600-2800 [54].

Для зміцнення різальних деталей окремі автори застосовують електроіскрове зміцнення на установках Елітрон і ЭФИ. При цьому

використовуються електроди з твердих сплавів ВК-6, Т15К6, сормайту. Товщина покриття складає 0,05-0,3 мм [104].

На деяких м'ясокомбінатах для підвищення твердості ножів м'ясопереробних машин до 58-60 HRC<sub>e</sub> випробовували лазерне термозміцнення. Застосування цього способу в декілька разів підвищує працездатність різальних інструментів [105]. Проте спосіб дуже дорогий і трудомісткий, а його застосування навряд чи буде економічно доцільним.

Дослідженнями, проведеними Л.Ф.Колисниченко, Т.В.Чижиковою, Е.Н.Сбитневою, встановлені ефективні заходи, що підвищують працездатність різальних інструментів в 4 - 5 разів методом хромування і однофазного борування [262]. Використання хіміко-термічних способів зміцнення дозволило отримати часткове самозаточування інструментів.

Для підвищення довговічності різального інструменту м'ясопереробних машин розроблена технологія магніто-імпульсної обробки. Сутність технології полягає в тому, що деталі обробляються в полі соленоїда магнітним полем. Потім деталі витримують на неметалевих стелажах для завершення внутрішніх перетворень в матеріалах деталей. Застосування магніто-імпульсного зміцнення інструментів дозволило підвищити їх стійкість на 18-24% [55].

Найбільш широкого поширення набувають технології напилення і наплавлення. Дуже важливою обставиною, що впливає на розвиток цього напрямку являється наявність стандартного устаткування, наплавлювальних матеріалів що випускаються промисловістю [137, 221].

Є спроби для відновлення і зміцнення деталей м'ясоподрібнювальних машин використовувати і інші прогресивні способи, наприклад, електроіскрове нарощування, яке застосовується в основному для зміцнення робочих поверхонь кутерних, дискових і хрестоподібних ножів вовчків [21].

## **Висновки до розділу 2**

1. Низька зносостійкість основних робочих органів технологічного м'ясоподрібнювального обладнання призводить до зменшення його продуктивності і надійності та зниження якості фаршу, тому задача підвищення опору спрацюванню деталей м'ясоподрібнювального обладнання є досить актуальною.
2. Довговічність м'ясоподрібнювального обладнання переважно визначається специфікою взаємодії поверхонь тертя деталей в

умовах взаємодії з КАС галузі, які мають широкий діапазон фізико-хімічних властивостей.

3. Огляд наявних досліджень переконливо свідчить про відсутність чітких уявлень про вплив природи і структури металів на їх деформацію і руйнування в КАС галузі.
4. КМЗ металів і захисних покриттів в технологічних середовищах м'ясоподрібнюючих виробництв – це складний комплекс механічних, фізичних, електрохімічних та інших процесів, які супроводжують деформацію і руйнування поверхонь тертя. Механізм цих процесів недостатньо вивчений.
5. Майже відсутні дані результатів експериментальних досліджень на атомно-молекулярному рівні КМЗ металів в технологічних середовищах галузі: залежності дислокаційної структури деформованої зони від природи активного середовища, властивостей металів, величини і характеру напружень в них, умов навантаження спряжених поверхонь, трибоелектричних ефектів, режимів електрохімічної поляризації тощо.
6. Не розроблена проста і надійна методика дослідження корозійно-механічного зношування металів в корозійно-активних середовищах м'ясопереробної галузі, а відомі методи дослідження зношування металів в діелектричних середовищах для цього мало придатні.
7. Відсутні конкретні дані, необхідні для використання методу електрохімічної поляризації для управління тертям і зношуванням м'ясорізальних інструментів та інших робочих органів м'ясоподрібнювальних машин.
8. Важливу інформацію про процес КМЗ несе електродний потенціал  $\phi$  зношеної поверхні. Однак, фундаментальні дослідження впливу різних чинників на електрохімічні процеси на межі метал-технологічне середовище при зношуванні (утворенні ювенільних поверхонь) в середовищах галузі практично не проводилось.
9. Недостатньо даних про зносостійкість різних сталей і захисних покриттів в технологічних середовищах м'ясопереробної галузі.
10. Окремі відомості про доцільність використання методів зміцнюючої обробки робочих органів м'ясоподрібнювальних машин вимагають подальшого уточнення.



## **РОЗДІЛ 3. ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА ПОДРІБНЕННЯ М'ЯСА, РЕОЛОГІЯ ФАРШІВ І ЯКІСТЬ ВИРОБІВ**

### **3.1. Подрібнення сировини різного хімічного складу для сирокочених ковбас**

При виробництві ковбас використовують середнє і тонке подрібнення, яке розділяє попередньо розрізану на шматки м'ясну сировину на більш дисперсні частинки з перетворенням її у гомогенну масу з певними значеннями структурно-механічних характеристик (СМХ). Основний робочий орган подрібнювача – це комплект багатозубих ножів з ґратками при середньому подрібненні м'ясної сировини, наприклад, у вовчках, або ножів серповидної форми із прямолінійними чи криволінійними лезами при тонкому подрібненні м'ясної сировини, наприклад, у кутерах.

Загальна енергія, що споживається при подрібненні м'яса у вовчках і кутерах, витрачається на утворення нових поверхонь поділу частинок і на тертя та об'ємні деформації [112]. Тільки перша частина енергії, що витрачається на диспергування продукту є корисною, а її інша частина незворотно втрачається. Співвідношення цих частин енергії залежить від фізико-механічних і, в першу чергу, від структурно-механічних властивостей подрібнюваної м'ясної сировини. Корисна складова енергії при подрібненні м'яса складає, в середньому, всього 20% від загальної затраченої [80]. Тому дослідження процесу подрібнення м'ясної сировини різного виду, ґатунку та хімічного складу дасть можливість розрахувати оптимальні режими роботи обладнання для подрібнення, контролювати якість фаршу в процесі приготування та автоматизувати процес.

Проблемі отримання якісного фаршу присвячені роботи [80, 103, 111, 171, 206]. Разом з тим, в цих роботах не повністю досліджений вплив хімічного складу м'ясної сировини на СМХ фаршу, зокрема, для сирокочених ковбас. Відсутні також рекомендації щодо термінів обробки сировини на подрібнювальних машинах різної продуктивності.

#### **3.1.1. Діслідження впливу хімічного складу сировини на структурно-механічні характеристики фаршу, подрібненого у вовчку**

Аналізуючи рецептури сирокочених ковбас (Брауншвейзька, Московська, Невська та ін.), які виробляються вітчизняними м'ясопереробними підприємствами, прийшли до висновку, що в них, в основному, використовуються яловичина вищого і першого ґатунку, а

також нежирна свинина, які були вибрані за об'єкти досліджень (додаток Л).

Хімічний склад сировини, реологічні та органолептичні характеристики м'ясопродуктів визначали стандартними методами (додаток М). В кожному зразку визначали кількість вологи  $W$ , білка  $B$ , жиру  $\varphi$ , золи  $Зл$  і вологовміст  $U$  м'ясної сировини (вміст вологи на 1 кг абсолютно сухої речовини). Середні значення цих параметрів подані у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристика дозрілої м'ясної сировини, подрібненої у вовчку К6-ФВЗП-200 з діаметрами отворів у ґратці 3 мм

Вид	Характеристика фаршу														
	$W, \%$	$U, \text{кг/кг}$	$\varphi, \%$	$B, \%$	$Зл, \%$	$K_x$	$h \cdot 10^{-3}, \text{м}$	$\theta^{e_0}, \text{Па}$	$\theta^{e_{od}}, \text{Па}$	$\Delta, \%$	$h \cdot 10^{-3}, \text{м}$	$\theta^{e_0}, \text{Па}$	$\theta^{e_{od}}, \text{Па}$	$\Delta, \%$	
Яловичина в/г	1	75,2	3,03	2,0	19,4	3,4	3,0	217	1699	1711	0,7	375	2098	2050	2,3
	2	75,4	3,07	1,8	19,3	3,5	3,5	217	1699	1683	1,0	384	2000	2014	0,7
	3	75,6	3,10	1,4	19,5	3,5	4,5	221	1638	1644	0,4	389	1949	1967	0,9
	4	75,8	3,13	1,5	19,1	3,6	4,07	219	1668	1658	0,6	384	2000	1900	0,8
	5	76,0	3,17	1,3	19,0	3,7	4,6	221	1638	1641	0,2	389	1949	1949	0,7
	6	76,0	3,17	1,0	19,2	3,8	6,1	222	1623	1609	0,9	394	1900	1900	1,2
	7	76,2	3,2	0,8	19,2	3,8	7,5	224	1594	1590	0,3	399	1853	1853	2,5
Яловичина 1г	1	72,8	2,68	4,6	18,4	4,2	1,49	205	1904	1915	0,6	358	2302	2303	0,0
	2	73,2	2,73	4,0	18,7	4,1	1,71	208	1849	1863	0,8	366	2200	2238	1,7
	3	73,8	2,82	3,6	18,5	4,1	1,60	205	1904	1888	0,9	362	2250	2269	0,8
	4	74,2	2,88	3,0	18,8	4,0	2,18	211	1797	1791	0,4	370	2150	2144	0,3
	5	74,8	2,97	2,6	18,7	3,9	2,42	214	1747	1760	0,8	375	2098	2110	0,6
	6	75,0	3,00	2,5	18,2	4,3	2,43	214	1747	1758	0,6	375	2098	2108	0,5
Свинина н/ж	1	69,8	2,31	9,3	17,3	3,6	0,81	191	2193	2256	2,9	330	2709	2726	0,6
	2	71,5	2,51	6,1	18,6	3,8	1,21	200	2000	2009	0,5	350	2408	2420	0,5
	3	70,5	2,39	8,5	17,3	3,7	0,85	191	2193	2220	1,3	330	2709	2682	1,0
	4	72,5	2,64	5,9	17,9	3,7	1,15	200	2000	2035	1,8	347	2450	2452	0,1
	5	73,2	2,73	5,6	17,4	3,8	1,14	198	2040	2040	0,0	347	2450	2458	0,3
	6	74,0	2,85	4,0	18,1	3,9	1,59	205	1904	1890	0,8	358	2302	2272	1,3

З реологічних характеристик вибрана найбільш чутлива до змін хімічного складу подрібненої м'ясної сировини – граничне напруження зсуву ( $\text{ГНЗ}$ ), яке визначалось з використанням статичного (ПМДП) і динамічного (ППМ-4М) пенетрометрів. Таким чином, статичне граничне напруження зсуву ( $\theta_0$ ) визначали на пенетрометрі ПМДМ, а динамічне ( $\theta_{od}$ ) – на ППМ-4М. Для пенетрометра ПМДП використовували конічний

індикатор з кутом при вершині  $60^\circ$  і константою 2,1 Н/кг, а для ППМ-4М -  $30^\circ$  з константою 5,9 Н/кг.

Статистичний банк усереднених хімічних і реологічних характеристик подрібненої сировини по мірі збільшення вмісту вологи у зразках поданий у табл. 3.1.

Очевидно, що коливання вмісту вологи у яловичині вищого ґатунку складають всього 1,0%, жиру – від 0,8 до 2%; білка - усього 0,5%; золи – від 3,4 до 3,8. Помічено, що зі зменшенням вмісту жиру та зі збільшенням вологості сировини вміст золи в ній збільшується.

У яловичині I ґатунку вологість коливається у більш значних межах (від 72,8 до 75%), жирність змінюється від 2,5 до 4,6%, вміст білка – від 18,2 до 18,8%, а золи – від 3,9 до 4,3%.

У свинини нежирної вологість коливається від 69,8 до 74%, жирність – від 4,0 до 9,3%, вміст білка – від 17,3 до 18,6%, а золи – від 3,6 до 3,9 %.

Колівання вмісту золи у яловичині вищого ґатунку і у свинині нежирній лежать в одних межах (від 3,4 до 3,9%). В середньому її вміст складає 3,7%. У яловичині I ґатунку вміст золи дещо вищий, ніж у яловичині вищого ґатунку та свинині нежирній за рахунок більшої кількості з'єднувальної тканини і, в середньому, складає 4,1%. Загалом для розглянутої м'ясної сировини вміст золи можна прийняти в межах  $3,8 \div 3,9\%$ .

Прийнявши у яловичині вищого ґатунку за середнє значення вмісту жиру рівне 1,4% ( $0,8 \div 2,0$ ), білка 19,24% ( $19,0 \div 19,5$ ) і золи 3,6% ( $3,4 \div 3,8$ ), розглянемо зміну статичного  $\theta_0$  і динамічного  $\theta_{oo}$  граничного напруження зсуву фаршу, подрібненого на вовчку з діаметром отворів у ґратці 3 мм, в залежності від вологості. Ці ж параметри розглянемо для яловичини I ґатунку і свинини нежирної (рис. 3.1, а).

Очевидний взаємозв'язок між граничним напруженням зсуву (ГНЗ) і вологістю сировини, який не залежить від її виду і ґатунку та може бути апроксимований прямою:

$$\theta_0 \text{ чи } \theta_{oo} = A(1 - a \cdot w), \quad (3.1)$$

де  $A$  і  $a$  - емпіричні коефіцієнти,  $w$  - вологість сировини в долях одиниць.

Величина ГНЗ дорівнює нулю при

$$a \cdot W_{кр} = 1, \quad (3.2)$$

де  $a$  - коефіцієнт, який побічно характеризує темп зменшення величини ГНЗ від збільшення вологості, причому  $W_{\hat{\sigma}}$  - істинне значенням темпу зміни, що дорівнює тангенсу кута нахилу прямої (1)

Для статичного ГНЗ:  $A=9500$ ;  $a=1,08$

Для динамічного ГНЗ:  $A=11800$ ;  $a=1,1$ , тоді:

$$\theta_o = 9150(1 - 1,08 \cdot W); W_{кр} = 0,926 \quad (3.3)$$

$$\theta_{od} = 11800(1 - 1,1 \cdot W); W_{кр} = 0,926 \quad (3.4)$$

Структурно-механічні характеристики сировини залежать від хімічного складу, зокрема від вмісту білка, жиру, вологи. Для того щоб комплексно урахувати увесь хімічний склад м'ясної сировини скористаємось критерієм хімічного складу, запропонованим Сюткіним С.В. [110]:

$$K_x = B/\varphi \cdot U, \quad (3.5)$$

де  $B$  і  $\varphi$  - вміст, відповідно, білка і жиру в 1 кг сировини, дол.од;

$U$  - вологовміст сировини (кількість вологи, що приходить на 1 кг абсолютно сухої речовини, яка включає в себе і золу), дол.од.

Графічна залежність зміни статичного і динамічного ГНЗ сировини від критерію хімічного складу  $\hat{E}_{\sigma}$  подана на рис. 3.1,б.

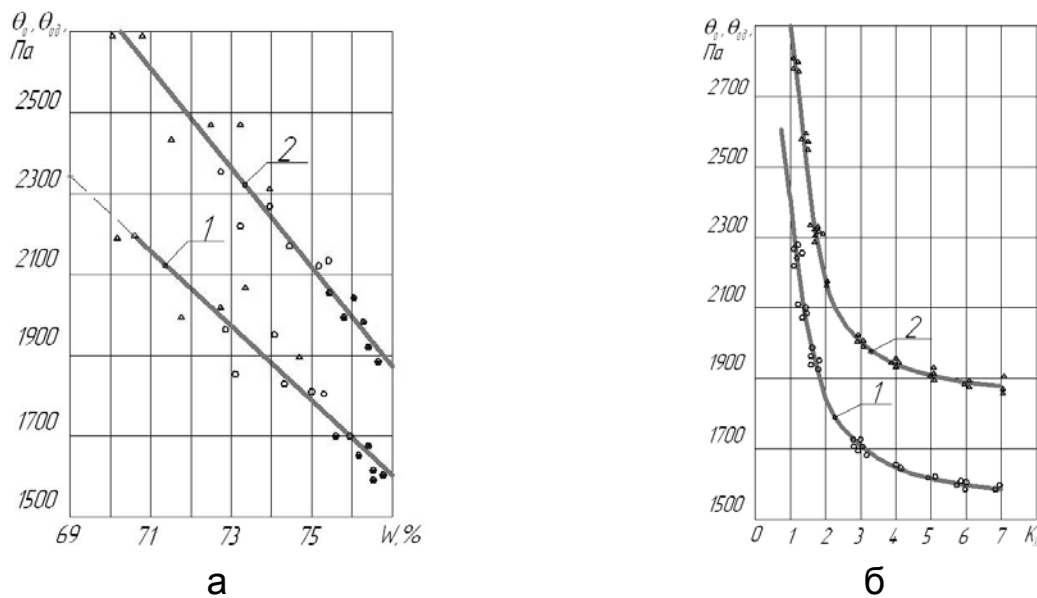


Рис. 3.1 – Залежності статичного  $\theta_o$  (1) і динамічного  $\theta_{ia}$  (2) граничного напруження зсуву фаршу, подрібненого у вовчку з діаметром отворів у ґратці  $d_{отв}=3$  мм, від його вологості  $W$  (а) і критерію хімічного складу  $\hat{E}_{\sigma}$  (б): • - яловичина в/г; ○ - яловичина 1 г; Δ - нежирна свинина

Математична обробка цієї залежності дозволила отримати наступне рівняння:

$$\theta_0 \text{ чи } \theta_0 = A(a + K_X^{-1}), \quad (3.6)$$

де  $A$  і  $a$  - емпіричні коефіцієнти.

Для статичного ГНЗ:  $A = 604$ ;  $a = 2,5$

Для динамічного ГНЗ:  $A = 750$ ;  $a = 2,4$

Тоді 
$$\theta_0 = 604(2,5 - K_X^{-1}), \text{ Па} \quad (3.7)$$

$$\theta_0 = 750(2,4 - K_X^{-1}), \text{ Па} \quad (3.8)$$

Похибка у розрахунках за цими залежностями не перевищує  $\pm 2,5\%$ .

### 3.1.2. Дослідження впливу хімічного складу сировини на процес фаршеприготування на лабораторному кутері

Глибина технологічної обробки м'ясної сировини характеризується ступенем її подрібнення, а значить і формою зв'язку вологи, що впливає на СМХ фаршу. Готова сирокочена ковбаса повинна мати максимальну стандартизовану вологість при заданій консистенції (жорсткості), яка оцінюється органолептично або інструментально за реологічними характеристиками.

Термін подрібнення фаршу, безумовно, буде залежати від виду і сорту м'ясної сировини при використанні конкретної машини для тонкого подрібнення.

Кінетика зміни статичного (рис. 3.2,а) і динамічного (рис. 3.2,б) ГНЗ дисперсійного середовища фаршу для різних видів ковбас («Фантазія», «Московська», «Любительська», «Радянська», «Свиняча») від терміну подрібнення на кутері з об'ємом чаші 8 л., частотою обертання ножів  $n_n = 1200 \text{ хв}^{-1}$  і чаші  $n_{ч} = 8 \text{ хв}^{-1}$  дозволяє заключити, що характер зміни статичного  $\theta_0$  і динамічного  $\theta_{од}$  ГНЗ для різних за рецептурою сирокочених ковбас аналогічний.

Екстремальна точка на графіках характеризує кінець утворення первинної структури з мінімальною вологозв'язувальною здатністю і відповідає оптимальним значенням  $\theta_0^{opt}$  і  $\theta_{од}^{opt}$ , визначаючим термін подрібнення фаршу з сировини відповідного виду, ґатунку і хімічного складу.

Для аналітичного узагальнення функції  $\theta_0 = f(\tau_k)$  можна запропонувати наступний вид рівняння:

$$\theta_0 = A\left(1 - \tau_k / \tau_k^{onm}\right)^2 + \theta_0^{onm} \quad (3.9)$$

$$\theta_{od} = A_1\left(1 - \tau_k / \tau_k^{onm}\right)^2 + \theta_{od}^{onm} \quad (3.10)$$

де  $\theta_0, \theta_{od}$  - значення, відповідно, статичного і динамічного ГНЗ дисперсного середовища сирокочених ковбас при терміні кутерування  $\tau_{ki}$ , с;

$A$  - емпіричний коефіцієнт, що залежить від рецептури ковбаси, Па;

$\tau_k$  - заданий термін подрібнення, с

$\tau_k^{onm}$  - оптимальний термін подрібнення, що відповідає оптимальному мінімальному значенню ГНЗ ( $\theta_{od}^{onm}$ , Па).

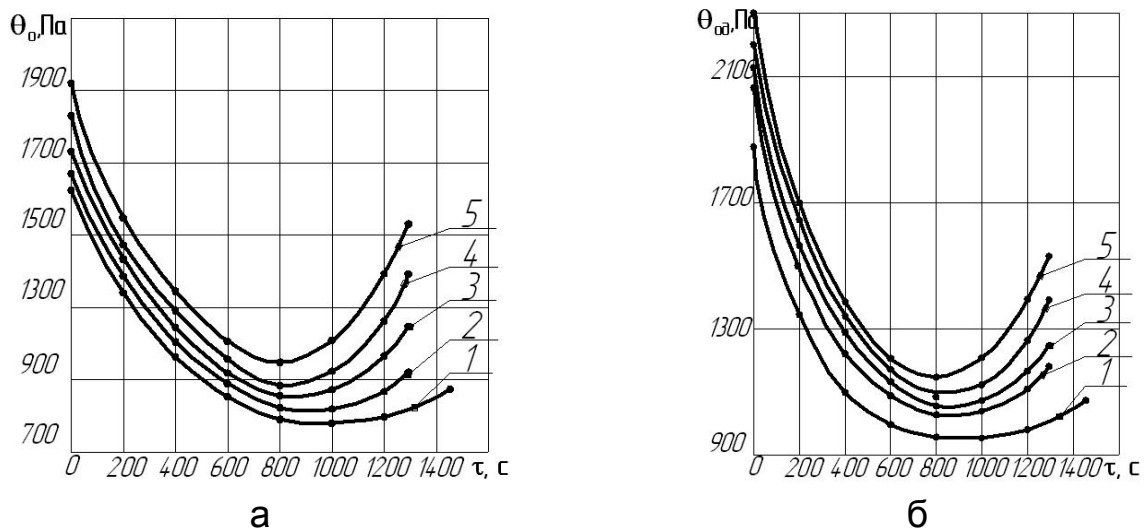


Рис. 3.2 – Кінетика зміни статичного  $\theta_0$  (а) і динамічного  $\theta_{od}$  (б) граничного напруження зсуву від тривалості подрібнення  $\tau$  на кутері дисперсного середовища для фаршу сирокочених ковбас: 1 – Фантазія; 2 – Московська; 3 – Любительська; 4 – Радянська; 5 – Свиняча

Значення коефіцієнтів  $A$  і  $A_1$  і оптимальні значення  $\theta_0$  і  $\theta_{od}$  приведені в табл. 3.2.

Аналогічні дослідження були проведені за різних режимів обробки сировини на кутерах з місткістю чаші 250 і 500 л безпосередньо на виробництві, які показали, що реологічні характеристики ковбас потрібно оцінювати за критерієм хімічного складу, а оптимальну тривалість подрібнення визначати за оптимальними значеннями  $\theta_0$  і  $\theta_{od}$ , постійно контролюючи в процесі виробництва ГНЗ.

Отримані емпіричні рівняння дозволяють розрахувати статичні і динамічні граничні напруження зсуву дисперсійного середовища фаршу

для сирокочених ковбас і, таким чином, спрогнозувати його консистенцію і якість за СМХ та оптимізувати процес подрібнення сировини.

Таблиця 3.2 – Значення коефіцієнтів, оптимальні величини складових рівнянь (3.9) і (3.10) та критерії хімічного складу сирокочених ковбас

Вид ковбаси	$A$ ( $A_p$ )	$A_1$ ( $A_{1p}$ )	$\theta_0^{opt}$ ( $\theta_{op}^{opt}$ )	$\tau_k^{opt}$ ( $\tau_{kp}^{opt}$ )	$\theta_{od}^{opt}$ ( $\theta_{od}^{opt}$ )	$\tau_k^{opt}$ ( $\tau_{kdp}^{opt}$ )	$K_x$
Фантазія	840 (840)	1000 (1017)	780 (783)	1080 (1100)	950 (953)	1080 (1100)	4,79
Московська	880 (878)	1080 (1067)	822 (815)	900 (943)	990 (994)	900 (933)	3,16
Любительська	910 (915)	1120 (1116)	840 (847)	900 (868)	1030 (1034)	900 (862)	2,37
Советская	950 (959)	1180 (1166)	870 (879)	840 (821)	1080 (1075)	840 (821)	1,89
Свиняча	1015 (1013)	1230 (1247)	930 (931)	750 (776)	1130 (1142)	800 (784)	1,42

Математично опрацювавши отриманий графічний матеріал, отримали наступні залежності:

$$\theta_0^{opt}=720+300/K_x=300(2.4+K_x^{-1}) \quad (3.11)$$

$$\theta_{od}^{opt}=874+380/ K_x=380(2.3+ K_x^{-1}) \quad (3.12)$$

$$\tau_k^{opt}=640+96 K_x=640(1+0.15 K_x) \quad (3.13)$$

$$A=767+350/ K_x=350(2.19+ K_x^{-1}) \quad (3.14)$$

$$A_1=920+465/ K_x=465(1.98+ K_x^{-1}) \quad (3.15)$$

Використовуючи ці формули можна оптимізувати процес отримання фаршу для сирокочених ковбас на лабораторному кутері.

### 3.1.3. Дослідження процесу кутерування фаршу на кутері середньої продуктивності

В попередньому підрозділі описані структурно-механічні характеристики м'ясної сировини при приготуванні фаршу для ковбас з різним хімічним складом на лабораторному кутері з місткістю чаші 8 л. У такому кутері процес подрібнення розтягнутий у часі. У виробничих умовах процес тонкого подрібнення значно прискорений. Тому для подальших досліджень вибрали промисловий кутер з місткістю чаші 250

л, який забезпечує підвищену продуктивність. Кількість серповидних ножів збільшилась до 6. Частота обертання ножів складала  $1325 \text{ хв}^{-1}$ , а чаші  $9,1 \text{ хв}^{-1}$ . Експерименти проводили за раніше розглянутою методикою. Результати наведені в табл. Н.1 (додаток Н).

Характер зміни статичного (рис Н.1, додаток Н) і динамічного (рис. Н.2, додаток Н) ГНЗ дисперсного середовища фаршу для різних видів ковбас за різної тривалості подрібнення на виробничому кутері аналогічний результату, отриманому на лабораторному кутері (див. рис. 3.2 а, б), але процес дещо прискорений. Так, наприклад, оптимальна тривалість подрібнення для дисперсного середовища фаршу свинячої ковбаси зменшилася більш ніж у два рази – з 750-800 с до 350-360 с; для ковбаси Фантазія і Московська – з 900-1080 до 500 с; для Любительської і Радянської – з 900-840 до 440-365 с. Критерій хімічного складу навіть для одного виду ковбас змінювався в широких межах. Так, для ковбас Фантазія і Московська, які складаються із яловичини вищого гатунку, критерій хімічного складу складав відповідно, 4,5 і 4,6, тоді як у попередніх дослідженнях - 4,79 і 3,16. Для ковбаси «Радянської» він збільшився від 1,13 до 1,89, а для Свинячої - від 0,81 і до 1,42.

Аналізуючи результати досліджень констатуємо, що оптимальна тривалість подрібнення в першу чергу залежить від хімічного складу дисперсного середовища фаршу, а не від виду сирокоченої ковбаси. Зміна оптимальної тривалості подрібнення і оптимальних значень статичного і динамічного ГНЗ дисперсного середовища фаршу для різних видів сирокочених ковбас з різним хімічним складом подана на рис. 3.3.

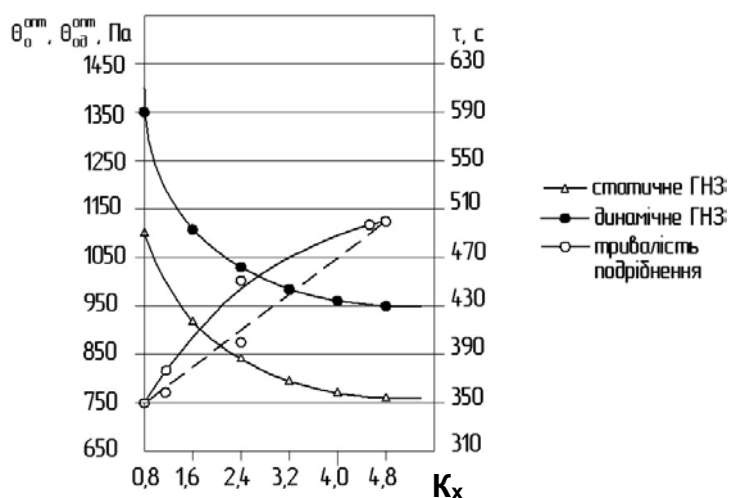


Рис. 3.3. Залежність оптимальних значень статичного і динамічного ГНЗ та тривалості подрібнення від критерію хімічного складу дисперсного середовища фаршу для сирокочених ковбас



Математична обробка графічних залежностей зміни оптимальних статичних і динамічних ГНЗ дисперсного середовища фаршу для різних видів сиркопчених ковбас від їх хімічного складу дозволила отримати наступні залежності:

$$\Theta_0^{\text{опт}}=300(2.4+ K_x^{-1}) \quad (3.16)$$

$$\Theta_{0\text{д}}^{\text{опт}}=375(2.3+ K_x^{-1}) \quad (3.17)$$

Отримані рівняння схожі з раніше отриманими рівняннями, описуючими подрібнення фаршу для сиркопчених ковбас з різним критерієм хімічного складу на лабораторному кутері з місткістю чаші 8 л і зовсім іншими кінематичними параметрами. Рівняння (3.17) відрізняється від аналогічного рівняння (3.12) лише першим коефіцієнтом, який в обох випадках дуже близький за абсолютною величиною (375 і 380).

Оптимальна тривалість подрібнення, в залежності від критерію хімічного складу дисперсного середовища фаршу для різних видів сиркопчених ковбас, змінюється за експоненційним законом і може бути описана наступною формулою:

$$\tau_k^{\text{опт}}=325 \exp(0.1K_x), \text{ с} \quad (3.18)$$

Рівняння (3.18) відрізняється від аналогічного рівняння, отриманого при подрібненні дисперсного середовища фаршу на лабораторному кутері, яке апроксимовано в вигляді прямої (рівняння (3.18)). Разом з тим, апроксимувати рівняння (3.18) можна також в вигляді прямолінійної залежності:

$$\tau_k^{\text{опт}}=38.8(8.35+K_x), \text{ с} \quad (3.19)$$

При цьому похибка розрахунку за рівнянням (3.19) не перевищить  $\pm 5\%$ .

Експериментальні і розрахункові оптимальні значення статичного і динамічного ГНЗ, тривалості подрібнення та похибки розрахунку подані у табл. 3.3.

Із аналізу отриманих аналітичних залежностей можна зробити висновок, що оптимальні значення статичного і динамічного ГНЗ дисперсного середовища дисперсного середовища фаршу'ясного фаршу частково залежать від виду ковбаси, але, у більшій мірі, від її хімічного складу, який оцінюється відповідним критерієм і практично не залежить від продуктивності використаного кутера. Оптимальна ж тривалість подрібнення дисперсного середовища фаршу сиркопчених ковбас значно залежить від виду кутера, що використовується, його

геометричних і кінематичних параметрів. Для двох моделей досліджених кутерів оптимальна тривалість подрібнення відрізняється більше ніж в 2 рази.

Таблиця 3.3 – Експериментальні і розрахункові оптимальні значення статичного і динамічного ГНЗ і тривалості подрібнення дисперсного середовища фаршу сиркопчених ковбас на кутері середньої продуктивності

Вид ковбаси	Характеристика фаршу													
	К <sub>х</sub>	θ <sub>0</sub> , Па	θ <sup>оп</sup> <sub>0</sub> , Па р-ня: (3.16)	Δ, %	θ <sup>оп</sup> <sub>об</sub> , Па	θ <sup>оп</sup> <sub>об</sub> , Па р-ня: (3.17)	Δ, %	θ <sup>оп</sup> <sub>одр</sub> , Па р-ня: (3.12)	Δ, %	τ <sup>оп</sup> <sub>к</sub> , с	τ <sup>оп</sup> <sub>кр</sub> , с р-ня: (3.18)	Δ, %	A, Па·с <sup>-2</sup> р-ня: (3.14)	A <sub>1</sub> , Па·с <sup>-2</sup> р-ня: (3.14a)
Свиняча	0,81	1070	1090	-1,9	1350	1325	1,9	1343	0,5	350÷360	352	0,6÷2,2	0,0098	0,0106
Радянська	1,13	990	985	0,5	1190	1194	-0,4	1210	-1,7	365÷370	364	0,3÷1,6	0,0079	0,0095
Любительська	2,42	850	844	0,7	1030	1017	1,3	1069	-3,8	400÷440	414	3,5÷5,9	0,0060	0,0058
Московська	4,5	780	785	-0,6	950	944	0,6	957	-0,7	500	514	2,8	0,0035	0,0043
Фантазія	4,5	780	786	-0,7	950	946	0,7	958	-0,8	500	509	1,8	0,0035	0,0043

Визначивши за графічними залежностями (рис. Н.1 і рис Н.2, додаток Н) оптимальні значення ГНЗ і тривалості подрібнення, можна записати емпіричні залежності для розрахунку величини ГНЗ дисперсного середовища фаршу сиркопчених ковбас у довільний момент часу першого періоду подрібнення:

$$\Theta_0 = A(\tau_k - \tau_k^{оп})^2 + \Theta_0^{оп} \quad (3.20)$$

$$\Theta_{0d} = A_1 (T_k - T_{kd}^{оп})^2 + \Theta_{0d}^{оп} \quad (3.21)$$

Коефіцієнти і оптимальні значення до рівняння (3.20) і (3.21) для дисперсного середовища фаршу наступних видів сирокочених ковбас наведені в раніше поданій табл.3.6.

### 3.1.4. Фаршеутворення на кутері великої продуктивності

Використовували сучасний вакуумний кутер фірми Kremer Grebe великої продуктивності та місткістю чаші 500 л з можливістю регулювання частоти обертання ножів і чаші в широкому діапазоні.

Дослідження проводили за різних режимів роботи кутера, обладнаного шістьма ножами.

Розглянемо перший варіант подрібнення дисперсного середовища фаршу для сирокочених ковбас при частоті обертання ножів кутера  $1500 \text{ хв}^{-1}$  і чаші  $16 \text{ хв}^{-1}$ . Експериментальні дані наведені в таблиці Н.2 (додаток Н).

По реологічних властивостях дисперсного середовища фаршу для різних видів сирокочених ковбас видно, що їх мінімальні величини властиві для фаршу ковбаси «Московської», дещо більша величина притаманна фаршу ковбаси «Фантазія». Потім величини реологічних властивостей за видами ковбас зростають в наступній послідовності: Любительська, Радянська, Свиняча. Найбільші ГНЗ властиві дисперсному середовищу фаршу ковбаси «Свиняча», хоча за прийнятими уявленнями сировина із свинини більш ніжна і м'яка у порівнянні з яловичою. На нашу думку, збільшення вмісту подрібненого жиру в дисперсному середовищі фаршу до певної міри сприяє кращому поєднанню частинок подрібненої м'язової тканини. Причому, зі зменшенням вмісту білка з 19.2% до 17.3% і збільшенням вмісту жиру з 0.8% до 8.5% реологічні властивості збільшуються. Характер зміни статичного (рис Н.3. додаток Н) і динамічного (рис. Н.4, додаток Н) ГНЗ від тривалості подрібнення аналогічний. Величина динамічного ГНЗ дещо більша від статичного. Оптимальне мінімальне значення ГНЗ досягає екстремального значення за різної тривалості подрібнення. Оптимальна тривалість подрібнення дисперсного середовища фаршу на кутері, що розглядається, з закладеними кінематичними параметрами коливається від 320 (для ковбаси Свинячої) до 630 с (для ковбаси Московської). Для дисперсного середовища фаршу інших видів ковбас - Фантазія, Любительська і Радянська оптимальна тривалість подрібнення складає, відповідно, 540, 360-400, 330-340 с. При цьому для деяких видів ковбас оптимальна тривалість подрібнення, визначена за кінетикою

зміни статичного і динамічного ГНЗ співпадає, а для інших лежить у близьких межах. Наприклад, для ковбаси Московської за статичним ГНЗ оптимальна тривалість складає 630 с, а за динамічним – 580 с, в середньому 600 с; для фаршу ковбаси Любителівської, відповідно, 360 і 400 с, а для Радянської – 330-340 с.

В першій зоні подрібнення дисперсного середовища фаршу для різних видів ковбас їх статичне і динамічне ГНЗ змінюється в залежності від тривалості подрібнення за параболічним законом (див. рівняння (3.20) і (3.21)).

Розглянемо, як змінюється оптимальна тривалість подрібнення на кутері з місткістю чаші 500 л на першому обраному режимі ( $n_n=1500 \text{ хв}^{-1}$ ,  $n_c=16 \text{ хв}^{-1}$ ) в залежності від критерію хімічного складу:

$$\tau_k^{\text{оп}}=297 \exp(0.1 K_x), \text{ с} \quad (3.22)$$

Значення оптимального статичного ГНЗ дисперсного середовища фаршу в залежності від його хімічного складу, вираженого через відповідний критерій, змінюється за залежністю 3.11.

Розрахувати величини статичного і динамічного граничного напруження зсуву дисперсного середовища фаршу в першому періоді його подрібнення в довільний момент часу для розглянутих видів ковбас можна за наступними залежностями:

$$1. \text{ Ковбаса «Фантазія»}: \Theta_o=0,0029(\tau_k-540)^2+780 \quad (3.23)$$

$$\Theta_{од}=0,0035(\tau_k-540)^2+930 \quad (3.24)$$

$$2. \text{ Ковбаса «Московська»}: \Theta_o=0,0021(\tau_k-630)^2+760 \quad (3.25)$$

$$\Theta_{од}=0,0030(\tau_k-580)^2+910 \quad (3.26)$$

$$3. \text{ Ковбаса «Любителівська»}: \Theta_o=0,00724(\tau_k-360)^2+950 \quad (3.27)$$

$$\Theta_{од}=0,0075(\tau_k-400)^2+1120 \quad (3.28)$$

$$4. \text{ Ковбаса «Радянська»}: \Theta_o=0,08(\tau_k-330)^2+1020 \quad (3.29)$$

$$\Theta_{од}=0,012(\tau_k-340)^2+1230 \quad (3.30)$$

$$5. \text{ Ковбаса «Свиняча»}: \Theta_o=0,0111(\tau_k-320)^2+1080 \quad (3.31)$$

$$\Theta_{од}=0,0134(\tau_k-320)^2+1310 \quad (3.32)$$

Тобто всі рівняння відповідають залежностям (3.20), (3.21):

$$\Theta_o(\Theta_{од})=A(\tau_k-\tau_k^{\text{оп}})^2+\Theta_o^{\text{оп}}(\Theta_{од}^{\text{оп}}), \quad (3.33)$$

де А – коефіцієнт, який має розмірність Па/с<sup>2</sup> і його величина, відповідно, для статичного і динамічного ГНЗ для пронумерованих видів ковбас становить:

1–  $29 \cdot 10^{-4}(35 \cdot 10^{-4})$ ; 2–  $21 \cdot 10^{-4}(30 \cdot 10^{-4})$ ; 3–  $72.4 \cdot 10^{-4}(75 \cdot 10^{-4})$ ; 4–  $100 \cdot 10^{-4}(120 \cdot 10^{-4})$ ; 5–  $111 \cdot 10^{-4}(134 \cdot 10^{-4})$ .

Похибки розрахунку за запропонованими формулами не перевищують, як правило, 5% і наведені в табл. Н.2 (додаток Н).

Для прискорення процесу подрібнення фаршу для обраного асортименту сирокочених ковбас розглянемо другий варіант режиму. При тій же частоті обертання ножів кутера ( $1500 \text{ хв}^{-1}$ ) зменшимо частоту обертання чаші з 16 до  $9,9 \text{ хв}^{-1}$ . Результати дослідження наведені в табл. Н.3 і на рис. Н.5 і Н.6 (додаток Н). Тривалість подрібнення при цьому скоротилася в 1,5- 2 рази, тобто з 320 – 630 с до 200 – 270 с. Оптимальна тривалість подрібнення, в залежності від критерію хімічного складу, визначається за наступною залежністю:

$$t_k^{\text{оп}} = 184 \exp(0.1K_x), \text{ с} \quad (3.34)$$

Формули для визначення статичного і динамічного ГНЗ дисперсного середовища фаршу при будь-якій тривалості подрібнення в першому періоді за відповідних параметрів кутера з місткістю чаші 500 л аналогічні попереднім і відрізняється тільки значеннями коефіцієнтів для різних видів ковбас:

1. Ковбаса «Фантазія»:  $\Theta_o = 0.0123(t_k - 270)^2 + 790$  (3.35)

$$\Theta_{\text{од}} = 0.0157(t_k - 260)^2 + 950 \quad (3.36)$$

2. Ковбаса «Московська»:  $\Theta_o = 0.0142(t_k - 250)^2 + 810$  (3.37)

$$\Theta_{\text{од}} = 0.0181(t_k - 240)^2 + 990 \quad (3.38)$$

3. Ковбаса «Любительська»:  $\Theta_o = 0.0223(t_k - 210)^2 + 990$  (3.39)

$$\Theta_{\text{од}} = 0.0265(t_k - 210)^2 + 1140 \quad (3.40)$$

4. Ковбаса «Радянська»:  $\Theta_o = 0.0175(t_k - 230)^2 + 850$  (3.41)

$$\Theta_{\text{од}} = 0.0212(t_k - 230)^2 + 1040 \quad (3.42)$$

5. Ковбаса «Свиняча»:  $\Theta_o = 0.0265(t_k - 200)^2 + 990$  (3.43)

$$\Theta_{\text{од}} = 0.0313(t_k - 200)^2 + 1200 \quad (3.44)$$

Аналізуючи подані формули можна відмітити, що для ковбас Любительська, Радянська і Свиняча оптимальна тривалість подрібнення, визначена за статичним і динамічним ГНЗ, співпадає, а для ковбас Фантазія і Московська лежить у межах похибки експерименту і, відповідно, становить 260-270 і 240-250 с.

Розглянемо третій варіант режиму подрібнення на кутері великої продуктивності з частотою обертання ножів і чаші, відповідно, становить

2500хв<sup>-1</sup> і 24хв<sup>-1</sup>. Результати експерименту і розрахункові дані з визначенням похибки подані у табл. Н.4 (додаток Н). Характер зміни статичного і динамічного ГНЗ дисперсного середовища фаршу для різних видів ковбас не змінився і аналогічний попередньому (рис.Н.5 і Н.6, додаток Н). При цьому тривалість подрібнення, у порівнянні з другим варіантом, скоротилася до 110-150 с, тобто майже в два рази, а у порівнянні з першим варіантом в 3-4 рази.

Формули для розрахунку статичного і динамічного ГНЗ дисперсного середовища фаршу для досліджених видів ковбас за різної тривалості подрібнення наступні:

$$1. \text{ Ковбаса «Фантазія»}: \Theta_o=0.0388(\tau_k-150)^2+796 \quad (3.45)$$

$$\Theta_{од}=0.0538(\tau_k-140)^2+960 \quad (3.46)$$

$$2. \text{ Ковбаса «Московська»}: \Theta_o=0.0375(\tau_k-140)^2+768 \quad (3.47)$$

$$\Theta_{од}=0.0462(\tau_k-150)^2+950 \quad (3.48)$$

$$3. \text{ Ковбаса «Любительська»}: \Theta_o=0.0653(\tau_k-120)^2+860 \quad (3.49)$$

$$\Theta_{од}=0.0800(\tau_k-120)^2+1000 \quad (3.50)$$

$$4. \text{ Ковбаса «Радянська»}: \Theta_o=0.0586(\tau_k-120)^2+830 \quad (3.51)$$

$$\Theta_{од}=0.0770(\tau_k-120)^2+1030 \quad (3.52)$$

$$5. \text{ Ковбаса «Свиняча»}: \Theta_o=0.0868(\tau_k-110)^2+960 \quad (3.53)$$

$$\Theta_{од}=0.1(\tau_k-110)^2+1200 \quad (3.54)$$

Оптимальна тривалість подрібнення, визначена за статичним і динамічним ГНЗ співпадає для ковбас Московська, Любительська і Свиняча і становить, відповідно, 150, 120, 110 с, а для ковбас Фантазія і Радянська лежить в межах похибки у експерименту і становить, відповідно, 140-150 і 120-125 с. Похибка у розрахунках не перевищує 5%, що видно із таблиці Н.4.(додаток Н).

Оптимальна тривалість подрібнення фаршу з різним критерієм хімічного складу визначається в даному випадку за наступною залежністю:

$$\tau_k^{од}=96 \exp(0.1K_x), \text{ с} \quad (3.55)$$

Розглянемо четвертий варіант режиму подрібнення, для реалізації якого установимо максимальну частоту обертання ножів 2500хв<sup>-1</sup>, але зменшимо частоту обертання чаші до 16 хв<sup>-1</sup>. Результати досліджень за цим варіантом наведені в таблиці Н.5 (додаток Н). Графічні залежності,

подані на рис. Н.9 і Н.10 (додаток Н) апроксимуються наступними залежностями для ковбас різних видів:

$$1. \text{ Ковбаса «Фантазія»}: \Theta_o = 0.0425(t_k - 140)^2 + 750 \quad (3.56)$$

$$\Theta_{од} = 0.0600(t_k - 130)^2 + 910 \quad (3.57)$$

$$2. \text{ Ковбаса «Московська»}: \Theta_o = 0.0490(t_k - 130)^2 + 770 \quad (3.58)$$

$$\Theta_{од} = 0.069(t_k - 150)^2 + 930 \quad (3.59)$$

$$3. \text{ Ковбаса «Любительська»}: \Theta_o = 0.142(t_k - 80)^2 + 850 \quad (3.60)$$

$$\Theta_{од} = 0.154(t_k - 85)^2 + 1040 \quad (3.61)$$

$$4. \text{ Ковбаса «Радянська»}: \Theta_o = 0.0176(t_k - 75)^2 + 910 \quad (3.62)$$

$$\Theta_{од} = 0.0206(t_k - 75)^2 + 1140 \quad (3.63)$$

$$5. \text{ Ковбаса «Свиняча»}: \Theta_o = 0.222(t_k - 70)^2 + 1000 \quad (3.64)$$

$$\Theta_{од} = 0.260(t_k - 70)^2 + 1230 \quad (3.65)$$

Похибка розрахунків у цьому випадку досягає 10%. За органолептичними показниками контролювати такий процес майже неможливо. У цьому випадку необхідна автоматизація контролю. Оптимальну тривалість подрібнення фаршу для сирокочених ковбас в залежності від його хімічного складу, який оцінюється за критерієм  $K_x$ , можна визначити за наступною формулою:

$$t_k^{оп} = 65 \exp(0.1K_x), \text{ с} \quad (3.66)$$

Для практичного використання такий режим не раціональний. Оптимальна тривалість подрібнення у цьому випадку складає всього 120-140 с для ковбас Фантазія і Московська, а для інших видів ковбас не перевищує 70-80 с.

Доцільно на практиці застосовувати перший або другий режим подрібнення за частоти обертання ножів  $1500 \text{ хв}^{-1}$  і чаші 16 або  $9,9 \text{ хв}^{-1}$ . При цьому тривалість подрібнення складає 320-540 або 200-270 с.

### **3.2. Оптимізація терміну подрібнення фаршу для сирокочених ковбас**

Для отримання узагальнюючої залежності з визначення оптимального режиму тонкого подрібнення дисперсного середовища фаршу для сирокочених ковбас на довільній моделі кутера, з урахуванням його геометричних і кінематичних параметрів, в першу чергу необхідно вибрати комплексний критерій, який враховує характеристики машини.

Визначати для кожного конкретного виду сирокоченої ковбаси оптимальні режими механічної обробки не доцільно, адже навіть для одного її виду хімічний склад може змінюватись у певному інтервалі. Від його величини залежить тривалість подрібнення і консистенція дисперсного середовища фаршу, оцінювана за величиною статичного або динамічного ГНЗ.

Подібні дослідження були проведені на фарші для варених ковбас Горбатовим А.В. і Косим В.Д. Вони використовували загальну характеристику подрібнювальної машини  $\Omega$ , яка була запропонована Пелєєвим А.І., і враховує її характеристики:

$$\Omega = f_0 W_n^2 / W_{\phi}, \text{ м}^3 / \text{кг} \cdot \text{с}^2, \quad (3.67)$$

де  $f_0$  - загальна різальна здатність,  $\text{м}^2 / \text{кг} \cdot \text{с}$ ;

$W_n$ ,  $W_{\phi}$  - відповідно, лінійні швидкості обертання ножів (по найбільшому радіусу) і чаші кутера (по вісі обертання ножів),  $\text{м}/\text{с}$ .

Загальна різальна здатність кутера  $f_0$  прямопропорційна кількості ножів, частоті їх обертання  $n_n$ , а також дійсній площі різання  $F_d$  і оберненопропорційна масі фаршу  $m_{\phi}$ .

$$f_0 = z n_n F_d / m_{\phi}, \text{ м}^2 / \text{кг} \cdot \text{хв} \quad (3.68)$$

Частота обертання ножів  $n_n$  зазвичай задається кількістю обертів їх за хвилину. Для того щоб виразити різальну здатність в системі  $S_i$ , частоту обертань задамо виразимо кількістю обертів за секунду, тоді рівняння (3.68) прийме наступний вигляд:

$$f_0 = z n_n F_d / m_{\phi} 60., \text{ м}^2 / \text{кг} \cdot \text{с} \quad (3.69)$$

Дійсна площа різання  $F_d$  буде дещо меншою у порівнянні з геометричною  $F_r$  на величину площі, яка виникла за рахунок зазору між чашею і ножами  $F_3$ .

$$F_r = m_{\phi} / 2 \pi r R., \text{ м}^2 \quad (3.70)$$

$$F_3 = 1.93 r_n h_3 (m_{\phi} / \pi r R r_n^2)^{0.41}, \text{ м}^2 \quad (3.71)$$

$$\text{тоді } F_d = F_r - F_3 = (m_{\phi} / \pi r R) - 1.93 r_n h_3 (m_{\phi} / \pi r R r_n^2)^{0.41}, \text{ м}^2 \quad (3.72)$$

де  $r_n$  - радіус ножа до крайньої точки,

$R$  - відстань від осі обертання чаші до вісі обертання ножів,  $\text{м}$ .

Зазвичай площа зазору складає 0,95 до 0,98 геометричної площі, тобто

$$F_d = (0.95-0.98) F_r = (0.95-0.98) m_{\phi} / \pi r R = a_F m_{\phi} / \pi r R, \quad (3.73)$$

де  $a_F = 0.95-0.98$

Лінійні швидкості ножів  $W_n$  і фаршу  $W_{\phi}$ , будуть рівні:



$$W_H = w_H r_H = 2\pi r_H n_r / 60 \quad (3.74)$$

$$W_\Phi = w_r R = 2\pi R n_r / 60 \quad (3.75)$$

де  $w_H$  і  $w_r$  – колові швидкості відповідно ножів і чаші кутера ( $w = \pi n / 30$ );

$n_r$  – частота обертання чаші кутера,  $\text{хв}^{-1}$ .

Підставляючи в рівняння (3.68) і (3.69) вираз (3.73) отримаємо:

$$f_0 = z n_H a_\Phi m_\Phi / m_\Phi 2\pi r R = z n_H a_\Phi / 2\pi r R, \text{ м}^2/\text{кг} \cdot \text{хв} \quad (3.76)$$

або  $f_0 = z n_H a_\Phi m_\Phi / m_\Phi 60 \cdot 2\pi r R = z n_H a_\Phi / 60 \cdot 2\pi r R, \text{ м}^2/\text{кг} \cdot \text{с} \quad (3.77)$

Підставивши в рівняння (3.68) вираз (3.76), (3.74) і (3.75) отримаємо:

$$\Omega = a_f \frac{z n_H}{2\pi r R} \cdot \frac{\pi^2 r_H^2 n_H^2}{30^2} \cdot \frac{30}{\pi R n_r} = \frac{a_f z}{60 \rho} \cdot \frac{n_H r_H^2 n_H^2}{R R n_r} \quad (3.78)$$

Тоді  $\Omega = (a_f z / 60 \rho) \cdot (r_H n_H / R)^2 \cdot (n_H / n_r), \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с} \cdot \text{хв} \quad (3.79)$

Якщо підставити в вираз (3.67) замість (3.76) рівняння (3.77), тоді отримаємо:

$$\Omega = (a_f z / 3600 \rho) \cdot (r_H n_H / R)^2 \cdot (n_H / n_r), \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с} \cdot \text{хв} \quad (3.80)$$

Розглянемо загальні комплексні різальні характеристики використаних моделей кутерів:

1. Лабораторний кутер з місткістю чаші 8 л, у якого  $r_H = 0.115$  м;  $R = 0.135$  м;  $n_H = 1200$   $\text{хв}^{-1}$ ;  $n_r = 8$   $\text{хв}^{-1}$ ;  $z = 3$ . Приймаємо коефіцієнт  $a_f = 0,97$ , густина дисперсного середовища фаршу сирокоччених ковбас -  $1000$   $\text{кг}/\text{м}^3$ . Тоді узагальнена різальна характеристика для даного кутера буде становити:  $\Omega = (0,97 \cdot 3 / 3600 \cdot 1000) \cdot (0,115 \cdot 1200 / 0,135)^2 (1200 / 8) = 126,7 \text{ м}^3/\text{кг} \text{ с}^2$

2. Кутер середньої продуктивності з місткістю чаші 250 л, у якого  $r_H = 0,29$  м;  $R = 0,36$  м;  $n_H = 1325$   $\text{хв}^{-1}$ ;  $n_r = 9,1$   $\text{хв}^{-1}$ ;  $z = 6$ .

Тоді узагальнена різальна характеристика для даного кутера буде становити:

$$\Omega = (0,97 \cdot 6 / 3600 \cdot 1000) \cdot (0,29 \cdot 1325 / 0,36)^2 (1325 / 9,1) = 266,7 \text{ м}^3/\text{кг} \text{ с}^2$$

3. Кутер великої продуктивності з місткістю чаші 500 л, у якого  $r_H = 0,379$  м;  $R = 0,41$  м, а частоти обертання ножів і чаші змінюються у широких межах, деякі із яких використані в наших експериментах:

а)  $n_H = 1500$   $\text{хв}^{-1}$ ;  $n_r = 16$   $\text{хв}^{-1}$ ;  $z = 6$ .

Тоді узагальнена різальна характеристика для такого кутера буде наступною:

$$\Omega = (0,97 \cdot 6 / 3600 \cdot 1000) \cdot (0,379 \cdot 1500 / 0,41)^2 (1500 / 16) = 291,7 \text{ м}^3/\text{кг} \text{ с}^2$$

б)  $n_H = 1500$   $\text{хв}^{-1}$ ;  $n_r = 9,9$   $\text{хв}^{-1}$ ;  $z = 6$ .

$$\Omega = (0,97 \cdot 6 / 3600 \cdot 1000) \cdot (0,379 \cdot 1500 / 0,41)^2 (1500 / 9,9) = 471,4 \text{ м}^3/\text{кг} \text{ с}^2$$

в)  $n_H=2500 \text{ хв}^{-1}$ ;  $n_r=24 \text{ хв}^{-1}$ ;  $z=6$ .

$$\Omega=(0,97 \cdot 6/3600 \cdot 1000) \cdot (0,379 \cdot 2500/0,41)^2 (2500/24)=900 \text{ м}^3/\text{кг} \text{ с}^2$$

г)  $n_H=2500 \text{ хв}^{-1}$ ;  $n_r=16 \text{ хв}^{-1}$ ;  $z=6$ .

$$\Omega=1350 \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2.$$

Вище доведено, що оптимальна тривалість подрібнення дисперсного середовища фаршу залежить не від виду сирокоченої ковбаси, а від її хімічного складу, який оцінюється за хімічним критерієм. Тривалість кутерування підпорядковується експоненційній залежності загального вигляду:

$$\tau_k^{\text{оп}}=A \exp(0,1K_x), \quad (3.81)$$

де  $A$  – коефіцієнт, який залежить від моделі кутера, що має конкретні геометричні і кінематичні параметри. Так, для лабораторного кутера експоненційна залежність апроксимована у вигляді прямої  $\tau_k^{\text{оп}}=640(1+K_x)$ , яка може бути подана в наступному вигляді:

$$\tau_k^{\text{оп}}=640 \exp(0,1K_x), \text{ с} \quad (3.82)$$

При  $K_x=4,79$ ,  $\tau_k^{\text{оп}}$  буде рівним 1082 с, а за експериментальними даними 1080;  $K_x=3,16$ ,  $\tau_k^{\text{оп}}=919(900)$ ; при  $K_x=2,37$ ,  $\tau_k^{\text{оп}}=849(900)$ ; при  $K_x=1,89$ ,  $\tau_k^{\text{оп}}=809(840)$ ;  $K_x=1,42$ ,  $\tau_k^{\text{оп}}=772(750-860)$ .

Тоді коефіцієнт  $A$  у рівнянні (3.81) буде рівним:

для лабораторного кутера  $A=670$  при  $\Omega=126,7$ ;

для кутера із середньою продуктивністю  $A=325$  при  $\Omega=266,7$ ;

для кутера з великою продуктивністю:

$A=297$  при  $\Omega=291,7$ ;

$A=184$  при  $\Omega=471,4$ ;

$A=96$  при  $\Omega=900$ ;

$A=65$  при  $\Omega=1325$ .

Побудувавши графічну залежність  $A=f(\Omega)$  (рис. 3.4), отримали криву, яка апроксимується залежністю:

$$A=a \Omega^{-1}, \text{ с} \quad (3.83)$$

де  $a$ - коефіцієнт, який має розмірність  $\text{м}^3/\text{кг} \text{ с}$  і величину  $86 \cdot 10^3$ .

Тоді  $\tau_k^{\text{оп}}=a \exp(0,1K_x) \cdot \Omega^{-1}=86 \cdot 10^3 \exp(0,1K_x) \Omega^{-1}, \text{ с} \quad (3.84)$

Різниця у коефіцієнтів  $A$ , розрахованих по узагальненому рівнянню (3.84), у порівнянні з коефіцієнтами, розрахованими за формулою (3.81) для певного кутера (в дужках) наступна: 679(670); 322(325); 295(297); 182(184); 95.5(96); 64.9(65), що складає похибку, яка не перевищує 1,5%. Розраховані і експериментальні значення  $\tau_k^{\text{оп}}$  і їх похибки представлені в табл. 3.4.

Таким чином нами отримана узагальнена залежність, яка дозволяє визначити оптимальну тривалість подрібнення дисперсного середовища фаршу для різних видів ковбас з урахуванням їх хімічного складу на довільному кутері, спираючись на його узагальнюючу кінематичну характеристику.

Таблиця 3.4 – Експериментальні і розрахункові оптимальні значення тривалості кутерування, статичного і динамічного ГНЗ дисперсного середовища фаршу сирокочених ковбас і похибки розрахунку

$K_x$	$\Omega$	$\tau_{\kappa}^{on}$	$\tau_{\kappa p}^{on}$ (3.84)	$\Delta, \%$	$\Theta_o^{on}, Па$	$\Theta_{op}^{on}, Па$ (3.85)	$\Delta, \%$	$\Theta_{od}^{on}, Па$	$\Theta_{od}^{on}, Па$ (3.86)	$\Delta, \%$	$\Theta_o^e, Па$ (3.7)	$\Theta_o^e, Па$ (3.89)	$\Delta, \%$	$\Theta_{od}^e, Па$ (3.8)	$\Theta_{od}^e, Па$ (3.90)	$\Delta, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
4,79	126,7	1080	1096	-1,5	780	783	-0,4	948	953	-0,5	1636	1636	0,2	1956	1992	1,8
4,50	266,7	500	506	-1,2	780	787	-0,9	950	958	-0,8	1644	1645	0,1	1967	2002	1,8
6,23	291,7	540	550	-1,9	780	768	1,6	935	935	0	1667	1605	0,1	1920	1954	1,8
3,50	471,4	270- 260	259	4,5 (-0,5)	790	806	-2,0	950	983	-3,5	1683	1684	0,1	2014	2054	2,0
4,07	900,0	150- 260	144	4 (-2,9)	796	794	0,3	960	967	0,7	1658	1660	0,1	1984	2021	1,9
7,99	1350	140- 130	142	-1,4 (-9)	750	758	-1,1	910	922	-1,3	1586	1584	0,1	1894	1927	1,7
3,16	126,7	900	931	-3,4	822	815	0,9	989	994	-0,5	1701	1703	0,1	2037	2077	2,0
4,60	266,7	500	511	-2,2	780	785	-0,6	950	957	-0,7	1641	1640	0,1	1963	2000	1,9
7,50	291,7	630- 580	624	1 (-7,6)	757	760	-0,4	910	925	-1,6	1590	1588	0,1	1900	1933	1,7
3,20	471,4	250- 240	251	-0,4 (-4,6)	810	814	-0,5	990	993	-0,3	1699	1701	0,1	2034	2075	2,0
4,71	900,0	150	153	-2,0	786	784	0,3	950	955	-0,5	1638	1639	0,1	1956	1996	1,9
6,95	1350	130- 120	128	1,5 (-6,7)	770	767	0,4	930	929	0,1	1597	1603	0,2	1908	1942	1,8
2,37	126,7	900	860	4,4	838	847	-1,1	1028	1034	-0,6	1765	1770	0,3	2116	2161	2,1
2,42	266,7	400	411	-2,8	850	844	0,7	1030	1031	-0,1	1760	1764	0,2	2110	2155	2,1

продовження таблиці 3.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1,60	291,7	360-400	346	3,9 (13,5)	950	908	4,4	1120	1112	0,7	1887	1897	0,5	2269	2324	2,4
1,49	471,4	210	212	-1,0	930	921	1,0	1140	1129	1,0	1915	1925	0,5	2303	2360	2,5
2,18	900,0	120	119	0,8	860	858	0,2	1030	1048	-1,7	1787	1793	0,3	2144	2190	2,2
2,43	1350	80-85	81	-1,2 (4,7)	850	843	0,8	1040	1030	1,0	1786	1762	1,3	2109	2153	2,1
1,89	126,7	840	820	2,4	870	879	-1,0	1080	1075	0,5	1830	1837	0,4	2197	2247	2,3
1,13	266,7	400-370	361	9,8 (2,4)	992	985	0,7	1190	1210	-1,0	2045	2059	0,7	2464	2529	2,6
1,01	291,7	330-340	326	1,6 (4,1)	1020	1017	0,3	1230	1250	-1,6	2108	2125	0,8	2543	2612	2,7
2,30	471,4	230	230	0	850	850	0	1040	1039	0,1	1773	1776	0,2	2126	2171	2,1
2,62	900,0	125-120	124	0,8 (-3,3)	830	835	-0,6	1030	1019	1,1	1741	1745	0,2	2086	2130	2,1
1,55	1350	75	74,4	0,8	910	914	-0,4	1140	1119	1,8	1900	1910	0,5	2284	2339	2,4
1,42	126,7	750-800	782	-4,3 (2,3)	930	931	-0,1	1130	1142	-1,1	1935	1946	0,6	2328	2387	2,5
0,81	266,7	360	350	2,8	1070	1090	-1,9	1350	1343	0,5	2256	2278	1,0	2726	2807	3,0
0,85	291,7	320	321	-0,3	1080	1073	0,6	1310	1321	-0,8	2221	2243	1,0	2682	2761	2,9
1,15	471,4	200	205	-2,5	990	981	0,9	1204	1204	0	2035	2050	0,7	2452	2516	2,6
1,21	900,0	110	108	1,8	960	968	-0,8	1200	1188	1,0	2009	2006	0,2	2420	2483	2,6
1,07	1350	70	71	-1,4	1020	1000	2,0	1230	1229	0,1	2074	2090	0,8	2501	2568	2,7

### 3.3. Алгоритм розрахунку визначальних реологічних характеристик фаршу для сирокочених ковбас

Аналізуючи отриманий вище експериментальний матеріал можна відмітити, що величина статичного і динамічного ГНЗ за оптимальної тривалості кутерування не залежать від виду подрібнювальної машини і виду сирокоченої ковбаси, а залежать від хімічного складу дисперсного середовища фаршу. Для визначення оптимального ГНЗ фаршу, яке відповідає оптимальній тривалості його подрібнення, отримані наступні залежності:

для статичного ГНЗ:

$$\Theta_0^{\text{оп}}=300(2.4+K_x^{-1}), \text{ Па} \quad (3.85)$$

для динамічного ГНЗ:

$$\Theta_{\text{од}}^{\text{оп}}=380(2.3+K_x^{-1}), \text{ Па} \quad (3.86)$$

Експериментальні і розрахункові оптимальні значення статичного і динамічного ГНЗ і похибку у його визначенні наведені у табл. 3.4. Похибка розрахунку складає не більше 5%.

З табл. 3.4 видно, що критерій хімічного складу дисперсного середовища фаршу для кожного виду сирокоченої ковбаси коливається в широких межах. Для ковбас Фантазія і Московська дисперсне середовище складається із гов'ядини вищого гатунку, у якого критерій хімічного складу коливається в широких межах - від 3,16 до 8; для ковбаси Любительської, яка складається із яловичини 1 гатунку – від 1,49 до 2,42; Радянської – від 1,01 до 2,62, що перебиває діапазон критерію хімічного складу дисперсного середовища фаршу ковбаси Любительської, хоча вона складається із яловичини вищого гатунку і нежирної свинини; для ковбаси Свинячої -  $\hat{E}_o$  знаходиться в межах від 0,8 до 1,42. Представлені дані підтверджують, що реологічні характеристики дисперсного середовища прямо залежать від критерію хімічного складу.

Знаючи оптимальні значення тривалості подрібнення і граничного напруження зсуву фаршу, можна установити математичну залежність, яка дозволяє описати кінетику їх зміни в першому періоді процесу кутерування.

Вище доведено, що під час подрібнення фаршу для сирокочених ковбас на різних моделях кутерів з різними геометричними і кінематичними характеристиками, взаємозв'язок ГНЗ і тривалості подрібнення наступний:

$$\Theta_0(\Theta_{\text{од}})=A(\tau_k - \tau_k^{\text{оп}})^2 + \Theta_0^{\text{оп}}(\Theta_{\text{од}}^{\text{оп}}), \quad (3.87)$$

де  $A$  – коефіцієнт;

$\Theta_0^{оп}$  і  $\Theta_{од}^{оп}$  залежать від хімічного складу ковбаси;

$\tau_k$  і  $\tau_k^{оп}$  – залежать від критерію хімічного складу і від узагальнюючої характеристики подрібнювальної машини.

Для отримання узагальнюючої залежності від всіх перерахованих факторів побудували графічну залежність з відносними координатами, а саме:  $\Theta_{од}/\Theta_0^{оп} = f(\tau_k/\tau_k^{оп})$  або  $\Theta_{од}/\Theta_{од}^{оп} = f(\tau_k/\tau_k^{оп})$ . Оптимальні величини ГНЗ і тривалості кутерування наведені в табл. Н.1-Н.5 (додаток Н), за якими побудована узагальнююча графічна залежність рис. 3.5.

Математична обробка дозволила отримати наступну залежність:

$$\Theta_{од}/\Theta_0^{оп} = \Theta_0/\Theta_0^{оп} = 1.09(1 - \tau_k/\tau_k^{оп})^2 + 1 \quad (3.88)$$

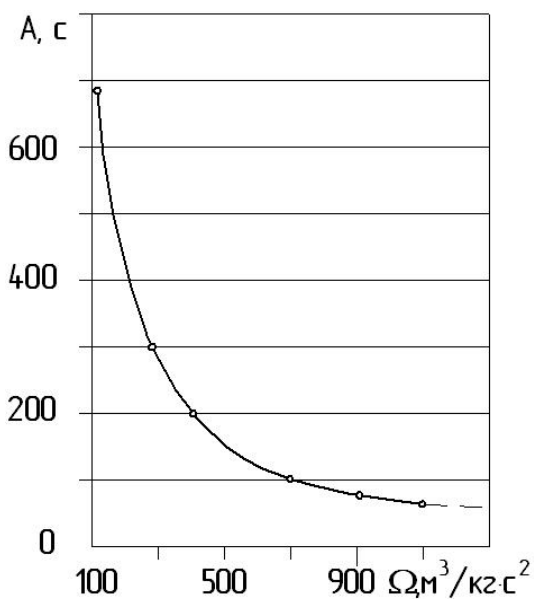


Рис. 3.4 – Залежність коефіцієнта  $A$  до рівняння для розрахунку оптимальної тривалості подрібнення фаршу сирокочених ковбас від узагальнюючої кінематичної характеристики кутера

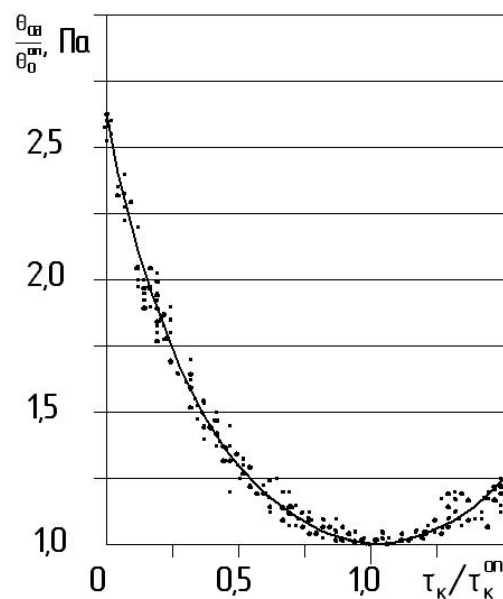


Рис. 3.5 – Залежність відносного статичного і динамічного граничного напруження зсуву (ГНЗ) дисперсного середовища фаршу сирокочених ковбас від відносної тривалості подрібнення : • – статичне; × – динамічне ГНЗ

Наведена залежність (3.88) об'єднала і усереднила значення оптимальної тривалості подрібнення, отриманої за статичним і динамічним ГНЗ. За нею можна визначити ГНЗ (статичне і динамічне) у довільній момент часу першого періоду подрібнення. При цьому попередньо необхідно розрахувати оптимальне значення статичного (3.85) або динамічного (3.86) ГНЗ і тривалість подрібнення фаршу для сирокочених ковбас (3.82).

Тоді рівняння (3.88) прийме наступний вигляд:

$$\Theta_0 = [1.09(1 - \tau_k / \tau_k^{оп})^2 + 1] \cdot \Theta_0^{оп}, \quad (3.89)$$

$$\Theta_{0д} = [1.09(1 - \tau_k / \tau_k^{оп})^2 + 1] \cdot \Theta_{0д}^{оп}, \quad (3.90)$$

Перевіримо, чи співпадають розраховані значення граничного напруження зсуву дисперсного середовища фаршу для сирокочених ковбас при  $\tau_k = 0$ , розрахованні за рівняннями (3.89) і (3.90) зі значеннями, отриманими за рівняннями (3.7) і (3.8) (див. табл. 3.4). При порівнянні розрахованого динамічного ГНЗ розходження складає менше 3%, причому дані за рівнянням (3.90) вищі, ніж за рівнянням (3.8). Тому, для збільшення точності розрахунків в рівнянні (3.90) коефіцієнт рівний 1,09 доцільно замінити на 1,05.

При розрахунку статичного ГНЗ м'ясної сировини, подрібненої на вовчку з діаметром отворів ґратки 3мм, за рівняннями (3.7) і (3.89) розходження складає не більше 1%.

Таким чином, отриманні емпіричні рівняння, які дозволяють розрахувати статичне і динамічне ГНЗ дисперсного середовища фаршу для сирокочених ковбас в процесі тонкого подрібнення, тобто розроблена методика прогнозування і розрахунку якості (консистенції) фаршу, яка оцінюється за структурно-механічними характеристиками.

### **3.4. Вплив ступеня подрібнення фаршів на кінетику висушування сирокочених ковбас**

Процес подрібнення фаршу для сирокочених ковбас вивчений недостатньо у порівнянні з подрібненням фаршів для варених ковбас, який має максимальні значення вологозв'язувальної здатності і структурно-механічних характеристик (СМХ), що забезпечує максимальний вихід готової продукції. На відміну від варених ковбас, фарш для сирокочених ковбас повинен мати найменшу вологозв'язувальну здатність і, відповідно, мінімальні значення СМХ. Від правильності виконання операції приготування фаршу залежить не тільки якість готової сирокоченої ковбаси, але і терміни подрібнення сировини і сушки виробів. Ступінь подрібнення м'ясної сировини визначає глибину технологічної обробки та впливає на форму зв'язаної вологи, змінюючи реологічні характеристики і гістологію фаршів.

Значний вклад у розвиток теорії і практики процесів виробництва і вдосконалення технології сирокочених ковбас внесли автори робіт [1, 42, 65] та ін. Разом з тим, майже відсутні роботи з дослідження впливу ступеня подрібнення фаршу на кінетику і тривалість сушки ковбас, що не дає можливості скоротити тривалість цієї операції і отримати належну кінцеву консистенцію виробів.

Нами проведені дослідження кінетики сушки сирокопченої ковбаси (на прикладі ковбаси «Московської») в залежності від ступеня (тривалості) подрібнення фаршу. Кінетику сушки оцінювали за кількістю вологи, яка видаляється з батона ковбаси ( $\Delta m$ ), визначаючи відносну величину, тобто кількість видаленої вологи з 1 кг продукту [236, 232, 219].

На початку готували фарш для визначеного виду ковбаси, відбирали проби у відповідності з стандартами і відправляли для хімічних і реологічних досліджень. Батони набивали у відповідну оболонку та зважували. Для кожної дослідної проби відбирали та зважували окремо не менше трьох батонів, маса кожного з яких позначалась  $m_n$ , кг. В процесі сушки, у відповідний момент часу  $\tau$ , с, зважували окремо кожний батон, маса якого складала  $m_i$ , кг. Втрату маси визначали за різницею мас:

$$\Delta m = m_n - m_i \quad (3.91)$$

Відносну вихідну маси батона ковбаси в процесі сушки у відповідний момент часу визначали за залежністю:

$$\Delta m_0 = \Delta m / m_n = (m_n - m_i) / m_n, \text{ кг/кг} \quad (3.92)$$

Знаючи першочергову вологість фаршу  $W_i$ , визначали, в першому наближенні, вологість батону ковбаси у відповідний момент часу сушки:

$$W_i = (W_n - \Delta m_0) / (1 - \Delta m_0), \text{ кг/кг} \quad (3.93)$$

За такою методикою визначити мінімальну тривалість сушки, коли вологість у батоні (за нормативними документами) досягає максимально допустимого значення.

Дисперсне середовище ковбаси «Московської» включало яловичину вищого ґатунку, до складу якої входила волога у кількості 75,7%, жир - 1,5%, білок - 19,3% і зола - 3,5% (переважно за рахунок вмісту солі). Вологовміст дисперсного середовища був на рівні:

$$U_{d.c.} = W_n / (1 - W_n) = 3,115 \text{ кг/кг} \quad (3.94)$$

Критерій хімічного складу розраховували за вже відомою формулою:

$$K_x = B / \varphi \cdot U = 0,193 / 0,015 \cdot 3,115 = 4,13 \quad (3.95)$$

Для приготування фаршу використали виробничий кутер із місткістю чаші 500 л. Ступінь завантаження дорівнював 0,7. Тоді, у відповідності із рецептурою, яловичину вищого ґатунку, попередньо подрібнену на вовчку, завантажували у кількості 75% від 350 кг, тобто 262,5 кг. Для



фаршу визначили статичне  $\theta_0$  і динамічне  $\theta_{00}$  ГНЗ, які, відповідно, склали 1630 Па і 2000 Па.

Кінематичні параметри кутера були вибрані найбільш раціональні для тонкого подрібнення дисперсного середовища фаршу для сирокочених ковбас [80], а саме:  $n_n = 1500 \text{ хв}^{-1}$ ;  $n_r = 9,9 \text{ хв}^{-1}$

Узагальнена характеристика кутера дорівнювала  $\Omega = 471 \text{ м}^3/\text{кг}\cdot\text{с}^2$

В процесі кутерування відбирались проби по 85 кг дисперсного середовища фаршу для ковбаси «Московської» з різним ступенем подрібнення, виходячи з терміну кутерування: 1 – недокутерована (100 с); 2 – приблизно оптимально кутована (250 с); 3 – явно перекутована (330 с). За контроль взята м'ясна сировина, подрібнена на вовчку, тобто  $\tau_{\hat{\epsilon}} = 0$ .

Потім кожна проба перемішувалась із хребтовим шпиком, попередньо подрібненим на шпикорізці до розмірів  $6 \times 6$  мм, у кількості 25%. Тобто у кожную пробу додавали 21,25 кг шпику. Отриманий фарш відправляли на хімічний аналіз. Усереднений хімічний склад ковбаси «Московської» був наступним: вологи – 57,2 %, білка – 14,4 %, жиру – 24,9%, золи 3,5%. Критерій хімічного складу був на рівні  $\hat{E}_x = 0,433$ .

Хімічний склад і реологічні характеристики фаршу та його дисперсного середовища наведені у табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Реологічні і хімічні характеристики фаршу та його дисперсного середовища

Об'єкт досліджень	W, %	U, кг/кг	B, %	$\varphi$ , %	Зл, %	Kx	$\tau_k$ , с	$\theta_0$	$\theta_{00}$	A( $\varphi_0$ )	
Дисперсне середовище фаршу	75,7	3,115	19,3	1,5	3,5	4,13	0	1650	1950		
							100	1100	1300		
							250	800	950		
							330	900	1050		
Фарш ковбаси «Московська»	57,22	1,336	14,4	24,9	3,5	0,433	0	2350	2650		
							100	1800	2000		0,063
							250	1520	1620		0,069
							330	1600	1750		0,066

Щоб приготувати ковбасу вологістю 30% необхідно видалити вологу в процесі сушки в наступній кількості:

$$\Delta m_0 = (W_n - W_k) / (1 - W_k) = (0,572 - 0,300) / (1 - 0,3) = 0,388 \text{ кг/кг}$$

Для набивання фаршу використали кутизинову оболонку. Вологість батона ковбаси в процесі сушки визначали за залежністю (3.93). Процес сушки ковбаси «Московська» проходить протягом 42 діб.

Кінетика зміни відносної втрати маси  $\Delta m_0$  і вологості батона  $w$  сирокопченої ковбаси «Московська» у часі за різних ступенів подрібнення дисперсного середовища фаршу подана на рис. 3.6.

Аналізуючи графічну залежність (рис. 3.6), можна відмітити, що характер зміни втрат маси в процесі сушки сирокопченої ковбаси з різним ступенем подрібнення дисперсійного середовища фаршу, подібний та підкоряється наступній залежності:

$$\Delta m_0 = A \cdot \tau_{oc}^{0,5}, \quad (3.96)$$

де  $A$  – коефіцієнт, який характеризує зміну відносної втрати маси в процесі сушки ковбаси і залежить від ступеня подрібнення дисперсного середовища фаршу;

$\tau_{oc}$  - відносна тривалість сушки, тобто  $\tau_c/\tau_1$ ;

$\tau_c$  - тривалість сушки, діб;

$\tau_1$  - одинична тривалість сушки, тобто  $\tau_1 = 1$  доби.

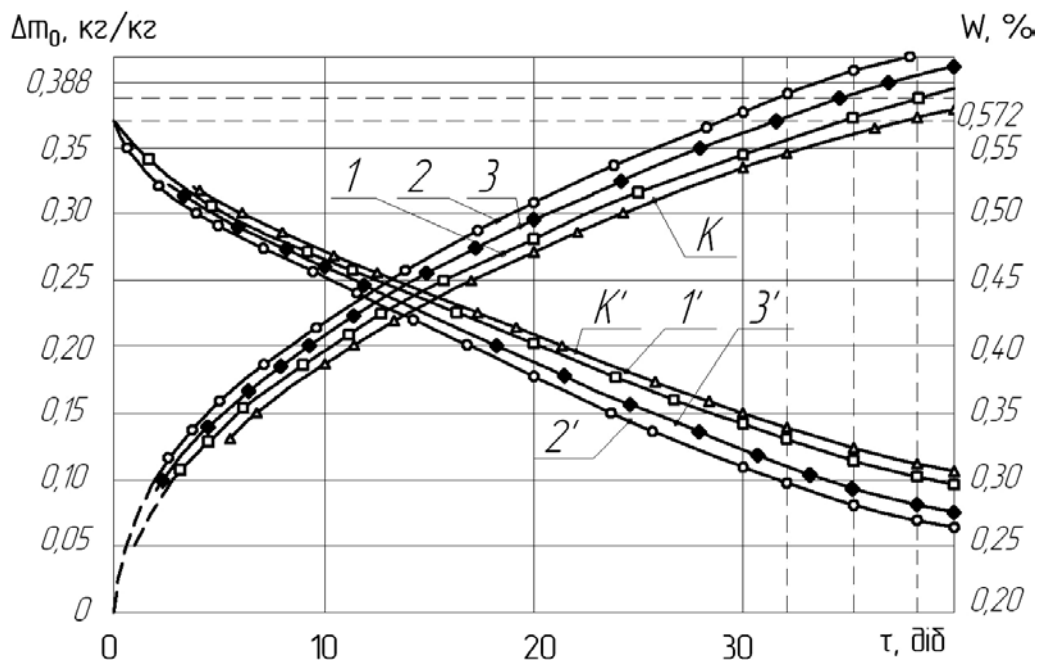


Рис. 3.6. Вплив ступеня подрібнення (терміну кутерування) на кінетику сушки дисперсного середовища фаршу ковбаси «Московська»:  $K, K'$  - 0с;  $1, 1'$  - 100 с;  $2, 2'$  - 250 с;  $3, 3'$  - 330 с;  $1, 2, 3$  -  $\Delta m_0(\tau)$ ;  $1', 2', 3'$  -  $w(\tau)$

Коефіцієнт  $A$  для кожного випадку дорівнює: при подрібненні дисперсного середовища фаршу протягом 0 с – 0,061; 100 с – 0,063; 250 с – 0,069; 330 с – 0,066.

Розрахованим величинам втрати маси притаманна похибка не більша за 1,5%.

Щоб досягти необхідної відносної вологості готової продукції (у цьому конкретному випадку 30%), необхідно видалити з батона вологість 57,2%, як показано вище, вологи 38,8%. Розглядаючи кінетику видалення вологи з батона з різним ступенем подрібнення дисперсного середовища фаршу (див. рис. 3.6), можна визначити раціональну тривалість сушки у кожному конкретному випадку. Контрольний зразок (К) досягає заданої вологості або втрачає масу  $\Delta m_0$  за 40-41 добу.

При подрібненні фаршу протягом 100 с (недокутерування) задана вологість готової продукції досягається за 38 діб; 250 с (оптимальна тривалість кутерування) – за 32 доби; 330 (перекутерування) - за 35 діб. Таким чином, мінімальна тривалість сушки складає 32 доби за оптимального подрібнення тривалістю  $\tau_k^{onm} = 250$  с.

Подібно до відносної втрати маси, але у зворотній пропорції, змінюється розрахована вологість батона в процесі сушки (криві  $K'$ ,  $1'$ ,  $2'$ ,  $3'$  - рис. 3.6).

Для того, щоб розрахувати відносну втрату маси у будь-який момент часу сушки за різного ступеня подрібнення дисперсного середовища фаршу, необхідно розглянути функцію  $\Delta m_0 = f(\tau_c, \tau_k)$ .

З рівняння (3.96) видно, що коефіцієнт  $A$  змінюється у залежності від тривалості подрібнення  $\tau_k$  за параболічною закономірністю. Виразивши тривалість подрібнення дисперсійного середовища фаршу через відносну величину ( $\tau_k / \tau_{onm}$ ), отримали наступну залежність:

$$A = A_{onm} - 0,017 \left( 1 - \tau_k / \tau_k^{onm} \right)^2 \quad (3.97)$$

де  $A_{onm}$  - коефіцієнт, який відповідає оптимальній тривалості подрібнення.

Тоді, підставивши у рівняння (3.96) залежність (3.97), отримаємо:

$$\Delta m_0 = \left[ A_{onm} - 0,017 \left( 1 - \tau_k / \tau_k^{onm} \right)^2 \right] \cdot \tau_{oc}^{0,5} \quad (3.98)$$

Кінетику зміни вологості продукту в процесі сушки можна розбити на три періоди: 1 – різкого зменшення вологості; 2 – плавної прямолінійної зміни вологості; 3 – уповільненого (криволінійного) зменшення вологості. Закінчення другого періоду практично відповідає максимально

допустимій вологості готової сирокоченої ковбаси, але це припущення потребує додаткової експериментальної перевірки.

Таким чином, ступінь подрібнення дисперсного середовища фаршу для сирокочених ковбас впливає на тривалість їх сушки. Тривалість сушки при оптимальному ступені подрібнення скорочується майже на 21%, у порівнянні з контрольним зразком, і на 16%, у порівнянні з недокутерованим, тобто з 40,5 або 38 діб до 32 діб. При оптимальному ступені подрібнення дисперсного середовища фаршу органолептична оцінка консистенції готової ковбаси була вищою у порівнянні з іншими зразками.

### **3.5. Особливості тонкого подрібнення фаршу для варених ковбас**

Тонке подрібнення забезпечує утворення таких частинок фаршу для варених ковбас, поверхня яких зв'язує максимальну кількість вологи, утворюючи однорідну гомогенну масу з певними СМХ. Якість фаршу залежить від вибору подрібнювальної машини - кутера, кутер-мішалки, колоїдного млина, емульсатора, агрегата безперервної дії тощо. В усіх цих машинах процеси подрібнення протікають подібно. Разом з тим, тривалість подрібнення, при якій фізико-хімічні властивості і технологічні характеристики продукту мають екстремально необхідні значення, різні і залежить від кінематичних характеристик машин та конструкцій різальних інструментів.

Різання в процесах тонкого подрібнення фаршу виконують за високих швидкостей. Воно супроводжується виділенням великої кількості тепла, що викликає підвищення температури сировини і може призвести до денатурації білків, зміни водозв'язувальної здатності і СМХ фаршу. Ці обставини обумовлюють необхідність розробки методики розрахунку оптимальної тривалості подрібнення з урахуванням характеристик робочих органів машин. Одним із етапів наших досліджень було встановлення кількісних і якісних закономірностей процесу для найбільш поширених подрібнювальних машин за різних режимів їх роботи (зокрема, тривалості подрібнення) і при зміні характеристик подрібнюваної сировини (виду, вологості, жирності). Такі дослідження є підґрунтям для розкриття сутності трансформації найважливіших фізико-хіміко-механічних характеристик фаршу і створюють передумови для отримання готового продукту із заданими властивостями. Метою таких досліджень є створення єдиної науково-обґрунтованої методики розрахунку оптимального режиму подрібнення фаршу із заданими СМХ на різному устаткуванні і, на цій основі, побудова підґрунтя для

розроблення засобів автоматизації процесу та ефективного м'ясорізального обладнання.

### 3.5.1. Кутерування фаршу для варених ковбас

Для визначення оптимальних режимів подрібнення фаршу використали: лабораторний кутер (ЛК) з місткістю чаші 8 л і частотою обертання двох ножів  $1000 \text{ хв}^{-1}$ ; кутер малої моделі (МК) з місткістю чаші 80 л і частотою обертання трьох ножів  $1450 \text{ хв}^{-1}$ ; кутери середньої продуктивності (СК) марки Л5-ФК1-Н з місткістю чаші 120 л і частотою обертання ножів (у кількості від 3 до 6)  $1980 \text{ хв}^{-1}$  і з місткістю чаші 160 л і частотою обертання чотирьох ножів  $1450 \text{ хв}^{-1}$ ; кутери великої моделі (ВК) та місткістю чаші 300 л заводу "PSS" (Словацька Республіка) з частотою обертання п'яти ножів  $1450 \text{ хв}^{-1}$  і марки Л5-ФКМ з двома частотами обертання 3, 6, 9 і 12 ножів, рівними  $1328$  і  $2650 \text{ хв}^{-1}$ .

За об'єкти досліджень були вибрані "модельний" фарш, який складався з різних співвідношень яловичини, свинини і шпика, а також виробничі композиції фаршу для різних видів ковбасних виробів, наприклад, сосисок російських, сардельок яловичих і свинячих, ковбаси докторської, які за рецептурою містять різні кількості яловичини, свинини і жиру.

В експериментах використовували переважно м'ясо, заздалегідь подрібнене на вовчках з ґратками діаметром 3 мм. На початку подрібнення завантажували яловичину з додаванням води і льоду (близько 50% від передбачуваної норми) і кутерували протягом  $0,5 \div 1$  хв. Потім додавали свинину, спеції і решту води та льоду. Отримавши однорідну систему в процесі подрібнення, брали проби фаршу для визначення його характеристик.

Зміни СМХ фаршів, в залежності від тривалості подрібнення ( $\tau_k$ , хв) і вологовмісту ( $U_n$ , кг вологи/кг сухого продукту), розглянемо на прикладі фаршу російських сосисок (50% яловичини і 50% свинини), подрібненого на кутерах малої і великої моделі. Характеристика фаршу подана у табл. 3.6.

При кутеруванні фаршу в підготовчому періоді, коли додана волога утворює товсті прошарки, що полегшують його деформацію, величина ГНЗ зменшується (рис. 3.7, а), втрата маси при термообробці ( $m_{ж}$ , кг/кг продукту) зростає. При збільшенні тривалості кутерування (перший період) відбувається подальше подрібнення частинок фаршу, їх загальна поверхня збільшується, волога з вільної переходить в поверхнево-зв'язану. У цей період величина ГНЗ і ефективної в'язкості (В) зростають

і досягають максимального значення, а  $m_{ж}$  знижується до найменших величин, збільшується кількість найдрібніших часток. Утворення первинної структури фаршу закінчується. У другому періоді кутерування (перекутерування) відбувається розпушування м'язових волокон м'яса, а температура фаршу продовжує підвищуватись. Процес супроводжується насиченням фаршу повітрям і емульгуванням жиру, що призводить до вторинного структуроутворення, а також до зменшення ГНЗ, збільшення пластичної в'язкості (ПВ) і  $m_{ж}$ . Одночасно відбуваються колоїдно-хімічні зміни фаршу [225].

Таблиця 3.6 – Характеристики фаршу і вихідної сировини

№№ зразка	Характеристика фаршу			Кількість доданої води	Характеристика м'яса	
	$U_H$	$W_H$	$\varphi_H$		$U_M$	$W_M$
				$m_B$		
Кутер МК						
1	2,21	0,689	0,166	0,20	1,683	0,627
2	2,44	0,710	0,146	0,30	1,653	0,623
3	2,70	0,730	0,127	0,40	1,650	0,622
4	3,01	0,753	0,111	0,50	1,677	0,627
Кутер ВК						
5	2,06	0,676	0,183	0,25	1,440	0,590
6	2,30	0,697	0,158	0,30	1,540	0,606
7	2,55	0,718	0,154	0,45	1,453	0,592
8	2,98	0,740	0,113	0,40	1,850	0,649

На рис. 3.7,а подана зміна ГНЗ незруйнованої структури фаршу, визначеного за допомогою ротаційного віскозиметра і конічного пластометра. Аналіз отриманих результатів показує, що величини ГНЗ, визначені на різних приладах, мають майже однакові значення. Виключення складає фарш з великим вологовмістом. Це пов'язано з тим, що при вимірюванні ГНЗ фаршу рідкої консистенції глибина занурення конуса збільшувалась. В результаті цього значення ГНЗ вийшли дещо завищеними. При урахуванні поправки на крайові ефекти значення ГНЗ співпали. В протилежність зміні ГНЗ величина ПВ в перший період кутерування знижувалася, досягаючи мінімального значення, а в другому - підвищувалась (рис. 3.7,б). Подібно до ГНЗ, липкість фаршу ( $\rho_0$ , Па) під

час кутерування підвищувалась і, досягнувши максимальної величини, зменшувалась [225].

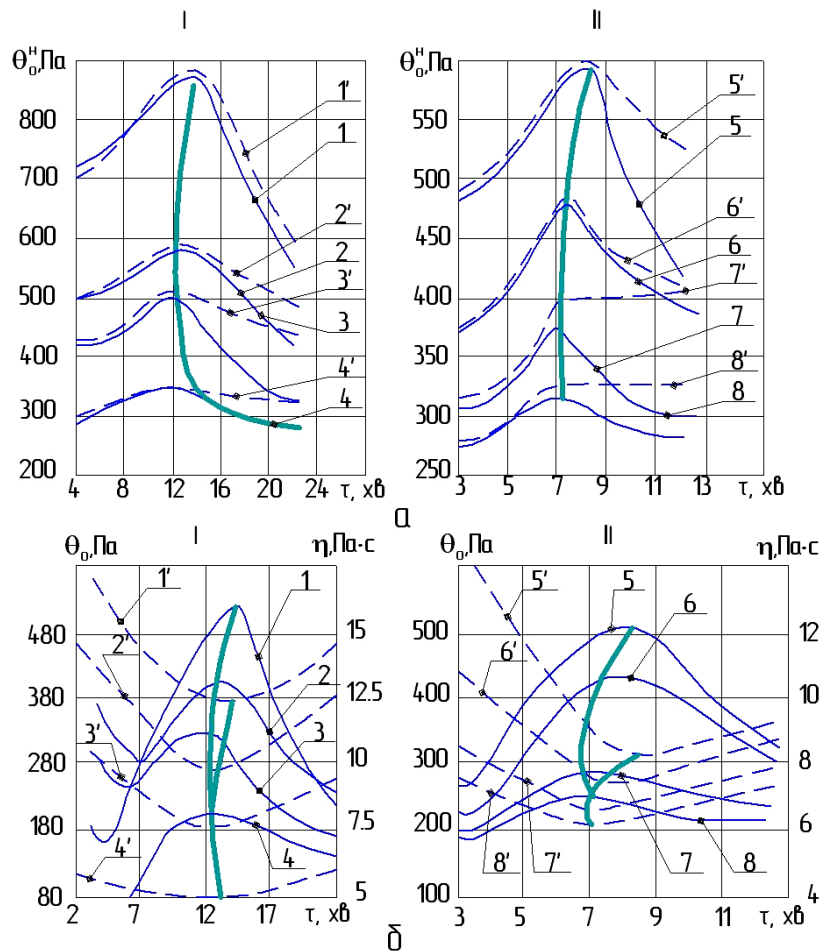


Рис. 3.7 – Зміна пластичної в'язкості (штрихова лінія) і граничного напруження зсуву (суцільна лінія): а - для незруйнованої структури; б - для зруйнованої структури; 1-8 - криві, заміряні на ротаційному віскозиметрі; 1'-8' - криві, заміряні на конічному пластометрі: I - кутер малої моделі; II - кутер великої моделі. Номери кривих відповідають технологічним параметрам, наведеним в табл. 3.6

Аналізуючи результати експериментів можна зробити однозначний висновок, що усі досліджені параметри (ГНЗ, ПВ, В,  $\rho_0$ ) мають екстремальні (максимальні чи мінімальні) величини, які характерні для певної тривалості подрібнення. Час кутерування, за якого структура фаршу при реальному вологовмісті найбільш однорідна і більшість його показників досягає екстремальних значень (кінець першого періоду), а готові ковбасні вироби з цього фаршу мають найкращу якість за консистенцією, є екстремальною тривалістю подрібнення ( $\tau_{к.е.}$ ). Проте, визначений за адгезійними властивостями час  $\tau_{к.е.}$  дещо занижений у порівнянні з отриманими ГНЗ і складає 85-95% від них, що

підтверджується дослідженнями Горбатова А.В. і Спіріна Е.Т. [61]. Це можна пояснити, розглядаючи фізичну сутність ГНЗ і клейкості фаршу. Властивості зсуву фаршу характеризують енергію взаємодії між елементами структури, тобто властивості усього об'єму системи в умовах напруженого стану, а клейкість характеризує енергію вільної поверхні системи. З цього виходить, що властивості зсуву і клейкість не зовсім тотожні. В процесі кутерування максимальне значення властивостей на поверхні (клейкість) досягається швидше, ніж в об'ємі. Тому, не зважаючи на спільність зсувних і поверхневих властивостей фаршу при подрібненні, перевагу треба віддавати першим, тому що вони оцінюють увесь об'єм продукту [61]. З урахуванням того, що метою кутерування є отримання фаршу з міцною структурою і найбільшою водозв'язувальною здатністю, основною характеристикою процесу зі зсувних властивостей є ГНЗ, а не ПВ або ЕВ.

У табл. 3.7 наведені дані, що характеризують фарш за вологовмістом, вологістю і за екстремальними реологічними властивостями. Сировина кожної серії дослідів мала різну вологість: свинина  $0,35 \div 0,45$ , яловичина -  $0,68 \div 0,75$  частин одиниці. Вихід готової продукції також залежить від вологості сировини, тому в експериментах правильніше визначати вихід по відношенню до абсолютно сухої речовини продукту.

За реологічними властивостями (див. табл. 3.7) оптимальний вологовміст ( $U_n^{onm}$ ), при якому забезпечується максимальний вихід за найкращої якості готових виробів, визначається як точка перегину кривих в координатах «екстремальна величина СМХ – вологовміст».

Таким чином, безліч екстремальних точок містить одну характеристичну точку, що відповідає оптимальному режиму, тобто при  $U_n^{onm}$   $\tau_{к.е.}$  мінімальний. Значення  $\tau_{к.е.}$  при  $U_n^{onm}$  є оптимальною тривалістю подрібнення  $\tau_{к.е.}^{onm}$  фаршу. Зі збільшенням вологовмісту  $\tau_{к.е.}$  зменшується, а при  $U_n > U_n^{onm}$  - зростає, що пояснюється збільшенням товщини водно-білкових прошарків між частинками фаршу і, отже, зменшенням сил зчеплення між елементами коагуляційної структури. Частки знаходяться неначе у плаваючому стані, їх відносне зміщення полегшене, а період релаксації зі збільшенням  $U_n$  зменшується. Для подрібнення найкращі умови створюються тоді, коли тривалість впливу ножа на продукт рівна або менша за період релаксації пружних деформацій, тобто продукт можна розглядати як пружно-тверде тіло. При обводненні фарш стає менш пружним, наближаючись до пластичного стану [62].



Таблиця 3.7 – Фізико-хімічні та реологічні характеристики фаршу

Фарш	№ досліджу	Вологовміст, $U_H$	Вологість, $W_H$	Вміст жиру, $\varphi_H$	Кількість доданої води, $m_B$	Реологічні характеристики фаршу (в системі МКС)			
						$\theta_0$	$\eta$	$\theta_0^H$	$\eta^H$
Яловичих сардельок	1	2,750	0,733	0,140	0,300	400	7,70	-	7,82
	2	3,410	0,733	0,115	0,400	340	5,20	515	5,40
	3	3,905	0,796	0,105	0,500	300	3,88	430	4,32
	4	4,075	0,803	0,103	0,600	280	3,40	380	3,70
	5	4,785	0,827	0,097	0,700	200	2,00	295	2,16
Російських сосисок	1	2,086	0,676	0,169	0,250	520	8,30	580	-
	2	2,215	0,689	0,170	0,290	440	7,65	500	-
	3	2,400	0,706	0,178	0,350	320	6,96	425	7,30
	4	2,546	0,718	0,178	0,400	300	6,80	380	-
	5	2,984	0,749	0,154	0,450	260	6,25	325	-
Докторської ковбаси	1	1,480	0,596	0,225	0,100	600	6,35	880	7,63
	2	1,650	0,623	0,226	0,200	430	5,40	700	6,12
	3	1,800	0,643	0,234	0,250	310	4,86	450	4,70
	4	2,060	0,673	0,220	0,300	250	4,40	366	3,43
	5	2,290	0,696	0,213	0,450	200	4,00	300	2,33
Свинячих сардельок	1	1,094	0,522	0,377	0,200	235	3,70	295	2,85
	2	1,240	0,554	0,351	0,400	195	3,20	240	2,45
	3	1,335	0,572	0,342	0,400	160	3,02	200	2,00
	4	1,311	0,567	0,347	0,300	165	3,01	200	2,00
	5	1,449	0,591	0,275	0,500	345	-	455	1,98

Примітка. Характеристики фаршу у досліді № 3 є еталонними.

Таким чином, за реологічними залежностями можна визначати оптимальну тривалість подрібнення і вологовміст фаршу.

Для характеристики ступеня подрібнення, з'ясування сутності цього процесу і причин зміни СМХ були проведені гістологічні дослідження і визначений ефективний діаметр частинок фаршу ( $d_e$ ).

Типові криві розподілу розмірів частинок фаршу подані на рис. 3.8. Подібні криві отримані в усіх дослідіах. За допомогою кривих можна визначити залежності (рис. 3.9) зміни  $d_e$  від  $\tau_k$  і  $U_H$ .

Точка перегину кривих відповідає  $\tau_{к.е.}$ . При побудові залежності  $d_e$  від  $U_n$  при  $\tau_k$  екстремуми на кривих вказують оптимальний вологовміст фаршу. Зміни геометричних характеристик більшості фаршів подібні. Виключення складає фарш з максимальним вмістом жиру (більше 30%), розмір часток якого досягає мінімального значення при  $\tau_{к.е.}$ , а потім збільшується за рахунок утворення крапель жиру.

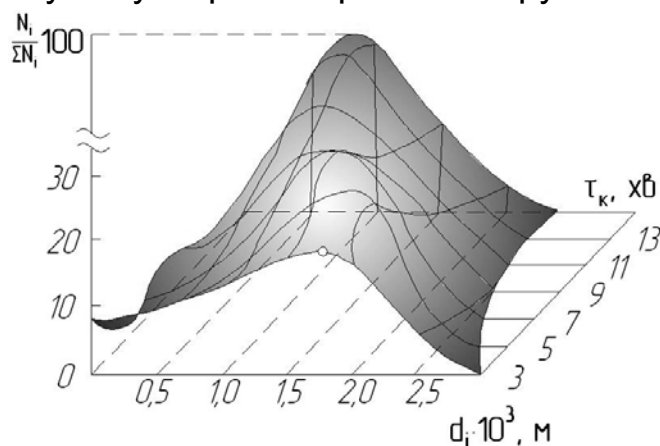


Рис. 3.8 – Кількісний вміст частинок фаршу докторської ковбаси залежно від їх розмірів і тривалості кутерування

Гістологічні дослідження дають можливість отримати критерій загальної оцінки ступеня подрібнення. Гістологічні зрізи м'язових тканин модельно-подрібненої яловичини вищого ґатунку за різної кратності пропускання її через вовчок показують, що підвищення ступеня подрібнення призводить до зникнення поперечної сітчастості волокон (рис. 3.10), які з клітинної структури переходять до аморфного стану.

При одноразовому подрібненні м'яса у полі зору мікроскопа знаходяться шматочки, що мають типову структуру м'яса. Після подальшого подрібнення в полі зору видно частинки м'яса і пустоти, тому що фарш розпушений. Після 15-кратного подрібнення порожнечі зникають, фарш ущільнюється, а частинки важко відрізнити одну від одної, хоча окремі м'язові волокна ще зберігають свою форму. Після 25-кратного подрібнення діаметр м'язових волокон зменшується. Не залишається без зміни і структура м'язових волокон.

Ці зміни залежать від ступеня подрібнення. Форма і пропорції м'язових волокон різні. При одноразовому подрібненні яловичини фарш переважно, складається із шматочків м'язових волокон. При зростанні кратності подрібнення пропорції змінюються і м'язові волокна переходять в аморфну структуру. Якщо у вихідній структурі м'язова тканина має добре окреслені та правильно розташовані ядра, то у аморфному стані поздовжні і поперечні межі волокон зникають.

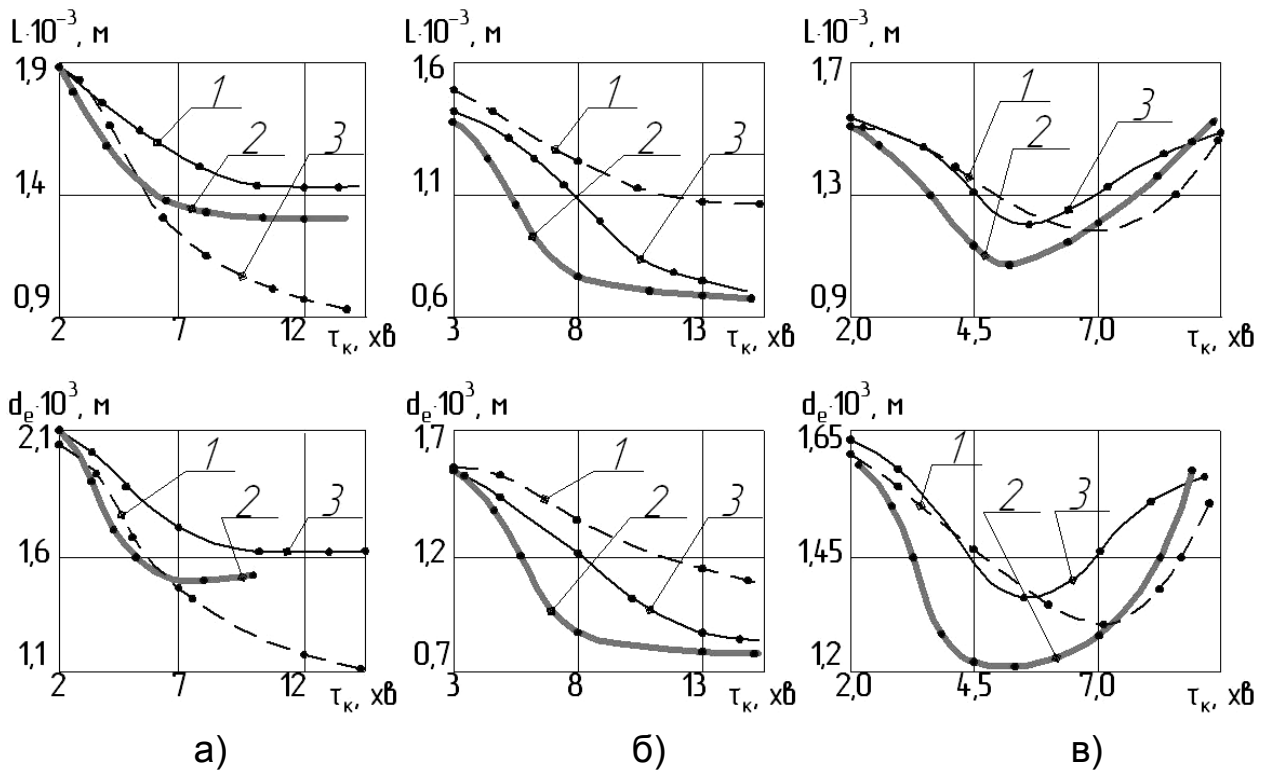


Рис. 3.9 – Лінійні розміри частинок фаршу в залежності від тривалості його кутерування і вологості: а - яловичих сардельок - 1 - 0,796; 2 - 0,803; 3 - 0,827; б - докторської ковбаси - 1 - 0,596; 2 - 0,673; 3 - 0,696; в - свинячих сардельок - 1 - 0,591; 2 - 0,567; 3 - 0,554

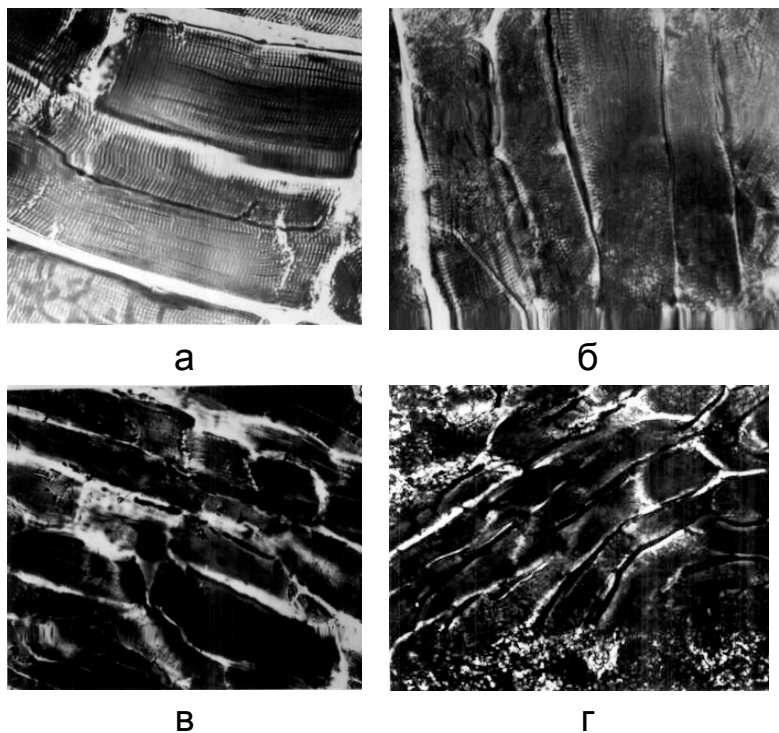
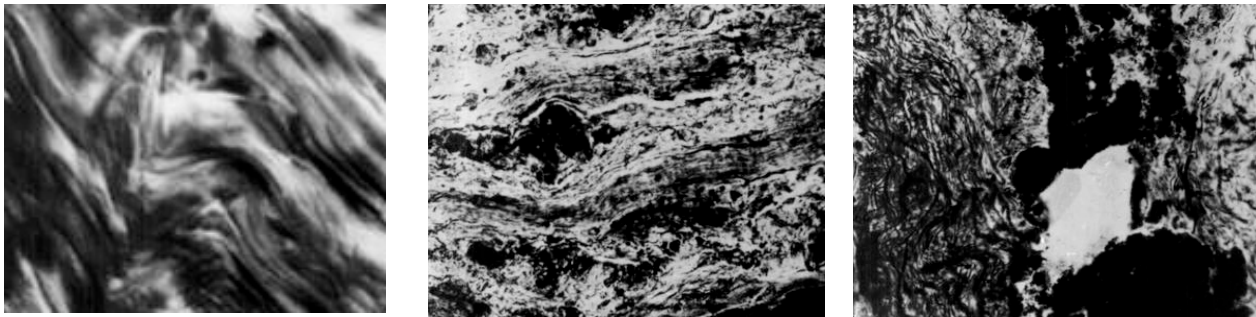


Рис. 3.10 – Гістологічні зрізи м'язових волокон яловичини вищого ґатунку, обробленої за різної кратності подрібнення: а – початковий зразок; б - 5-ти кратне; в - 10-ти кратне; г - 15-ти кратне подрібнення,  $\times 4$



волокна переходять в аморфну речовину, а фарш насичується досить великими повітряними бульбашками овальної або неправильної форми. З'єднувальна тканина, в основному, не руйнується, але максимальний її розмір у перші 5 хв. кутерування таки зменшується. Так, на зрізі при  $\tau_k = 1$  хв. виявлені з'єднувальні елементи, які досягають розміру 0,5 x 3,5 мм, а при  $\tau_k = 3$  хв. їх максимальний розмір складає вже 0,3 x 2,0 мм.

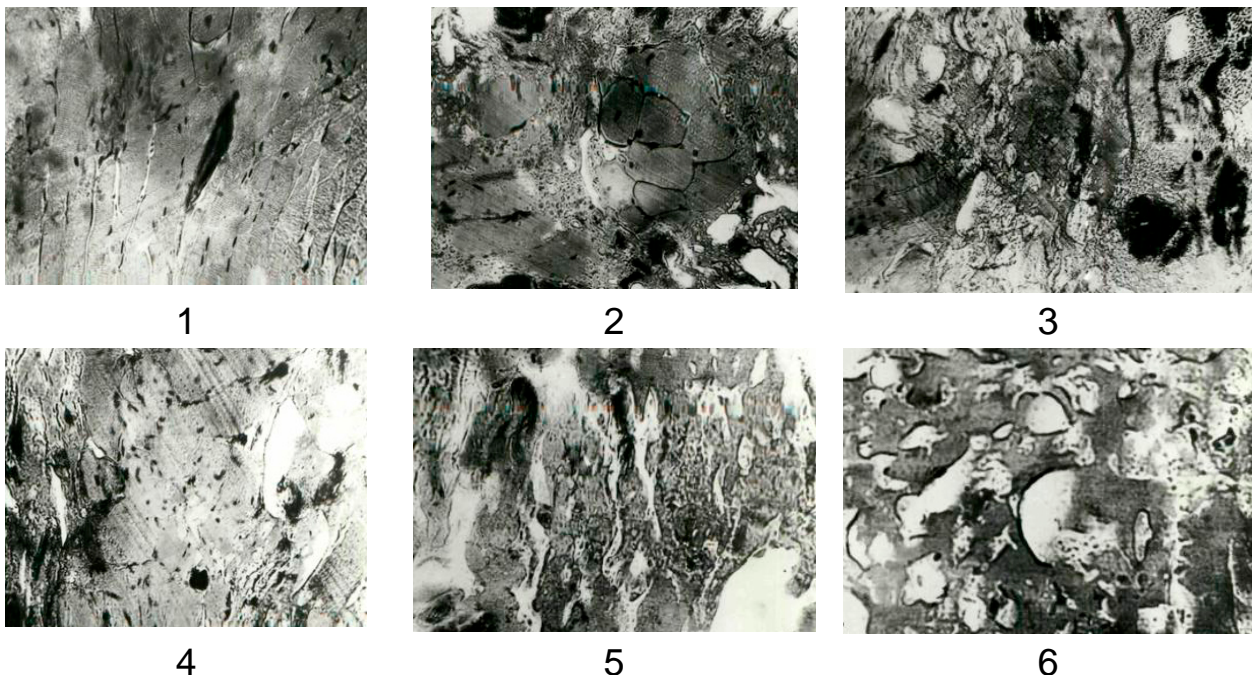


а

б

в

Рис. 3.12 – Мікрорізи з'єднувальної тканини при різній кратності подібнення: а – початковий зразок; б – 3-х кратне подібнення; в – 15-ти кратне подібнення,  $\times 4$



1

2

3

4

5

6

Рис. 3.13 – Гістологічні зрізи зразків фаршу російських сосисок при різній тривалості подібнення: 1 – 1 хв.; 2 – 3 хв.; 3 – 5 хв.; 4 – 6 хв.; 5 – 9 хв.; 6 – 12 хв,  $\times 4$

У перший період подібнення тривалістю 3-5 хв. величина СМХ фаршу збільшується. Розмір з'єднувальної тканини трохи змінюється. Розмір частинок м'язових волокон зменшується в 1,5-2 рази. У цьому періоді відбуваються також колоїдно-хімічні зміни фаршу. Волога повністю насичує м'язові волокна, які набухають і переходять у

безформну аморфну речовину фаршу. На гістологічних зрізах можна бачити перехід м'язових волокон у аморфний стан. М'язові волокна, що залишилися, з певною збереженою окресленістю рівномірно розташовані в основній аморфній масі фаршу. Повітряні бульбашки зменшуються і більш рівномірно розподілені у фарші. Усе це забезпечує зміцнення структури, і відповідно, підвищення рівня СМХ фаршу. Готовий фарш з екстремальними величинами СМХ після кутерування протягом  $\tau_k = 5-6$  хв., в основному, складається зі зруйнованої м'язової тканини. Набрякаючи м'язові волокна переходять в аморфний стан рожевого кольору, в якому розосереджені окремі м'язові волокна та їх шматочки, а також сполучна і жирова тканини.

У другому періоді подрібнення (від 6 до 12 хв.) рівень СМХ знижується. М'язові волокна, що залишилися, подрібнюються і, майже повністю, переходять у безформну аморфну речовину.

Таким чином, гістологічні дослідження розкривають сутність причини зміни СМХ в процесі подрібнення фаршу. Ступінь його подрібнення характеризується ефективним діаметром часток ( $d_e$ ). Криві зміни  $d_e$  від  $\tau_k$  мають точку перегину, розташування якої співпадає з  $\tau_{к.е.}$ , визначеного за допомогою СМХ.

Для визначення впливу тривалості подрібнення ковбасного фаршу на його фізико-хімічні властивості досліджували модельні фарші, приготовлені з довгих м'язів спини яловичини (50%) і свинини (50%). Свинину в наступних дослідженнях замінювали шпиком з розрахунку 10, 20, ... 50%. Кількість води, доданої до фаршу, складала 15÷40% (з інтервалом 5%). Фарш готували з розмороженої сировини на кутері ЛК.

Для з'ясування сутності процесу формування структури ковбасного фаршу були проведені комплексні фізико-хімічні дослідження, що включали визначення розчинності білків у розчинниках з низькою і високою іонною силою, водозв'язувальної здатності і реологічних характеристик фаршу [254].

Розчинність білків визначали після чотирьохкратної екстракції. На початку білки екстрагували фосфатним буфером з іонною силою  $\mu = 0,15$  і рН 7,4, потім фосфатним буфером з іонною силою  $\mu = 1,0$  при рН 7,4, перемішуючи вміст мішалкою впродовж 5 хв. На думку авторів робіт [5, 16] міцність структури ковбасного фаршу визначається, в основному, кількістю розчинених білків і їх фізико-механічними перетвореннями в процесі технологічної обробки, розміром і кількістю жирових частинок і крапель, що утворюються при емульгуванні жиру. Відомо, що білки під впливом різних фізичних і хімічних реагентів легко змінюють структуру



макромолекул, втрачаючи ряд властивостей, зокрема, розчинність. На рис. 3.14 подані результати зміни розчинності білкових фракцій у трьох серіях дослідів. Криві 1,3,5,7 свідчать про те, що процес механічного подрібнення помітно впливає на розчинність м'язових білків у сольових розчинах. При кутеруванні спостерігали два макроскопічні ефекти. На початку збільшувалось виділення розчинних білків (меоплазми, міофібрил) з клітинних структур до максимального значення, а потім - деяке зменшення розчинності. Мабуть на першій стадії процес виділення м'язових білків переважає над денатурацією, а на другій переважає процес селективного нагрівання. Наслідком цих процесів є виникнення або розщеплювання зв'язків між білковими частинками або між білками і розчинником. На другій стадії подрібнення зменшується розчинність через нагрівання білків з подальшою їх агрегацією і коагуляцією, які розвиваються тим більше, чим триваліше подрібнення. Характер зміни кривих 2,4,6,8 при використанні гомогенізатора (рис. 3.14) показує, що зі збільшенням часу подрібнення відбувається рівномірне зменшення розчинності білкових фракцій, що пояснюється локальним перегріванням окремих часток м'яса і денатурацією білків. Очевидно, гомогенізатор значно сильніше впливає на молекулярні і надмолекулярні утворення.

Результати досліджень підтверджують, що максимальна кількість білків, здатних переходити у безперервну фазу фаршу, залежить і від тривалості подрібнення і від складу сировини. Так, максимальна кількість білків з яловичого фаршу переходить з клітинних структур у безперервну фазу на 3 хв. раніше, ніж з багатокomпонентного фаршу, що складається з 50% яловичини, 30% свинини і 20% шпика, що добре узгоджується з даними зміни водозв'язувальної здатності, розмірами частинок сировини і реологічними характеристиками.

Значно впливає на структуру фаршу наявність води. Дослідження зміни розчинності білкових фракцій фаршу (50% яловичини, 30% свинини і 20% шпика) за різного вологовмісту показали, що максимальна кількість білків, що перейшли з клітинних структур у безперервну фазу (білків меоплазми 81%, або білків міофібрил 78% від їх загального вмісту) у фарші з вологовмістом рівним 2,0.

Очевидно (див. рис. 3.14), що кількість білків, екстрагованих розчинником з високою іонною силою, приблизно в 3 рази більша, ніж білків, що екстраговані фосфатним буфером. Можна припустити, що міцні властивості фаршу і його водозв'язувальна здатність залежить від стану білків і, головним чином, міофібрилярних білків, їх здатністю переходити у розчин і утворювати коагуляційну структуру.

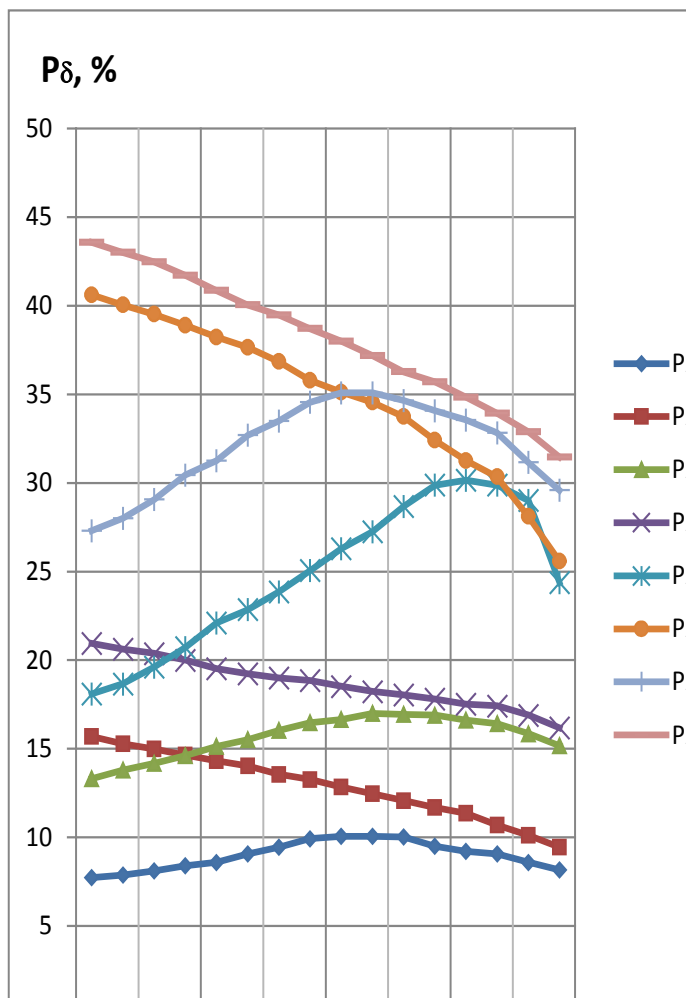


Рис. 3.14 – Трансформація білків, екстрагованих буферними розчинами низької (криві 1-4) і високої (криві 5-8) іонної сили при подрібненні фаршу: 1,5 - криві, що показують зміну білків фаршу (50% яловичини, 30% свинини, 20% шпика з додаванням 20% води) при його подрібненні у кутері; 2,6 - білків того ж фаршу, але з додатковим подрібненням на РТ-2; 3,7 - криві, ілюструючи зміну білків фаршу (100% яловичини з додаванням 20% води) при його подрібненні у кутері; 4,8 - криві, ілюструючи зміну білків того ж фаршу, але з додатковим подрібненням на РТ-2

Водозв'язувальну здатність (ВЗЗ), як об'єктивну властивість зв'язування води з фаршем, установлювали по відношенню невідокремлюваної при пресуванні води до сухого залишку. Зміни ГНЗ, ПВ, ВЗЗ фаршу, в залежності від тривалості подрібнення і вологовмісту, подані на рис. 3.15. Очевидно, що ВЗЗ і ГНЗ під час подрібнення збільшуються, досягають максимального значення, а потім зменшуються. Пластична в'язкість (ПВ) спочатку знижується до мінімуму, а потім збільшується. Таким чином, аналогія зміни реологічних властивостей, водозв'язувальної здатності і розчинності білків дозволяє стверджувати, що міцність структури фаршу залежить від кількості білків, здатних переходити з клітинних структур у безперервну фазу.

Міцність структурної ґратки фаршу залежить від кількості полярних груп, у першу чергу кислих і лужних, які розташовані на поверхні білкових молекул у безперервній фазі. Чим більше цих груп на поверхні білків, тим активніше молекули білка взаємодіють одна з іншою, зв'язуючи краще воду і жир, тим міцніша структурна ґратка фаршу, менше рідини виділяється при нагріванні.



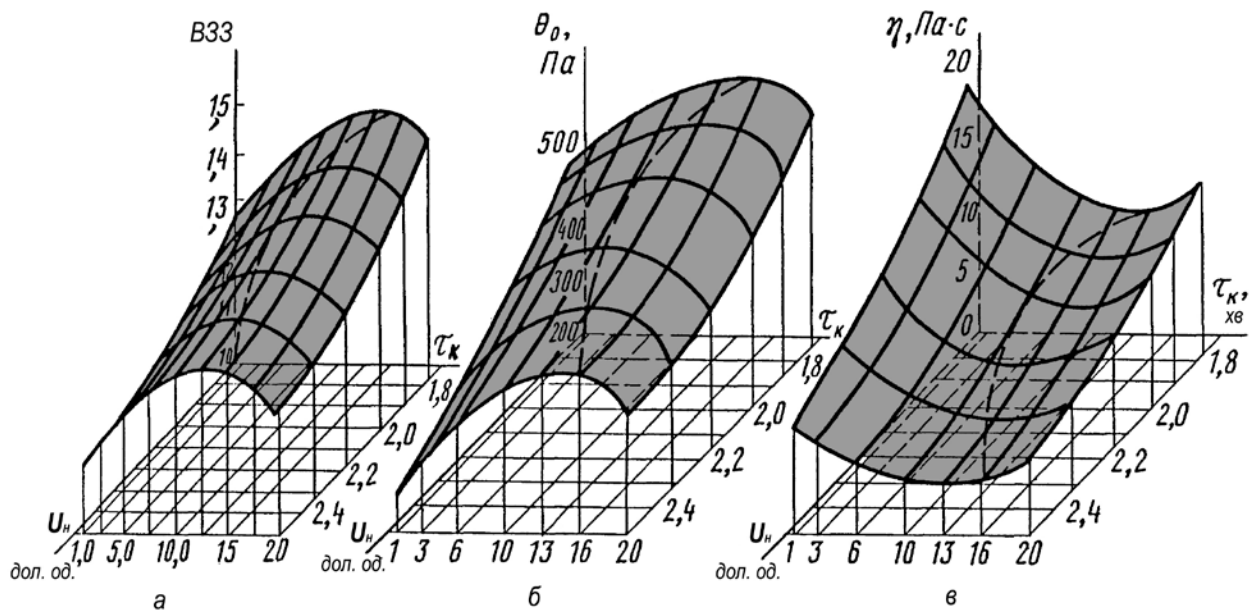


Рис. 3.15 – Зміна водозв'язувальної здатності і реологічних властивостей фаршу в залежності від вологовмісту і тривалості кутерування: а – водозв'язувальної здатності; б – граничних напружень зсуву зруйнованої структури; в - пластичної в'язкості

Дослідження показали, що максимальна кількість кислих, лужних і сульфідрильних груп, що реагують з парахлормеркурбензоатом, спостерігається за екстремальної тривалості подрібнення і критичного вологовмісту (для цього фаршу 2,0). Отже, за таких умов формується найміцніша структурна ґратка ковбасного фаршу. Білки м'ясоплазми емульгують жир і сприяють утворенню найбільш стійкої емульсії [15]. Приведені дані свідчать про те, що характер змін ГНЗ, ВЗ і кількості білків, що переходять у рідку фазу, аналогічний. Тому, саме ці показники можуть бути використані для об'єктивної характеристики фаршу і процесу його подрібнення.

### 3.5.2. Енергетика кутерування

Результати реологічних досліджень, описані вище, дозволяють знайти продуктивність кутера, виходячи з його місткості і  $\tau_{к.е}$ . Знаючи закономірності підвищення температури фаршу при подрібненні і корисну потужність, що забезпечується різальним механізмом, можна розрахувати енергетичні характеристики процесу кутерування. За рахунок енергії, що підводиться до ножів і витрачається на подолання опору сил тертя (95-97%), значно підвищується температура фаршу [51, 220].

У початковий період подрібнення, під час завантаження м'ясної сировини, температура фаршу підвищується в 2-3 рази у порівнянні з вихідною. За сталого режиму подрібнення підвищення температури  $\Delta t$  (°C) можна визначити за рівнянням теплового балансу [112]:

$$\Delta t = \theta / c \cdot m_{\phi} \quad (3.99)$$

Кількість теплоти, яка виділяється в процесі подрібнення фаршу ( $Q$ , Дж), може бути визначена за формулою [112]:

$$Q = A[5 - 2U_H(1 - b \cdot \ln \tau_k)] \quad (3.100)$$

де  $A$  - коефіцієнт, що має розмірність Дж ( $A = 10^6$ );

$b$  - коефіцієнт, залежний від кінематичних характеристик кутера, потужності, яку розвиває різальний механізм,  $\text{хв}^{-1}$  (для кутера МК  $b = 0,217 \text{ хв}^{-1}$ , для куттера ВК  $b = 0,347 \text{ хв}^{-1}$ );  $m_{\phi}$  - маса завантаженого м'яса і води, кг;  $c$  - питома теплоємність ковбасного фаршу, Дж/(кг·°C).

Знання величини " $b$ " дозволяє використовувати рівняння (3.100) для характеристики різних подрібнювальних машин. Долю подрібненого м'яса можна визначити через показник кутерування ( $\psi$ ):

$$\psi = W_{н.сп.} / W_{деф.} = W_{н.сп.} \sqrt{\rho / E} \quad (3.101)$$

де  $W_{н.сп.}$  - колова швидкість, що обчислюється за радіусом ножа до середини глибини його занурення у фарш, м/с;  $W_{деф.}$  - швидкість поширення хвилі деформації у фарші, м/с;  $\rho$  - щільність фаршу, кг/м<sup>3</sup>;  $E$  - модуль пружності стискання, Па.

Розв'язуючи спільно рівняння (3.100) і (3.101), знаходять значення коефіцієнта  $b = 10 \cdot \psi$ .

У виробничих умовах під час кутерування додають лід, тому при розрахунку  $\Delta t$  необхідно ввести поправку на приховану теплоту плавлення льоду. За кількістю теплоти можна визначити потужність, що розвивається різальним механізмом.

$$N = Q / (60 \cdot \tau_k) \quad (3.102)$$

де  $N$  - потужність, що розвивається різальним механізмом, Вт.

В цьому випадку поправку на приховану теплоту плавлення льоду не вводять. Криві зміни потужності в залежності від тривалості кутерування при подрібненні м'яса на кутері МК подані на рис. 3.16,а. Покази ватметра для усталеного періоду (4-6 хв. з початку кутерування) досягають максимальної величини (крива 3). До цього часу основна маса м'яса уже подрібнена. Потім розпочинається спад потужності, згодом

деяка затримка спаду і, при  $\tau_{к.е.}$ , – потужність знову збільшується. Крива 4 побудована за рівняннями (3.99), і (3.102). За початкову прийнята температура фаршу, що досягається після закінчення 4 хв. з початку кутерування. В цей час потужність за ватметром найбільша. При збільшенні  $\tau$  крива 4 монотонно знижується за експоненціальним законом. Варто відмітити, що при перекутеруванні фаршу криві 4 і 3 зближуються. Фарш нагрівається за рахунок сил тертя при різанні і перемішуванні (крива 4). Відрізок, рівний різниці потужностей між кривими 3-4, може характеризувати витрати енергії на різання. Потужність, що обчислюється в залежності від початкової температури м'яса (криві 1 і 2), більша за фактичну, яка визначається за показниками ватметра. Це можна пояснити так. У перший період подрібнення кутер розвиває максимальну потужність, значна частина підведеної енергії переходить в тепло і температура фаршу стрімко підвищується. Запас теплоти, поглинутий фаршем, складається і надалі збільшує уявну потужність. Зміни величини потужності, розрахованої за рівняннями (3.99) і (3.102), приведені на рис. 3.16,б.

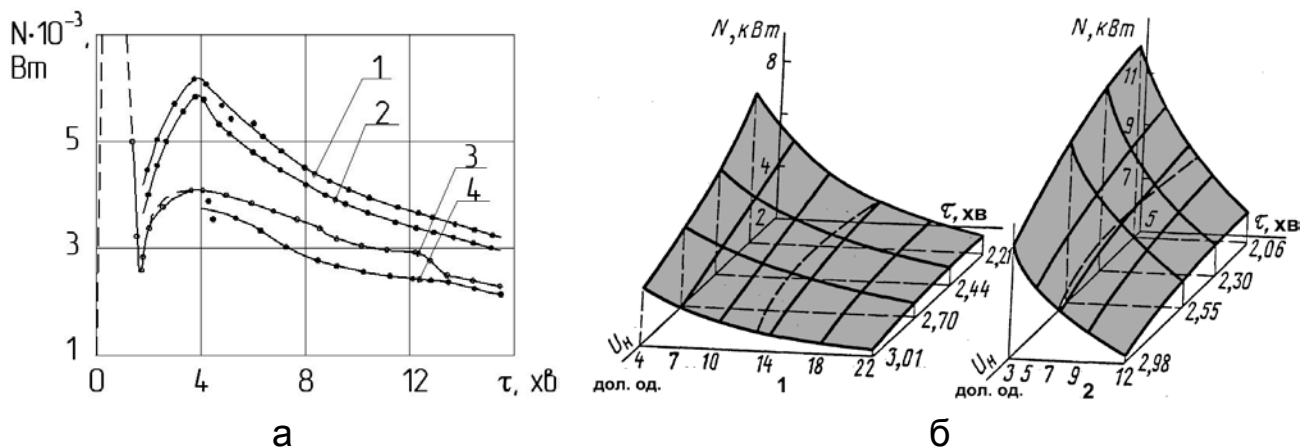


Рис. 3.16. Зміна потужності, що розвивається різальним механізмом кутера, в залежності від тривалості подрібнення фаршу (а) і його вологовмісту (б): а - 1,2,4 – розрахункові криві, відповідно, в центрі чаші кутера, в пристінному шарі і в центрі чаші кутера при температурі фаршу, визначеній після закінчення 4 хв. з початку подрібнення; 3 - крива, записана ватметром за потужністю електродвигуна; б – 1,2 – відповідно, при подрібненні фаршу на малій і великій моделі кутера

Таким чином, в результаті проведених досліджень отримані дані для визначення температури фаршу при кутеруванні, які дозволяють заздалегідь розраховувати температуру фаршу при  $\tau_{к.е.}$  і, якщо вона

виявляється вищою від заданої, вжити заходів до її зниження (додавати лід замість води, переохолоджувати м'ясо тощо). На кривих потужності (за показниками ватметра), представлених на рис. 3.16, існує практично горизонтальна ділянка, яка відповідає  $\tau_{к.е.}$ .

### 3.5.3. Оптимальний вологовміст фаршу і термін кутерування

Бакунцем Г.В. та ін. [32] була зроблена спроба отримання аналітичної залежності для визначення оптимальної тривалості кутерування на підґрунті дослідження процесу з використанням кульового віскозиметра. За комплексну характеристику процесу кутерування був вибраний крутний момент, що утворюється на кульовому віскозиметрі:

$$M = M_0 + [\tau_k / (a + v \cdot \tau_k)] - c \cdot \tau_k^2 \quad (3.103)$$

де  $M_0$  - початковий крутний момент, Н.м;  $\tau_k$  - тривалість кутерування, хв;  $a, v, c$  - емпіричні коефіцієнти, постійні для певного приладу і подрібнювальної машини, але різні для кожного виду фаршу.

Це рівняння аналітично описує два основні періоди кутерування, в якому другий член характеризує утворення первинної структури фаршу, а третій - руйнування первинної структури і утворення вторинної структури. Обидва процеси протікають одночасно. При накладенні одного на іншій виходять типові криві зміни характеристик фаршу з наявністю екстремуму. Завдяки перетворенню рівняння (3.103) ним отримана залежність для обчислення оптимальної тривалості кутерування:

$$\tau_k^{opt} = \sqrt{a / (2 \cdot v^2 \cdot c)} - 2a / 3v \quad (3.104)$$

Проте ця формула не враховує технологічних характеристик фаршу (вологості, жирності) і описує процес частково, що експериментально підтверджується.

Для отримання універсальної математичної залежності, що дозволяється визначити оптимальні величини тривалості кутерування  $\tau_k^{opt}$  і вологовмісту  $U_n^{opt}$  фаршу нами були проведені описані вище комплексні дослідження. На підставі експериментальних даних отримані значення  $\tau_{к.е.}$  для різних видів фаршу в залежності від його вологовмісту  $U_f$  і кінематичних характеристик використаного кутера. На рис. 3.17 подані характерні криві зміни  $\tau_{к.е.}$  від  $U_f$  фаршу, подрібненого на розповсюдженому в м'ясопереробній промисловості кутері Л5-ФКН, за

якими легко знайти оптимальні значення  $\tau_{\kappa}^{opt}$  і  $U_H^{opt}$ , що приведені у табл. 3.8.

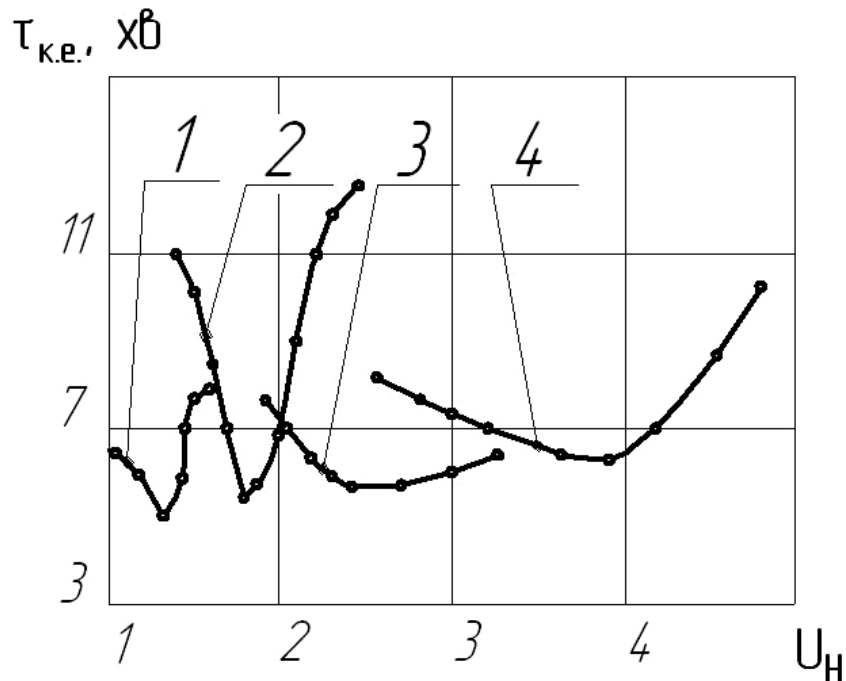


Рис. 3.17 – Залежність екстремальної тривалості подрібнення від вологовмісту фаршу: 1 - свинячих сардельок; 2 - докторської ковбаси; 3 - російських сосисок; 4 - яловичих сардельок

Характеристики фаршу і готових виробів за цих параметрів - еталонні, тому що вони показують за яких характеристик сирого фаршу буде забезпечений максимальний вихід готової продукції при найкращій якості. Крім цього, оптимальний режим подрібнення при еталонних характеристиках фаршу вимагає менших витрат машинного часу, тобто економічно найбільш вигідний не лише за характеристиками ковбасних виробів, але і за енергетичними витратами і забезпеченням найбільшої продуктивності машини. Тому, при регулюванні процесу фаршеприготування, треба дотримуватись еталонних (оптимальних) характеристик. На підставі «еталонних» даних можна зробити висновок, що оптимальний вологовміст в першому наближенні залежатиме від вмісту у фарші яловичини, яка поглинає максимальну кількість вологи [225, 63].

Таблиця 3.8 – Оптимальні технологічні властивості фаршу

Докторської ковбаси ковбаса	Російських сосисок	Яловичих сарделенок	Фарш	Оптимальний вологовміст фаршу, кг води на 1 кг сухого продукту				Оптимальна тривалість подрібнення, хв								
				Вміст яловичини, доп.од.	Вологість, доп.од.	Жирність, доп.од.	К <sub>в</sub>	досліджений	розрахунковий за (3.105)	похибка, %	розрахунковий за (3.107)	похибка, %	дослідна	розрахункова за (3.111)	похибка, %	розрахунковий за (3.114)
0,25	0,50	0,90														
0,643	0,706	0,796														
0,239	0,178	0,106														
0,493	0,657	0,925														
1,800	2,400	3,905														
1,786	2,411	3,896														
0,78	0,46	0,23														
1,820	2,400	3,880														
1,11	0	0,64														
5,20	5,40	6,00														
5,13	5,33	6,00														
1,35	1,30	0														
5,21	5,48	6,00														
0,19	1,48	0														
0,85	0,50	1,52														
				Оптимальний ефективний діаметр частинок $d_e \cdot 10^3, \text{ м}^*$												

\* - за даними гістологічних зрізів

Математична обробка цих даних дозволила отримати наступну залежність:

$$U_n^{opt} = \exp(1,20 \cdot m_{ялов} + 0,28) \quad (3.105)$$

де  $m_{ялов}$  - вміст яловичини в долях одиниць від загальної кількості сировини.

Для точнішого розрахунку  $U_n^{opt}$  на основі експериментальних даних [225, 240] вибрали характеристику  $m_{a.c.}$ , що визначає основний хімічний

склад фаршу. Вона є відношенням маси  $m_{a.c.}$  абсолютно сухих речовин (в основному м'язової тканини) до маси жиру  $m_\phi$ , який міститься у фарші

$$K_B = m_{a.c.}/m_\phi = [1 - (\varphi + W)]/\varphi \quad (3.106)$$

При обробці експериментальних даних, використовуючи цю характеристику в межах від 0,3 до 1, отримаємо залежність для розрахунку  $U_n^{onm}$ :

$$U_n^{onm} = K_C \cdot \exp(1,76K_B - 0,27), \quad (3.107)$$

де  $K_C$  - коефіцієнт, що характеризує термічний стан сировини ( $K_C = 1$  для охолодженого м'яса,  $K_C = 0,9$  для розмороженого м'яса). Для кожної моделі кутера, на основі експериментальних даних, була отримана залежність з визначення  $\tau_k^{onm}$ .

Для отримання залежності з визначення  $\tau_k^{onm}$  для будь-якої конструкції подрібнювальної машини, використовували її узагальнювальну кінематичну характеристику  $\Omega$  яка враховує різальну здатність і кінематику рухомих вузлів (Горбатов А.В.) [61, 65]. Для кутерів  $\Omega$  визначається за наступною залежністю:

$$\Omega = f_0 \cdot W_n^2 / W_\phi = (F_g \cdot z \cdot n_n / m_\phi) \cdot (W_n^2 / W_\phi) = (\pi/30) \cdot [(r_n \cdot n_n)^2 / (m_\phi \cdot R)] \cdot (n_n / n_k) \cdot F_g \cdot z, \quad (3.108)$$

або

$$\Omega = [a_F \cdot z / (60 \cdot \rho)] \cdot (r_n \cdot n_n / R)^2 \cdot (n_n / n_k), \quad (3.109)$$

де  $f_0$  - різальна здатність,  $m^2/(кг \cdot хв)$ ;  $W_n, W_\phi$  - відповідно, колова швидкість ножа по найбільшому радіусу і чаші кутера по вісі обертання ножів,  $m/c$ ;  $F_g$  - площа перетину фаршу ножем за один оберт,  $m^2$ ;  $z$  - кількість ножів, шт.;  $n_n, n_k$  - відповідно, частота обертання ножів і чаші кутера,  $хв^{-1}$ ;  $m_\phi$  - маса фаршу у кутері,  $кг$ ;  $r_n$  - радіус ножа до крайньої точки,  $м$ ;  $R$  - відстань від осі обертання чаші до вісі обертання ножів,  $м$ ;  $a_F$  - коефіцієнт площі;  $\rho$  - щільність фаршу,  $кг/м^3$

Для кутера, за наявності зазору  $h_3$  між чашею та ножами,  $F_g$  визначають за формулою:

$$F_g = F_2 - F_3 = m_\phi / (2\pi \cdot \rho \cdot R) - 1,93 \cdot r_n \cdot h_3 [m_\phi / (\pi \cdot \rho \cdot R \cdot r_n^2)]^{0,41}, \quad (3.110)$$

де  $F_2$  - геометрична площа перерізу шару фаршу в кутері, м<sup>2</sup> (визначають виходячи з рівняння тіла обертання);  $F_3$  - площа зазору між чашею кутера і ножем, м<sup>2</sup>.

Використавши експериментальні дані, отримані нами [225, 226, 220] та іншими дослідниками на різних подрібнювальних машинах [61, 66, 64], отримали узагальнену залежність:

$$\tau_{\kappa}^{onm} = A_1 \cdot K \cdot K_p \cdot [\exp(0,25 \cdot m_{ялов} + 0,46)] \cdot \Omega^{-1}, \text{ хв.}, \quad (3.111)$$

де  $A_1 = 10^5$  коефіцієнт, який має розмірність, м<sup>3</sup>/кг·с;  $K$  - коефіцієнт пропорційності, який враховує нерівномірність зусиль, які необхідні для різання різних сортів яловичини і свинини та визначається з наступної залежності:

$$K = \sum K_{ялов} \cdot m_{ялов} + \sum K_{свин} \cdot m_{свин} + \sum K_{\Pi} \cdot m_{\Pi} \quad (3.112)$$

$$\sum m_{ялов} + \sum m_{свин} + \sum m_{\Pi} = 1, \quad (3.113)$$

де  $K_{ялов}$ ,  $K_{свин}$ ,  $K_{\Pi}$  - коефіцієнти пропорційності відповідно для яловичини, свинини тощо (для яловичини вищого ґатунку  $K_{ялов} = 0,9$ ; 1 гатунку  $K_{ялов} = 0,95$ ; 2 гатунку  $K_{ялов} = 1$ ; для свинини напівжирної  $K_{свин} = 1$ , жирної  $K_{свин} = 0,95$ , жиру сирцю  $K_{свин} = 0,9$ , для меланжу та сухого молока  $\hat{E}_i = 1$ ).

Оптимальну тривалість подрібнення можна виразити також через характеристику  $K_B$  [112]:

$$\tau_{\kappa}^{onm} = A_1 \cdot K_p [\exp(0,326 \cdot K_B + 0,35)] \cdot \Omega^{-1}, \text{ хв} \quad (3.114)$$

Наведені математичні залежності дозволяють розрахувати оптимальні значення вологовмісту і тривалість подрібнення фаршу для будь-яких варених ковбас на кутерах різних моделей.

Для виведення рівняння з визначення СМХ фаршу при  $\tau_{\kappa.e.}$  в залежності від його вологовмісту, жирності, температури і діючого на нього тиску були узагальнені експериментальні дані, отримані нами на ротаційних віскозиметрах при лавинному руйнуванні структури. Дослідження на модельному фарші показали, що СМХ м'язової тканини свинини і яловичини за однакової вологості і ступеня подрібнення практично рівні за величиною. Це набагато спростило наступні дослідження.

У наступних експериментах за основні характеристики сировини були вибрані її вологість і жирність. У проведених експериментах



використовували наступні змінні величини з урахуванням їх можливих виробничих коливань: жирність 0,09÷0,35, вологість 0,52÷0,83 або вологовміст 1,1÷4,9, температура 0÷23°C, кількість води, що додається, 0,1÷0,7 кг/кг і надлишковий тиск (0÷10)·10<sup>5</sup>, Па. Математична обробка даних з використанням ПЕОМ дозволила отримати наступне рівняння:

$$R_e = a_0[1 - a_t(t - 20)] \cdot \exp[a - bU_n(1 - c \cdot \lg Y)], \quad (3.115)$$

$$m = 1,005 + a_t \cdot (t - 20) + a - c \cdot \lg Y, \quad (3.116)$$

де  $R_e$  - екстремальне значення реологічних характеристик фаршу;  $\hat{a}_0$  - апроксимоване значення  $R_e$  (має розмірність в системі МКС) відповідної фізичної величини знежиреного сухого фаршу при  $\tau_{к.е.}$ ;  $a, b, c$  - емпіричні коефіцієнти, які залежать від вмісту жиру у фарші;  $a_t$  - коефіцієнт, що характеризує вплив температури фаршу ( $t=0\div 23^\circ\text{C}$ ) [138];  $Y = (p \cdot 10^{-5} + 1)$  - модуль (числове значення) абсолютного тиску, Па

$$a = a_1 \cdot \varphi_n + a_2 \cdot \varphi_n^2; b = b_1 + b_2 \cdot \varphi_n + b_3 \cdot \varphi_n^2; c = c_1 + c_2 \cdot \varphi_n + c_3 \cdot \varphi_n^2 \quad (3.117)$$

Коефіцієнти до рівнянь (3.115), (3.116), (3.117) наведені в табл. 3.9.

Таблиця 3.9 – Коефіцієнти до рівнянь для розрахунку екстремальних значень СМХ фаршу

Показники	$a_0$	$a_t \cdot 10^2$	$a_1$	$a_2$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$c_1$	$c_2$	$c_3$
$\theta_0$	1480	$5 - (\varphi/W)$	7,0	0,0	0,30	0,00	27,0	0,490	-1,0	0
$B$	30	3,35	0,0	0,0	0,50	0,00	18,0	1,100	0,8	0
$\eta^*$	365	3,35	- 14,0	0,0	1,05	- 2,44	0	0	0	0
$\eta^{**}$	18960	3,35	- 50,0	76,5	1,75	- 0,05	13,7	0	0	0
$m$	0	0,17	-2,2	4,6	-	-	-	- 0,218	1,44	- 3
Примітка:	$\eta^*$ при $0 < \varphi_i < 0,15$ ; $\eta^{**}$ при $0,15 < \varphi_i < 0,4$									

Результати, розраховані по формулами (3.115), (3.116), (3.117), для більш ніж 100 зразків різного фаршу відрізняються, в основному, від експериментальних на величину: для  $\theta_0$  -  $\pm 5\%$ ;  $\eta$  -  $\pm 8\%$ ;  $B$  -  $\pm 7\%$ ;  $m$  -  $\pm 3\%$ . За розрахунками побудовані криволінійні поверхні, що ілюструють залежності СМХ продукту від  $U_n$  або  $W_n$ ,  $\varphi_n$ ,  $p$ ,  $t$  (рис. 3.18, 3.19). За цими величинами можна судити про властивості різного ковбасного фаршу в

широкому інтервалі змінних. Задаючись потрібними характеристиками при заданій температурі, за цими залежностями можна визначити склад (вологівміст і жирність) фаршу і навпаки.

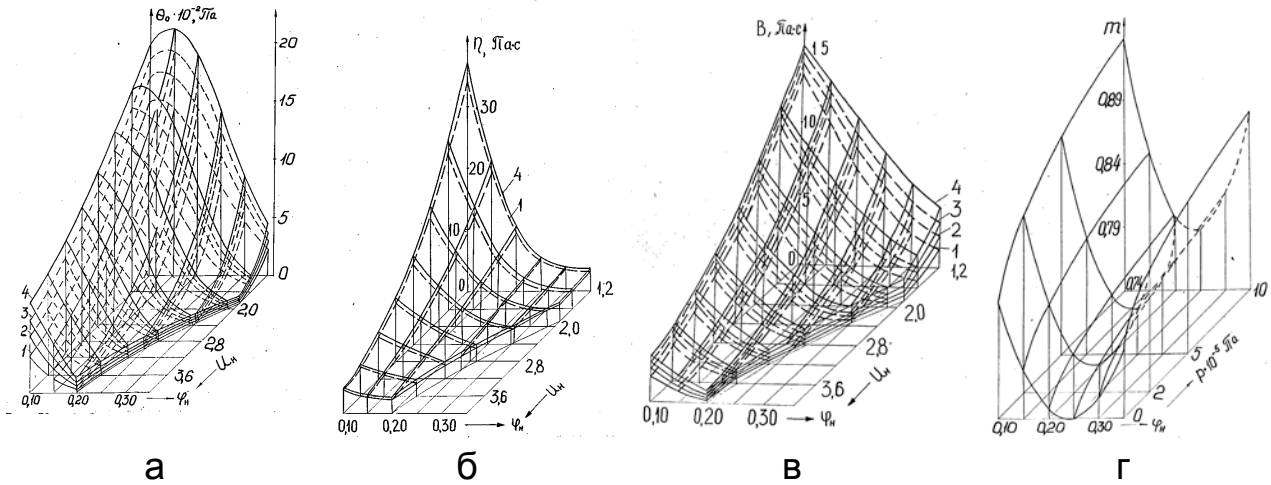


Рис. 3.18 – Залежність граничного напруження зсуву (а) і пластичної в'язкості ковбасного фаршу (б) від вологовмісту, жирності і тиску, ефективної в'язкості при швидкості зсуву 1 м/с (в) і темпу руйнування структури (г) ковбасного фаршу від вологовмісту, жирності і тиску: 1 – 0; 2 -  $2 \cdot 10^5$ ; 3 -  $5 \cdot 10^5$ ; 4 -  $10 \cdot 10^5$  Па

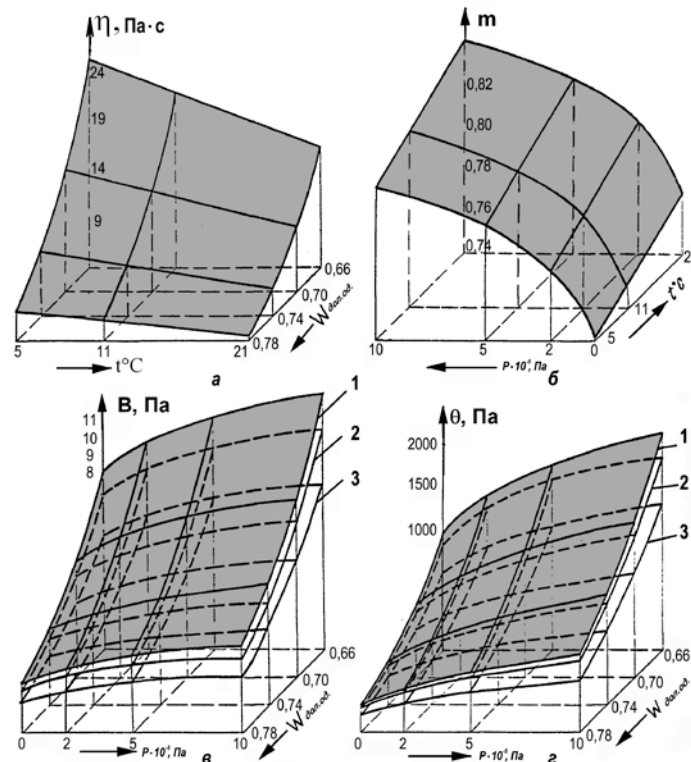


Рис. 3.19 – Залежність зміни СМХ від температури, вологості і тиску: а – пластична в'язкість; б – темп руйнування структури; в – ефективна в'язкість при одиничному значенні швидкості; г – граничне напруження зсуву; 1 -  $5^\circ\text{C}$ ; 2 -  $11^\circ\text{C}$ ; 3 -  $21^\circ\text{C}$

Зміна  $\theta_0$ ,  $\eta$ ,  $B$  в залежності від вологовмісту фаршу викликана збільшенням водно-білкового прошарку. Гістологічні дослідження показали, що розмір м'язових волокон зростає зі збільшенням вологовмісту за рахунок осмотичної дифузії вологи спочатку швидше, потім повільніше. Точка перегину цих кривих для усіх видів фаршу відповідала його оптимальному вологовмісту. Наприклад, розмір м'язових волокон фаршу сосисок російських при вологовмісті  $2,02 \div 2,52$  змінюється від 33 до 46 мкм,  $2,53 \div 2,8$  – від 46 до 48 мкм; для фаршу яловичих сардельок при  $2,57 \div 4,05$  – від 40 до 70 мкм, свинячих сардельок при  $1,06 - 1,42$  – від 30 до 35 мкм. Чим більший вміст жиру у фарші, тим менше м'язові волокна набухають.

Для розрахунку величин СМХ фаршу за різної тривалості кутерування отримана наступна залежність [51]:

$$R/R_e = 1 + K(\tau_k/\tau_{k.e.} - 1)^2, \quad (3.118)$$

де  $R$  - значення однієї з СМХ ( $\theta_0, \eta, B$ ) при заданому  $\tau_k$ ;  $K$  - емпіричний коефіцієнт, який характеризує інтенсивність зміни властивостей при  $\tau_k \neq \tau_{k.e.}$  і рівний, відповідно, для  $\theta_0/\theta_{oe}, \eta/\eta_e, P_0/P_{oe}$  - (-1,5; -1,0; -0,8) при  $0,5 \leq \tau_k/\tau_{k.e.} \leq 1$  і (0,75; -0,60; -0,50) при  $1 \leq \tau_k/\tau_{k.e.} \leq 1,5$ .

Графік, що характеризує залежність відносної зміни властивостей фаршу від відносної тривалості подрібнення, поданий на рис. 3.20.

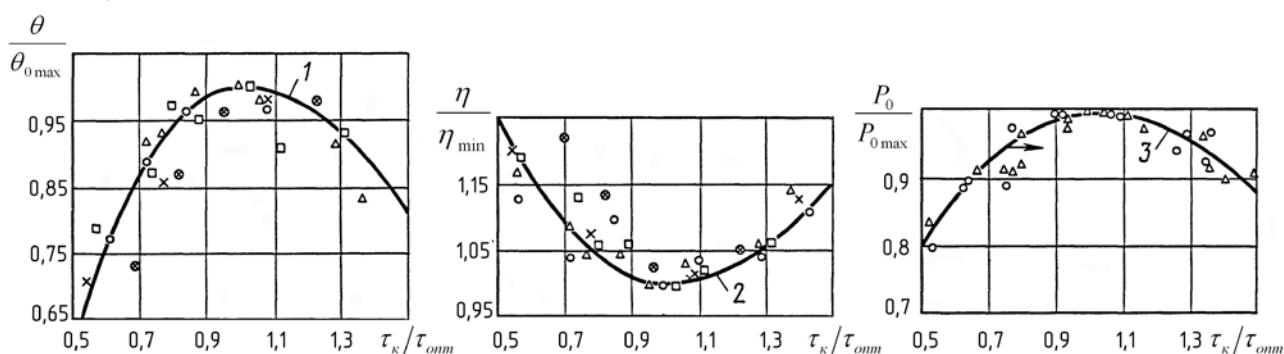


Рис. 3.20 – Відносна зміна властивостей фаршу від відносної тривалості кутерування: 1 – граничного напруження зсуву; 2 – пластичної в'язкості; 3 – липкості

Узагальнюючі аналітичні залежності (3.115), (3.116), (3.117), (3.118) придатні для розрахунку і конструювання обладнання ковбасного виробництва.

Таким чином, в результаті всебічного вивчення процесу тонкого подрібнення встановлено, що на якість готових варених ковбас значною мірою впливає вологість, жирність і ступінь подрібнення фаршу. Корективи, що вносяться в процес на м'ясопереробних підприємствах, наразі цілком залежать від навичок фаршескладача. Подібний підхід не гарантує високої якості готових виробів і не забезпечує стабільного їх виходу. Вимірювання і розрахунок комплексу СМХ з використанням ротаційних віскозиметрів - процес тривалий, що не дозволяє використовувати ці прилади для оперативного управління технологічними процесами.

Для перевірки можливості використання у виробничих умовах напівавтоматичних пластометрів і пенетрометрів, які заміряють найбільш чутливу характеристику реології  $\theta_o^H$ , були проведені дослідження на різному фарші бесшпикових ковбас (15 найменувань). Проби фаршу відбирали при  $\tau_{к.е.}$  на кутері.

Математичною обробкою даних (табл. П.1 додаток П) встановлено, що при однаковому  $U_n$  і  $\varphi_n$ , фарш, що містить меланж у кількості 2÷3% (друга група), має рівень  $\theta_o^H$  на 20% більший, ніж той, у якому меланж відсутній (перша група). Це пояснюється тим, що меланж підвищує силу зчеплення між частками жиру і м'язової тканини. Граничне напруження зсуву визначається із залежності:

$$\theta_o^H = a_0 \cdot \exp\left[4\varphi_n - (0,31 + 0,21\varphi_n^2) \cdot U_n\right] \quad (3.119)$$

Для першої групи фаршу  $a_0 = 2120$ , для другої  $a_0 = 2550$  (похибка не перевищує  $\pm 5\%$ ).

У виробничих умовах отриманими залежностями користуватись досить складно. Тому доцільно запропонувати номограми (рис. 3.21), за допомогою яких можна оцінити якість будь-якого виду ковбасного фаршу для варених ковбас. Знаючи ГНЗ і, наприклад, вологовміст або вологість, легко знайти жирність фаршу. На номограмах для різного ковбасного фаршу вказані зони коливань вологовмісту, жирності і ГНЗ незруйнованої структури. Значення величин, близьких до еталонних показників ковбасного фаршу в кожній зоні, виділені колами.

Користуватися номограмами можна таким чином. Знаючи вид ковбасних виробів, заміряється ГНЗ кожної партії фаршу і результат зіставляємо з номограмою. Якщо заміряна величина потрапляє в коло для цього фаршу, то його якість рівна або наближається до еталонного значення. При відхиленні величини ГНЗ від еталонного значення, якість

фаршу погіршується. По номограмі також можна судити про жирність і вологовміст фаршу і їх відхилення від еталону, що дає можливість корегувати склад наступної партії фаршу.

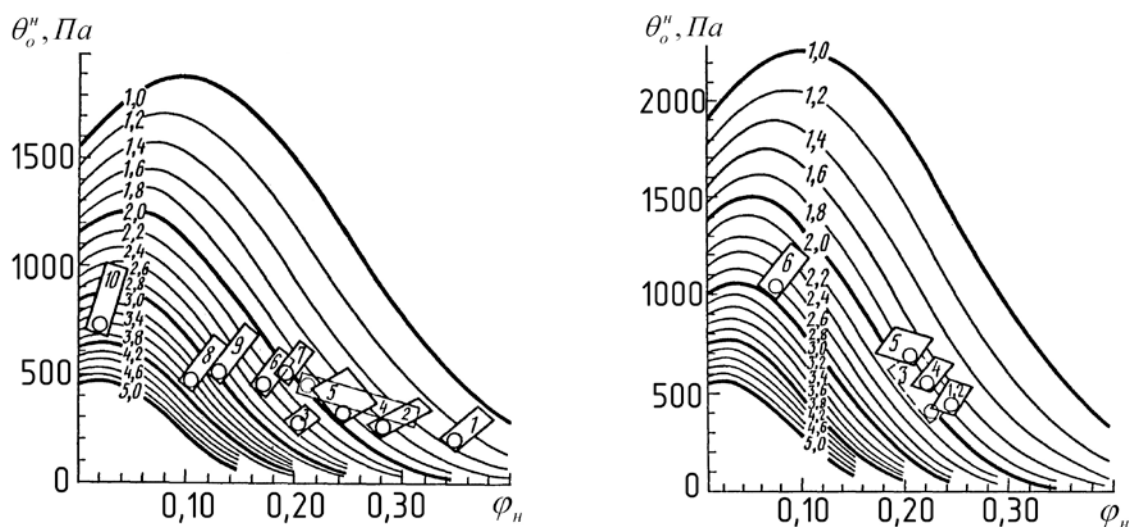


Рис. 3.21 – Номограми для визначення у виробничих умовах вологовмісту, жирності і граничного напруження зсуву незруйнованої структури різного бесшпикового ковбасного фаршу: а – фарш, який в основі містить яловичину і свинину: 1 - сардельок свинячих; 2 - любительських сосисок; 3 - вершкових сосисок; 4 - свинячих сосисок; 5 - свинячої ковбаси 1 ґатунку; 6 - російських сосисок; 7 - столової ковбаси; 8 - яловичих сардельок; 9 - яловичих сосисок; 10 - часникової ковбаси; б - фарш що містить, окрім яловичини і свинини, 2-3% сухого молока і меланжу; 1 - сосисок молочних; 2 - сосисок шкільних; 3 - докторської ковбаси; 4 - молочної ковбаси; 5 - діабетичної ковбаси; 6 - дієтичної ковбаси

Таким чином, якість ковбасного фаршу і готових виробів з нього можна контролювати за величиною ГНЗ, що визначається експрес-методом на приладах типу ПП-1 ÷ ПП-5 (додаток М), або запропонованим нами способом з використанням віскозіметра для вимірювання СМХ фаршу у потоці (додаток Р).

#### 3.5.4. Вплив вакууму на процес подрібнення

Подрібнення фаршу у вакуумі є перспективним напрямком інтенсифікації цього процесу і покращення якості готових виробів [128, 247].

Вакуумування під час подрібнення фаршу на кутері сприяє зниженню загальних питомих енерговитрат на процес і його тривалість, покращує СМХ фаршу і якість готових ковбасних виробів (додаток С).

Збільшення ГНЗ фаршу при зменшенні абсолютного тиску у подрібнювальній камері кутера відбувається за рахунок створення міцнішої структури завдяки виключенню впливу аерації. Крім того, кутерування у вакуумі призводить до збільшення ВЗЗ фаршу та виходу готової продукції. Разом з тим, тиск менший за  $0,25 \cdot 10^{-5}$  Па може призвести до зайвого ущільнення структури ковбас, погіршуючи їх консистенцію і такий процес пов'язаний з зайвими енергетичними витратами [85].

### **3.5.5. Комплексне подрібнення м'яса на кутерах і колоїдних млинах**

Таке подрібнення застосовують для кращого диспергування фаршу, наприклад, при виготовленні ковбасних виробів для дитячого харчування.

Нами для додаткового подрібнення був застосований колоїдний млин КМ-4 «Саксонія-Лейпциг», на якому подрібнювали фарш нової дослідної ковбаси, рецептура якої була розроблена в НУБіП України і включала: 35% жирної яловичини, 60% напівжирної свинини, 2% сухого молока і 3% борошна чи крохмалю (додаток Т).

Сутність і характер змін властивостей фаршів, в залежності від тривалості подрібнення, були аналогічні попереднім.

### **3.5.6. Методи розрахунку оптимальних режимів подрібнення фаршів для безшпикових ковбас**

Запропоновані 2 методи розрахунку режимів подрібнення фаршів для варених ковбас (додаток У).

За першим методом оптимальну тривалість подрібнення визначають з урахуванням зусиль, необхідних для розрізання складових рецептури фаршу, технічних характеристик машини для тонкого подрібнення, оптимального вологовмісту ковбасних фаршів та вологості сировини.

За другим методом оптимальний термін подрібнення визначають з урахуванням вологовмісту і жирності сировини, типу подрібнювальної машини, оптимального вологовмісту готових виробів та кількості вологи, що додається.

### 3.6. Оптимізація технологічних і фізико-механічних характеристик ковбас і м'ясопродуктів

Спосіб подрібнення, форма і розмір частинок фаршу прямо впливають на якість і вихід варених ковбас і м'ясних продуктів, зокрема на кінетику термообробки, термін її виконання, СМХ виробів та інші технологічні показники. З огляду на обмежений об'єм монографії розширений опис проведених досліджень поданий у додатку Ф.

Для проведення досліджень були вибрані чотири види ковбасних виробів, приготовлених з фаршу яловичих і свинячих сардельок, докторської ковбаси і російських сосисок, що включають різні кількості жиру і вологи, технологічні і реологічні характеристики яких подані раніше (табл. 3.7).

Доведено, що мінімальні втрати маси варених ковбас  $m_{ж}$  в процесі термообробки відповідають оптимальним значенням вологовмісту фаршу і тривалості подрібнення. Отримані формули для визначення оптимальної дійсної вологості і жирності ковбасних виробів, які залежать від хімічного складу фаршу і режимів подрібнення.

Визначені об'єктивні показники консистенції готових ковбасних виробів – зусилля і робота зрізу та зминання. Виявилось, що напруження зрізу готового продукту досягає максимального значення за екстремальної тривалості подрібнення фаршу. А зміна відносної міцності зсуву виробів залежить від відносної тривалості подрібнення фаршів.

Робота зминання фаршу залежить від тривалості подрібнення і має екстремальні значення при екстремальній тривалості подрібнення, причому екстремальні величини цієї роботи для фаршу, отриманого на різних подрібнювальних машинах, однакові.

Робота зрізу зразка фаршу при екстремальному терміні кутерування найменша, але для кутерамолої моделі вона більша ніж для кутера великої моделі, що пов'язано з різним ступенем подрібнення з'єднувальної тканини.

Змінюючи СМХ фаршу, на основі об'єктивних критеріїв їх оцінки, можна добитися отримання продукції високої якості. Комплекс СМХ потрібний також для прогнозування якості нових видів продуктів.

Використовуючи чотирьохголкастий індендор та пеннтрометр, а також запропоновану у додатку Ф номограму, легко визначити у виробничих умовах консистенцію готових виробів за пенетраційним напруженням, вологовмістом та жирністю фаршу.

Ковбасні вироби, отримані з фаршу, що подрібнений у кутері, а потім у колоїдному млині за технологічними і фізико-механічними

характеристиками майже не відрізняються від виробів, отриманих з фаршу, подрібненого на одній з вибраних машин. Використання двох машин (кутера і колоїдного млина) дозволяє лише скоротити тривалість подрібнення.

### **Висновки до розділу 3**

1. Структурно-механічні характеристики (СМХ) фаршу, що подрібнюється у машині, залежать від критерію хімічного складу м'яса, що враховує вміст білка, жиру та вологи.

2. Оптимізувати процес подрібнення м'яса для сирокочених і варених ковбас можна постійно контролюючи граничне напруження зсуву (ГНЗ) фаршу в автоматичному режимі.

3. Оптимальний термін подрібнення фаршу на різних м'ясоподрібнювальних машинах залежить від критерію хімічного складу м'яса та узагальненої кінематичної характеристики машини.

4. Ступінь подрібнення фаршу прямо впливає на консистенцію, якість, тривалість сушки сирокочених і втрати маси при термообробленні варених ковбас.

5. Розроблені оптимальні керовані режими фаршеприготування дозволяють отримувати продукти із заданими СМХ.

6. Розроблений метод контролю СМХ фаршу і готових виробів за характеристиками фаршу з використанням номограм.

7. Виявлений взаємозв'язок міцностних (граничне напруження зрізу) енергетичних (робота зрізу і зминання), компресійних (відносна об'ємна деформація, модуль пружності, період релаксації) і зсувних (граничне напруження зсуву, пластична і ефективна в'язкість) характеристик фаршу і готових виробів та ступеня подрібнення сировини.

8. Доведена перспективність використання методів інженерної реології при розробці традиційних і комбінованих м'ясних продуктів з заданими характеристиками.

9. Розроблений спосіб і його апаратне забезпечення для експрес-оцінки СМХ фаршів в процесі кутерування.

10. Розроблена методика інженерного розрахунку оптимальних режимів подрібнення м'яса. Запропонований математичний апарат, який дозволяє прогнозувати якість (консистенцію) готової продукції за СМХ фаршу, що створює передумови для розробки нового асортименту ковбасних виробів з наперед заданими властивостями та дозволяє забезпечити оптимальний термін подрібнення на машинах з різною різальною здатністю.



11. Ступінь подрібнення дисперсного середовища фаршу для сирокочених ковбас впливає на тривалість їх сушки, яку можна скоротити майже на 21%.

12. За кривими потужності, що розривається різальним механізмом кутера (вимірюється ватметром) можна у першому наближенні визначити необхідну тривалість кутерування фаршу.

13. Подрібнення фаршу під вакуумом покращує СМХ фаршу та якість варених ковбасних виробів, але тиск, менший за  $0,25 \cdot 10^{-5}$  Па може призвести до зайвого ущільнення структури, погіршити консистенцію варених ковбасних виробів та спонукати до зайвих енерговитрат.

14. Мінімальні втрати маси варених ковбас в процесі термообробки відповідають оптимальним значенням вологовмісту фаршу і тривалості подрібнення.

## **РОЗДІЛ 4. ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ МАТЕМАТИЧНОГО І ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПОДРІБНЕННЯ М'ЯСНОЇ СИРОВИНИ**

### **4.1. Фізико-технічні основи подрібнювальних процесів**

#### **4.1.1. Способи подрібнення матеріалів**

Не зважаючи на безліч процесів, що відбуваються при різанні (стискання, зминання, зсуву, зрізу та ін.), їх сумарна дія спрямована на здійснення процесу подрібнення, під яким розуміється розділення матеріалу на частини під дією зовнішніх механічних сил. Якщо цей процес зменшення розмірів початкової сировини відбувається без надання певної форми готовому продукту, то це подрібнення, інше - різання.

Специфічність поведінки матеріалів в процесі руйнування зумовила велику кількість класифікаційних ознак цього процесу і навіть виникли відносно чіткі розмежовані самостійні науково-технічні дисципліни: різання металів, деревини, сировини органічного походження та ін. Проте запропонована вже у наш час Желиговским В.А. і розвинена Резником Н.Е. класифікаційна схема якнайповніше відбиває характерні особливості взаємодії інструменту і матеріалу, ефекти, обумовлені специфічними параметрами інструменту. Згідно з цією схемою руйнування розглядається як різання пуансоном (просічення, обрубання, ділення, штампування), різцем (точіння, стругання, фрезерування, пиляння, свердління, довбання, шліфування, шабріння, лущення) і лезом.

Для різних матеріалів в різній мірі може бути застосований той або інший вид різання. Таким чином, класифікація видів різання за технологічними ознаками припускає ґрунтовне вивчення і оцінку фізико-механічних і, головним чином реологічних властивостей матеріалів, дозволяє розглядати науку про різання, що складається з трьох відособлених розділів: різання пуансоном, різання різцем, різання лезом.

Основоположник теорії різання академік Горячкин В.Н. виділив два різновиди різання лезом: за допомогою нормального переміщення різального інструменту і за допомогою переміщення його по двох взаємно перпендикулярних напрямках (нормальному і дотичному), які в літературі відрізняються як статичне або нормальне різання (рубання) і ковзаюче різання (різання). Що ж стосується значення кута ковзання леза для роботи і, тим більше, питомої роботи різання, то з цього приводу є різні точки зору. В. А. Желиговский [83] дійшов висновку, що

найменша питома робота має місце при рубаючій дії леза. За його даними, при збільшенні кута ковзання питома робота зростає спочатку повільно, а після досягнення ним  $70^\circ$  все інтенсивніше. Експериментальні дослідження Н.Е. Резника [196] показали, що збільшення значення кута ковзання леза в певних межах вигідне в енергетичному відношенні. За даними А.І. Пелеєва [169, 171], при різанні м'яса, значне зменшення енерговитрат спостерігається при куті ковзання леза  $\beta=45-60^\circ$ .

#### **4.1.2. Сучасна класифікація подрібнювальних процесів**

Розглянемо енергетичний підхід до класифікації процесів подрібнення харчових продуктів, і, зокрема, м'яса.

Руйнування структури матеріалу пов'язане з енергетичною взаємодією джерела енергії і матеріалу, який руйнується. Перенесення енергії можливе або у вигляді імпульсу сили при безпосередньому контакті, або у вигляді кванта випромінювання. Енергетична дія зовнішніх сил на матеріал, який руйнується, може супроводжуватися перенесенням маси, теплоти, емісією електронів та іншими фізико-хімічними ефектами, утворюючи усерізноманіття способів руйнування, які відомі сьогодні. Способи передачі енергії руйнованому матеріалу наступні.

*Масові.* Силу дію формують гравітаційні, відцентрові або інерційні сили.

*Хімічні способи* диспергування засновані або на об'ємному розширенні продуктів хімічної реакції, наприклад, у разі вибуху, або на втраті енергії зв'язку, хімічної спорідненості частини матеріалу з основним масивом, як у разі окислювальної ерозії.

*Мікробіологічні способи* диспергування засновані на хімічній або ферментативній дії бактерій, плісняви і рослин на матеріал.

*Гідродинамічні способи*, рушійною силою яких є тиск струменя рідини або газу, або перепад тиску в об'ємі руйнованого тіла.

Очевидно з вищеперерахованого, класифікація є узагальненим перерахуванням уже відомих методів впливу на матеріал, який диспергується. Разом з тим, впорядкування цих способів за дрібнішими ознаками і групами дозволяє визначити "осередки", які не заповнені сьогоднішнім рівнем знань та передбачити нові шляхи інтенсифікації і нові способи диспергування матеріалів шляхом комбінації вже відомих.

Серед методів силового впливу на матеріал варто розрізняти методи, які викликають плоский або лінійний напружений стан (рис. X.1

додаток X) та методи, що викликають об'ємний деформований стан. Класифікація за такими ознаками не може бути надійним підґрунтям для проектування м'ясорізальних машин. Саме тому застосовують таку велику кількість їх різновидів для подрібнення однакової сировини. Адекватний підхід до розробки ефективного подрібнювального обладнання може забезпечити його класифікація, що аналізує механізм навантаження одиначної частини руйнованого матеріалу [225], яка у подрібнювальній машині може піддаватись стисканню, розтягуванню, згинанню, крученню, зсуву (додаток X). При цьому напруження, які розриваються у матеріалі, зокрема у м'ясі та м'ясопродуктах, залежать не лише від виду напруженого стану, але і від характеру зміни навантаження, що розвивається у часі (статично, динамічно).

Особливим видом динамічної силової дії на тіло є вібраційне навантаження, що дозволяє досягти граничного напруження руйнування навіть у разі дії сили меншої інтенсивності, порівняно із статичним навантаженням, особливо якщо вона діє з резонансною частотою. Такі процеси все частіше застосовують при подрібненні м'яса (додаток X), зокрема, у колоїдних млинах, де проявляється дія кавітації [198].

#### **4.1.3. Ефективність подрібнювально-змішувальних процесів у харчових технологіях**

Для виявлення міри ефективності різних способів подрібнення необхідно відповісти на наступні питання: які завдання процесу подрібнення в період підготовки матеріалу до змішування і безпосередньо в камері технологічного апарату і яким вимогам повинні відповідати оптимальний подрібнювач?

При рішенні технологічних і споживчих завдань основною проблемою подрібнення і змішування є отримання максимальної кількості кінцевого продукту в мінімальні терміни при мінімальних витратах енергії та належної якості. Деяким інтегральним показником ефективності процесу змішування може служити величина [107, 92, 0].

$$\varepsilon = \frac{V \cdot J}{\tau \cdot N}, \text{ або } \varepsilon = \frac{Q \cdot J}{N}, \quad (4.1)$$

де  $V$  – об'єм змішувача, м<sup>3</sup>;  $Q$  - об'ємна продуктивність змішувача, м<sup>3</sup>/с;  $\tau$  - час, с;  $N$  - витрати усіх видів енергії на процес, Вт;  $J$  - критерій якості змішування.

Критерій  $J$  може бути визначений по одному з відомих виразів, наприклад [58, 92]

$$J = \frac{\sigma^2}{S^2}, \quad (4.2)$$

де  $\sigma^2$  - генеральна дисперсія розподілу ключового компонента в суміші;  $S^2$  - дисперсія абсолютно не змішаної системи.

Аналіз якісно-енергетичного показника ефективності змішування  $\varepsilon$  показує, що його підвищення можливе або шляхом скорочення часу досягнення заданого технологічного результату  $\tau$ , або зниженням витрат потужності на процес  $N$ . Таким чином, подрібнювач - змішувач для досягнення максимальної ефективності процесу повинен відповідати наступним вимогам:

- максимальна кількість поверхонь зсуву, що утворюються за одиницю часу;
- максимальна кількість складових рухів робочого органу, що дозволяють надавати групам часток поступальне і обертальне переміщення відносно площин зсуву і одній навколо іншої;
- максимальна швидкість поновлення поверхні поділу фаз при не сталому, турбулентному характері їх руху;
- адаптивність елементів поверхні робочого органу, яка забезпечує мінімальний опір його переміщенню в просторі і самоустановлювальний характер миттєвого положення в середовищі під дією зовнішнього опору;
- комбінація різних видів і способів підведення енергії на компенсацію зміни потенційного положення часток, розривань внутрішніх зв'язків і дифузійне перенесення;
- мінімальні витрати на дисипацію енергії в тепло.

При одночасному рішенні завдань подрібнення і диспергування окремих компонентів суміші додатковими вимогами до подрібнювача-змішувача будуть:

- високі локальні градієнти зсуву і тиску;
- безперервність подання частинок в зону подрібнення і відведення з цієї зони.

Найчастіше для оцінки ефективності роботи подрібнювачів за критерій використовують коефіцієнт корисної дії

$$\eta = \frac{A_{II}}{A_{II} + A_y + A_o}, \quad (4.3)$$

де  $A_{II}$  - робота утворення нової поверхні, Дж;  $A_y$  - робота пружної деформації;  $A_o$  - робота пластичної деформації.

Цей показник фізично цілком обґрунтований, оскільки показує відношення корисних витрат енергії до загальних. Разом з тим, практичне застосування критерію ускладнене, оскільки правильно оцінити величину корисних робіт практично неможливо. Для розрахунку  $A_{II}$  у формулі Ребіндера необхідно знати величину коефіцієнта пропорційності  $K_s$ , інформація про який також обмежена:

$$A_{II} = K_s \cdot \Delta S, \text{ Дж} \quad (4.4)$$

де  $\Delta S$  - приріст площі нової поверхні,  $\text{м}^2$ ,  $K_s$  - коефіцієнт пропорційності.

Щоб уникнути труднощів теоретичного розрахунку  $A_{II}$  багато авторів вводять в розгляд непрямі параметри енергетичної ефективності. Наприклад, при порівнянні молоткових дробарок запропонований показник питомого завантаження ротора  $P_{II}$ :

$$P_{II} = \frac{N}{D \cdot L}, \text{ кВт/м}^2 \quad (4.5)$$

де  $N$  - споживана потужність, кВт;  $D$  - діаметр ротора, м;  $L$  - активна довжина ротора, м.

Фізично цей показник відповідає енергонапруженості одиниці площі діаметрального перерізу дробарки. У такому вигляді цей показник не може бути застосованим до інших видів подрібнювачів.

Для кульових млинів широко використовують показник питомої продуктивності  $\Pi_{II}$ , що є відношенням продуктивності млинів  $G_M$ , т/год до об'єму його корпусу  $V_A$ ,  $\text{м}^3$ :

$$\Pi_{II} = \frac{G_M}{V_A}, \text{ т/м}^3 \quad (4.6)$$

Продуктивність подрібнювачів, виражена в кілограмах або тоннах за годину, ніяк не характеризує ефективність їх роботи. В цьому відношенні більше обґрунтовано виражати продуктивність в абсолютному прирості нової поверхні  $\Delta S$   $\text{м}^2/\text{год}$ . Проте вимір приросту поверхні ускладнений і тому в практичних розрахунках навряд чи знайде широке застосування. Виразимо приріст поверхні  $\Delta S$  через характеристики матеріалу і продуктивність подрібнювача. Питому поверхню дисперсного матеріалу  $S_d$  розраховують за формулою [246]:

$$S_d = \frac{S_M}{V_M} = \frac{n6\pi d_e^2}{n\pi d_e^3} = \frac{6}{\psi \cdot d_e}, \text{ м}^2/\text{м}^3 \quad (4.7)$$

де  $S_M$  - зміна сумарної площі поверхні часток матеріалу в одиницю часу  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $V_M$  - об'ємна продуктивність подрібнювача,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $n$  - рахункова

кількість часток;  $\psi$  - чинник форми частки - відношення площі поверхні частинки неправильної форми до площі поверхні еквівалентної за об'ємом сфери діаметром  $d_e$ ;  $d_e$  - середній еквівалентний діаметр частки матеріалу, м.

Визначаючи з формули (4.7)  $S_M$ , отримаємо:

$$S_M = \frac{6V_M}{\psi \cdot d_e} \text{ або } S_M = \frac{6G_M}{\psi \cdot d_e \cdot \rho_M}, \quad (4.8)$$

де  $\rho_M$  - істинна щільність матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $G_M$  - масова продуктивність подрібнювача, кг/с;  $V_M$  - об'ємна продуктивність машини, м<sup>3</sup>/с.

Тоді приріст площі поверхні за одиницю часу визначиться так:

$$\Delta S = S_{M_2} - S_{M_1} = \frac{6G_M}{\rho_M} \left( \frac{1}{\psi_2 \cdot d_{e_2}} - \frac{1}{\psi_1 \cdot d_{e_1}} \right), \text{ м}^2/\text{с} \quad (4.9)$$

Введемо поняття міри подрібнення  $i$ :

$$i = \frac{d_{e_1}}{d_{e_2}}, \quad (4.10)$$

де  $d_{e_1}$ ,  $d_{e_2}$  - відповідно, середній початковий і кінцевий розмір часток подрібнюваного матеріалу.

З урахуванням (4.10) формула (4.9) приймає вигляд:

$$\Delta S = \frac{6G_M}{\psi_1 \cdot \rho_M \cdot d_{e_1}} \left( \frac{\psi_1 \cdot i - 1}{\psi_2} \right) \text{ або } \Delta S = \frac{6G_M}{\psi_2 \cdot \rho_M \cdot d_{e_2}} \left( \frac{\psi_1}{\psi_2} - \frac{1}{i} \right), \quad (4.11)$$

Як правило, форма часток матеріалу до і після подрібнення різна, але у тих випадках, коли цією зміною можна нехтувати, формула (4.11) значно спрощується:

$$\Delta S = \frac{6G_M}{\psi \cdot \rho_M \cdot d_e} (i - 1) \quad (4.12)$$

У формулу (4.12) входять найчастіше вживані в промисловій практиці параметри: продуктивність  $G_M$ , міра подрібнення  $i$ , щільність матеріалу  $\rho_M$ , початковий розмір шматків  $d_{e_1}$  а чинник форми  $\psi$  є табличною величиною, відомою для різних класів матеріалів.

З урахуванням наведених вище міркувань сформулюємо визначення параметра енергетичної ефективності.

Параметр енергетичної ефективності - це відношення технологічного результату подрібнення ( $\Delta S$ ), який забезпечується, до сумарних енергетичних витрат в одиниці робочого об'єму подрібнювача:

$$\varepsilon = \frac{\Delta S}{V_A \cdot N} \quad (4.13)$$

Цей показник має розмірність 1/м·Дж або с/Нм<sup>2</sup>. Тобто цей параметр показує приріст нової поверхні в одиниці об'єму подрібнювального простору на одиницю витраченої роботи в одиницю часу. З урахуванням формули (4.12)

$$\varepsilon = \frac{6G_M \cdot (i-1)}{\psi \cdot \rho_M \cdot d_{e_1}}, \text{ м}^2/\text{кг} \quad (4.14)$$

Тоді значення критерію якості подрібнення  $I$  може бути подано у вигляді

$$I = \frac{6(i-1)}{\psi \cdot \rho_M \cdot d_{e_1}}, \text{ м}^2/\text{кг} \quad (4.15)$$

З урахуванням розмірності критерію якості  $I$ , формулу можна привести до безрозмірного виду

$$\varepsilon = \frac{G^3 \cdot I}{\rho_M \cdot V_A \cdot N} \quad (4.16)$$

Запропонований показник може бути використаний для порівняння будь-яких видів подрібнювального устаткування, вживаного для переробки одного і того ж матеріалу. При порівнянні машин для подрібнення різних матеріалів у формули (4.15), (4.16) необхідно ввести параметр, який характеризує міцність матеріалу

$$\varepsilon = \frac{\Delta S \cdot \Pi_{PS}}{V_A \cdot N}, \text{ 1/м}^3 \quad (4.17)$$

де  $\Pi_{PS}$  - показник міцності матеріалу, Дж/м<sup>2</sup>.

Величина  $N/\Delta S$  також побічно характеризує міцність подрібнюваного матеріалу, оскільки за визначенням

$$\Pi_{PS} = \frac{A_S}{S_M}, \quad (4.18)$$

де  $A_S$  - робота руйнування, Дж;

$S_M$  - площа утвореної поверхні матеріалу, м<sup>2</sup>.

Вважаючи, що основну долю в роботу руйнування вносить робота пружної деформації, то для усього об'єму матеріалу  $V_M$  можна записати [225, 246]:

$$A_S = \frac{\sigma^2 V_M}{2E}, \quad (4.19)$$



З урахуванням формули (4.19) критерій, що враховує приріст площі поверхні подрібненого матеріалу і його міцнісні властивості прийме вигляд:

$$I = \frac{6(i-1) \cdot \Pi_{PS}}{\rho_M \cdot \psi \cdot d_{e1}}, \text{ Дж/кг} \quad (4.20)$$

з урахуванням формул (4.19) і (4.20)

$$I = \frac{3(i-1) \cdot \sigma^2 \cdot V_M}{\rho_M \cdot \psi \cdot d_{e1} \cdot S_M \cdot E}, \quad (4.21)$$

а з урахуванням раніше записаного співвідношення

$$I = \frac{(i-1) \cdot \sigma^2}{\rho_M \cdot 2E}, \text{ м}^2/\text{с}^2 \quad (4.22)$$

де  $\sigma$  - межа міцності матеріалу, Па;

$E$  - модуль Юнга, Па.

Параметр  $\varepsilon$  буде тим вищим, чим більший приріст нової поверхні буде досягнутий для міцніших матеріалів при менших енергетичних витратах і мінімальному об'ємі подрібнювальної камери.

Апроксимація залежності параметра енергетичної ефективності  $\varepsilon$  від продуктивності подрібнювача по готовому продукту  $V_M$  виконана нами з використанням електронних таблиць Excel. Залежність апроксимується степеневою функцією виду

$$\varepsilon = n \cdot V_M^{-1}, \quad (4.23)$$

де  $n$  – чисельний коефіцієнт (змінюється в межах від 1200, для верхньої межі точок, до 1 - нижня межа).

На рис. 4.1 подані порівняння табличних даних і розрахованих за формулами (суцільна лінія) при  $n = 15$ . Середньоквадратичне відхилення  $R^2 = 0,7142$ . Об'ємна продуктивність подрібнювача за готовим продуктом у формулі (4.23) стоїть в чисельнику ( $V_M = G_M/\rho$ ), тому логічно чекати прямої пропорційності  $\varepsilon$  і  $V_M$ , проте вплив інших параметрів, що в свою чергу є функцією потужності, призводить до обернено пропорційної залежності.

Проведений за допомогою запропонованого параметра аналіз подрібнювачів [225, 92] засвідчив, що найбільш ефективними подрібнювачами-змішувачами є кавітаційні. Разом з тим, їх використання не обов'язково гарантує отримання якісного кінцевого продукту, яка оцінюється не лише за дисперсністю частинок, ступенем їх перемішування, але і за цілим рядом інших показників. Для м'ясних

фаршів – це реологічні властивості, волого утримуюча здатність, втрата маси при термообробці тощо (див. розділ 3).

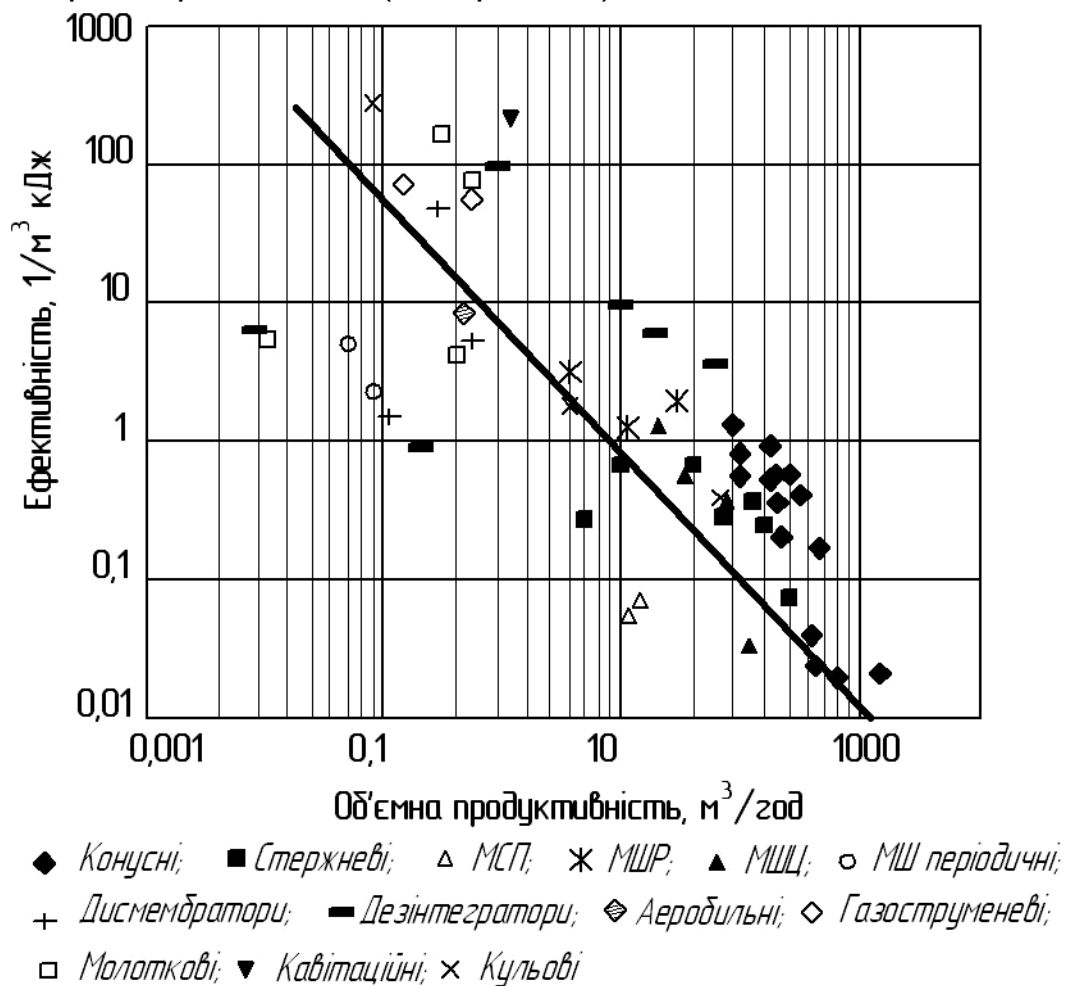


Рис. 4.1 – Порівняння різних подрібнювачів за параметром енергетичної ефективності

#### 4.1.4. Енергетичні показники і напружено-деформаційні процеси при механічному подрібненні м'ясної сировини

Механічна переробка м'ясопродуктів полягає, в основному, в їх різанні, при якому зменшуються лінійні розміри шматків оброблюваної продукції, пресуванні, дробленні, механізованій обвалці м'яса тощо. В усіх цих випадках матеріал, що переробляється, піддається силовій дії з боку робочого інструменту і, отже, в тій або іншій формі деформаціям [43].

Якщо розглядати процес різання, то, за П.А. Ребиндером, енергетичні витрати на цей процес підкоряються наступній закономірності:

$$dA=dA_1+dA_2+dA_3 \quad (4.24)$$

де  $dA_1$  - енергія, що витрачається на утворення елементу нової поверхні (на подолання молекулярних сил);

$dA_2$  - енергія, що витрачається на компенсацію втрат, пов'язаних з подоланням сил тертя;

$dA_3$  - енергія, що витрачається на об'ємні пластичні деформації;

$dA_2 + dA_3$  - безповоротна частина енергії, що переходить в тепло.

Таким чином, питома вага кожної складової в загальній витраті енергії залежить від механічних властивостей продукту. Наприклад, при різанні м'яса при кімнатній температурі основна частина енергії витрачається на пластичну деформацію (до 85% усіх витрат) і роль поверхневої енергії другорядна, а при дробленні крихких продуктів (м'ясо при надто низьких температурах, кістки тощо) роль поверхневої енергії значно зростає [206].

Параметри напружено-деформованого стану - напруження і деформації - дають повну картину внутрішніх сил і геометричної зміни форми в процесі механічної обробки продукту.

Функціональна залежність між напруженнями і деформаціями цілком визначається природою опору тіл деформаціям і, таким чином, має фізичний характер. Сучасний стан науки поки що не дозволяє розкрити повністю і описати в математичній формі взаємозв'язки між окремими частками тіла при його деформуванні. Доводиться задовольнятися інтегральним ефектом опору тіла деформаціям, що визначається експериментальним шляхом при випробуванні зразків. Феноменологічно зв'язок між напруженням і деформаціями тіл встановлюється на підставі двох гіпотез.

Гіпотеза детермінантності стверджує, що напружений і деформований стан тіл повністю визначається заданням функціоналів[91]:

$$\begin{aligned}\sigma_{ij}(t) &= L_{ij}[\varepsilon_{\min}(\xi), T(\xi), \theta(\xi)]_{\xi=0}^{\xi=t} \\ \varepsilon_{ij}(t) &= N_{ij}[\sigma_{\min}(\xi), T(\xi), \theta(\xi)]_{\xi=0}^{\xi=t}\end{aligned}\tag{4.25}$$

де  $L$  і  $N$  - деякі оператори, що залежність від фізичної природи тіла;

$t$  - час;

$T$  і  $\theta$  - впливаючі чинники, наприклад, температура, вологість тощо.

Друга гіпотеза, гіпотеза макровизначеності, за сутністю вже міститься у першій. За нею передбачено, що на підставі однорідного напруженого стану, який легко реалізується при випробуванні зразків, можна характеризувати неоднорідні напружені стани в тілах, що, як

правило, реалізується на практиці. Математичні оператори  $L$  і  $N$  визначаються фізичною природою тіла і його станом (температурою, вологістю, мірою анізотропії тощо). Таке формулювання завдань теорії деформованих середовищ.

Різання м'ясопродуктів може бути здійснене при вільному або обмеженому стані сировини. На практиці чисто вільне різання зустрічається рідко. Тому називатимемо вільним процес різання у тому випадку, якщо різання здійснюється однією різальною крайкою і частини продукту, що розділяються ножом, можуть вільно або з невеликим опором зміщуватися в сторони. А при обмеженому різанні продукт перерізується на дрібніші шматки при об'ємному стисканні [74]. В цьому випадку зміщення відрізанних об'ємів ускладнене.

Аналізуючи дані, приведені в джерелах [14, 190 та ін.], можна зробити висновок, що руйнування тіл під дією зовнішніх сил відбувається, в основному, за наявності хоч би однієї з трьох умов:

- локальне перенапруження поверхневих мікрооб'ємів при накладанні зовнішніх сил. При цьому в структурі мікрооб'єму спочатку відбуваються розривання зв'язків, а потім утворюється тріщина;
- наявність в структурі тіла дефектних місць (включення неоднорідностей, порожнеч та ін.), які не є концентраторами напружень, але, ще до прикладення навантаження, ослаблюють міжмолекулярні зв'язки і структуру тіла;
- розвиток в тілі великих пружних або пластичних деформацій.

Основними видами руйнування є [14, 190]:

- крихке руйнування без залишкових деформацій вздовж знову утворених поверхонь. Такий тип руйнування властивий матеріалам у склоподібному стані (заморожене м'ясо).

- пластичне руйнування при значних пластичних деформаціях в результаті втрати здатності опору цим деформаціями (окремі частини м'ясної тканини, фаршу).

- втомне руйнування, обумовлене поступовим наростанням мікроушкоджень в структурі тіла при його циклічному навантаженні. В результаті дії циклічних навантажень межа міцності матеріалів знижується у декілька разів [191, 215].

Руйнування біополімерів, зокрема м'яса, значно відрізняється від руйнування тіл з однорідною структурою. Розривання структурних армуючих волокон, як правило, здійснюється на різних рівнях і заново утворені поверхні не знаходяться в одній площині. Нерівномірність розподілу армуючих волокон по об'єму матриць продуктів, відмінності у

міцності волокон і бічних зв'язків уздовж ланцюгових молекул і макромолекул істотно впливають на деформаційну поведінку м'яса у зоні руйнування (див. додаток Б).

Опір руйнуванню м'яса залежить від структури і агрегатного стану, умов навантаження та інших чинників. Реальну м'ясну сировину можна умовно розділити за деформаційною поведінкою на групи. На сьогоднішній день розроблена велика кількість критеріїв руйнування відповідно до цих груп. Найбільше поширення серед них отримали: теорія найбільших лінійних деформацій, теорія найбільшої дотичної напруги, теорія повної потенційної енергії, теорія Мора, критерій Давиденкова-Фридмана та ін. [100, 191].

Енергія, що витрачається на руйнування тіла, визначається площею під кривою деформації. Тому величина витрати енергії для крихкого руйнування матеріалу значно менша, ніж для пластичного. У зв'язку з цим доцільніше, з метою економії енергії, проводити процеси подрібнення матеріалів, зокрема, м'яса у крихкому стані [166, 225].

Особливе місце в механіці руйнування м'яса займає теорія тріщин, оскільки вона формулює умови локального руйнування в даній точці тіла. Згідно цієї теорії саме у вершині тріщини має місце найбільша концентрація напружень, і, отже, вершина тріщини є найбільш можливим місцем руйнування твердого тіла [190, 191]. Значний вплив на розподіл напружень у вершинах тріщин має також напрям зміщення знову утворених поверхонь (берегів) тріщини. Загальний вигляд полів деформацій і напружень в околицях вершини тріщини може бути отриманий шляхом поєднання напружень, що має місце при здійсненні трьох різних зміщень поверхонь берегів тріщин, поданих на рис. Ц.1 додаток Ц.

Реальні матеріали не мають ідеальних пружних властивостей і залишкові напруження у більшості твердоподібних тіл релаксують у часі. Такі середовища, як м'ясо, при плюсових температурах не здатні тривалий час акумулювати потенційну енергію. Тому енергетичний бар'єр, що забезпечує існування тіла як єдиного цілого, у більшості реальних тіл перевершує потік вивільненої при утворенні нової поверхні енергії у вершині тріщини.

Однією з перехідних моделей від ідеального крихкого тіла до реальних є модель, що враховує пластичні деформації середовища у вершині тріщини перед її поширенням.

У пластичній області ріст величини напружень обмежується межею текучості матеріалу, внаслідок чого напруження у вершині тріщини

мають конкретну кінцеву величину. Ця модель була запропонована Г. Нейбергом [149], Е. Орваном і Дж. Ірвином [191]. Згідно цієї теорії робота на руйнування тіла складається з роботи на утворення нової поверхні і роботи на пластичні деформації при утворенні одиниці нової поверхні.

Ребиндер П.А. [192] запропонував для розрахунку енергії, необхідної для руйнування будь-яких тіл, враховувати не лише роботу на отримання нової поверхні і пластичних деформацій у вершині тріщини, але також роботу на здійснення інших видів деформацій, які супроводжують процес руйнування.

У моделі Г.І. Баренблатта [59] передбачається, що у матеріалі є сили зчеплення між структурними елементами. Ці сили обмежують ріст напружень у вершині тріщини при прикладанні зовнішніх сил. Тріщина буде збільшуватись, якщо напруження  $\sigma_y$  будуть більші сил порогової величини напружень. Величина порогового значення напружень визначається молекулярними силами зчеплення, діючими між берегами тріщини поблизу її вершини, і є постійною для різних матеріалів. У зв'язку з цим крива 1 (див. рис.Ц.2,а, додаток Ц), що показує ріст величини  $\sigma_y$  наближається до осі Y не в нескінченності, а згинається і у вершині тріщини ( $X=0$ ) напруження стають рівними їх пороговому значенню (крива 2).

Названі моделі мають ряд недоліків. Так, в першій передбачається, що руйнування здійснюється шляхом пластичної течії при утворенні зони пластичності перед вершиною тріщини, що справедливо для однорідних за структурою пружно-пластичних тіл, якими є м'ясо промислових тварин.

У другій моделі руйнування настає, коли напруження у вершині тріщини перевершуватимуть за величиною порогове значення міцності структурних зв'язків. В той же час в таких тілах, як м'ясо, величини структурних зв'язків визначаються не лише силами міжатомної взаємодії, але і силами міжмолекулярних зв'язків.

У зв'язку з цим при різанні м'яса необхідно враховувати одночасно моделі Г. Нейберга, П.А. Ребиндера і Г.І. Баренблатта.

Безумовно, що базою для опису напружено-деформованого стану біополімерів м'яса під час подрібнення мають слугувати діаграми його деформування. Традиційні способи побудови таких діаграм не дають надійних результатів, а тому запропонована [78, 225, 251] методика випробування зразків м'яса у вигляді плоских мембран (додаток К4), що дає можливість прогнозувати рівень зусиль різання при взаємодії складної біологічної тканини з лезом.

Робота зовнішніх сил, витрачена на подрібнення м'яса, може бути визначена за рівнянням П.А. Ребиндера :

$$A = A_1 + A_2 = k \cdot V + \sigma \cdot \Delta F \quad (4.26)$$

де  $A_1$  - робота, витрачена на деформацію подрібнюваного об'єму продукту, Дж  $A_2$  - робота, витрачена на утворення нових поверхонь, Дж  $k$  - коефіцієнт пропорційності, рівний роботі деформації одиничного об'єму подрібнюваного тіла;  $\sigma$  - коефіцієнт пропорційності, рівний роботі на утворення нової одиничної поверхні тіла (питома поверхнева енергія);  $V$  - об'єм руйнованого тіла, м<sup>3</sup>;  $\Delta F$  - площа знову утвореної поверхні, м.

Процес диспергування характеризується лінійним:

$$i = d_n / d_k, \quad (4.27)$$

чи об'ємним ступенем подрібнення

$$a = i^3 = d_n^3 / d_k^3 \quad (4.28)$$

де  $d_n$ ,  $d_k$  - середні лінійні розміри шматочків подрібнюваного матеріалу до і після подрібнення, мм.

Середні лінійні розміри шматочків матеріалів до подрібнення і після визначаються можна визнати за формулою:

$$d = \sqrt[3]{l \cdot b \cdot h} \quad (4.29)$$

де  $l$ ,  $b$ ,  $h$  - максимальні лінійні розміри шматочка за трьома взаємно перпендикулярними напрямками (довжина, ширина, висота).

Якщо замінити об'єм довільної частки на 1 м<sup>3</sup> рівнозначної величини з визначальним середнім розміром  $d$ , то робота, що витрачається на утворення нової поверхні, може бути визначена по формулою Риттингера :

$$A_2 = \sigma \cdot \Delta F = \sigma \cdot d_n^2 = k \left( \frac{1}{d_n} - \frac{1}{d_k} \right) \quad (4.30)$$

де  $k$  - постійна величина для кожного матеріалу, що відображає витрати енергії на утворення одиниці нової поверхні;  $d_n$ ,  $d_k$  – відповідно, початкові і кінцеві розміри часток.

Ця формула дає добрі результати при дрібному подрібненні крихких матеріалів, коли витратою енергії на деформування об'ємів можна нехтувати.

Горячкін В. П. [94] ввів поняття коефіцієнта корисної дії ножа :

$$\eta = A_1 / A_0 \quad (4.31)$$

де  $A_1$  - корисна робота, витрачена безпосередньо на різання, Дж;  $A_0$  - загальна робота, витрачена на процес подрібнення, Дж.

Збільшення величини коефіцієнта корисної дії ножа свідчить про зниження витрат енергії на явища, супутні процесу утворення нових поверхонь подрібнюваного продукту.

Енергію на подрібнення харчових продуктів переважно визначають експериментальним шляхом. При цьому основними енергетичними характеристиками процесу подрібнення м'ясопродуктів, як правило, були питомі витрати енергії на отримання 1 м<sup>2</sup> поверхні розділення, або на подрібнення одного кілограма продукту [14]. Ці характеристики іноді використовуються в промисловості при виборі електродвигунів за потужністю у приводах м'ясоподрібнювальних машин.

В роботах [160, 242] для визначення енергетичних витрат на процес різання сировини рослинного і тваринного походження використали співвідношення:

$$N = P_1 \cdot \vartheta_1 + P_2 \cdot \vartheta_2 \quad (4.32)$$

де  $P_1$ ,  $P_2$  – експериментально визначені величини горизонтальної і вертикальної складових сил різання, Н;

$\vartheta_1$ ,  $\vartheta_2$  - горизонтальна і вертикальна складова швидкості різання, м/с.

Співвідношення (4.32) дозволяє точніше визначити енергетичні витрати, вплив геометричних і кінематичних параметрів різального органу на процес різання, хоча визначення складових зусилля різання при динамічних навантаженнях на нинішньому етапі розвитку вимірювальної техніки викликає труднощі.

#### **4.1.5. Особливості енергетики вільного різання м'ясної сировини**

Ряд конструкцій м'ясоподрібнювальних машин для вільного різання сировини запозичений з інших галузей промисловості, де необхідне подрібнення, наприклад, мінеральної сировини.

Інтенсивна механічна дія робочих органів м'ясоподрібнювальних машин на сировину призводить до втрат нативних властивостей м'яса і навіть до його фізико-хімічної деструкції [171]. У зв'язку з цим робочі органи м'ясорізальних машин повинні мати геометричні параметри і забезпечувати такі режими подрібнення, які б не впливали на хімічний склад сировини і подрібнювали її високоякісно, з необхідним ступенем дисперсності та з мінімальними затратами енергії.

Виходячи з аналізу рівнянь, приведених у монографії [144], що описують подрібнення твердих тіл, а також на підґрунті інших досліджень



[171, 259] можна стверджувати висновок, що загальна робота, що витрачається на вільне різання м'яса, є сумою таких складових:

$$\sum_{i=1}^5 dA = dA_1 + dA_2 + dA_3 + dA_4 + dA_5, \quad (4.33)$$

де  $dA_1$  - елементарна робота на переборення сил зчеплення структурних зв'язків продукту;

$dA_2$  - елементарна робота на в'язкопластичну деформацію продукту, розташованого в зоні радіуса округлення різального леза інструмента перед розрізом;

$dA_3$  - елементарна робота на зміщення боковин розтину і деформування продукту поблизу цих боковин;

$dA_4$  - елементарна робота на переборення сил тертя інструмента по боковинах розтину;

$dA_5$  - елементарна робота на надання кінетичної енергії відрізанним кускам продукту.

Очевидно, що елементарна робота  $dA_5$  виконується лише при різанні твердих м'ясопродуктів (наприклад заморожених), коли подрібненні куски викидаються з зони різання з деякою швидкістю.

Складові загальної роботи вільного різання м'ясної сировини подані у додатку Ш.

Таким чином, при вільному різанні м'ясопродуктів інструмент виконує роботу, пов'язану з попереднім деформуванням сировини, розриванням її структурних зразків, зміщенням поверхні розрізання від площини різання і всі ці елементарні процеси супроводжуються тертям продукту по поверхнях інструментів. Очевидно, що кожний процес впливає не лише на фізико-хімічні та реологічні властивості продукту, але і на трансформацію геометричних параметрів інструментів та кінетику різання. Причому вплив кожного з цих чинників на всі складові виконуваної роботи далеко неоднозначний.

Тому, для оптимізації роботи м'ясорізальних машин, інструменти яких здійснюють вільне різання м'яса, по кількості витраченої на різання енергії необхідно аналізувати вплив кінематичних і геометричних параметрів на кожну складову виконаної інструментом роботи та впровадити оптимізацію процесу за сумарними витратами роботи або енергії. Не менш важливим показником є якість подрібнення.

## 4.2. Математичне моделювання процесу транспортування і протискування м'яса в шнекових подрібнювачах

У практиці експлуатації вовчків (при стиснутому різанні сировини) відмічено, що при зниженні пропускної спроможності різального механізму, або при надмірній подачі м'ясної сировини, металевий шнек починає руйнувати структуру м'яса, перетирати його, вичавлювати сік. При цьому підвищується температура фаршу, що зрештою позначається і на якісних показниках готового продукту.

У зв'язку з цим доцільно вдосконалити процес подачі та протискування м'ясної сировини через різальний механізм вовчка і розробити подаючий шнек, який здатний м'яко впливати на сировину, що подрібнюється.

Одним з перших, хто досліджував режими роботи вовчків був А.І. Пелеєв [168, 171]. За цими дослідженнями були визначені залежності продуктивності, питомих витрат енергії від кількості різальних площин, діаметрів отворів вихідних ґраток і швидкостей обертання ножів та шнека.

Він приводить формулу для розрахунку ефективного тиску при протискуванні м'ясної маси через отвори (згідно опору початку зсуву маси):

$$P = 4k \cdot \theta_0 / d, \quad (4.34)$$

де  $k$  - коефіцієнт, що враховує співвідношення розмірів, діаметр отворів та швидкість витікання продукту;

$\theta_0$  - граничне напруження зсуву маси (ГНЗ), Н/м<sup>2</sup>;

$d$  - діаметр отвору, м;

А.В. Горбатов [66] досліджував транспортування пластично-в'язких м'ясопродуктів по трубопроводах. На підставі отриманих експериментальних даних ним був зроблений висновок, що розрахунок трубопроводів для м'ясного фаршу при швидкості менше 0,1 м/с можна проводити за наступним критеріальним рівнянням:

$$P = 1800 \cdot l \cdot d^{-0,8} \cdot \theta_0^{-0,118} (\eta \cdot W)^{0,882}, \quad (4.35)$$

де  $\eta$  - пластична в'язкість, Па·с;  $W$  - швидкість течії, м/с;

$l$  і  $d$  - відповідно, довжина і діаметр трубопровода.

На підставі результатів проведених досліджень авторами [68] були отримані залежності тиску витікання яловичини  $P$  від швидкості витікання  $V$  для ґраток з різними діаметрами вихідних отворів рис. 4.2. На їх думку зростання тиску витікання при збільшенні швидкості подачі продукту в

гратки, в першу чергу, пов'язане зі змінами структурно-механічних властивостей м'яса, мірою яких в процесі протискування виступає граничне напруження зсуву (ГНЗ).

Автором роботи [44] були проведені дослідження з визначення залежності потужності приводу вовчка від швидкості витікання м'яса через гратки (рис. 4.3). Разом з тим, тиск всередині камери і якість фаршу не визначались.

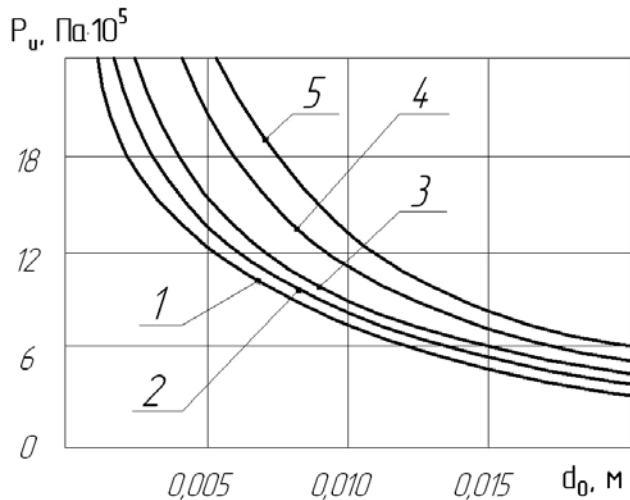


Рис. 4.2 – Залежність тиску витікання  $P_u$  від діаметру отворів гратки  $d_0$  при різних швидкостях подачі продукту: 1 - 0,0011 м/с; 2 - 0,0025 м/с; 3 - 0,0050 м/с; 4 - 0,0093 м/с; 5 - 0,0150 м/с (коефіцієнт ефективності використання площі гратки  $\varphi=0,47$ , товщина гратки  $\delta=0,005$  м)

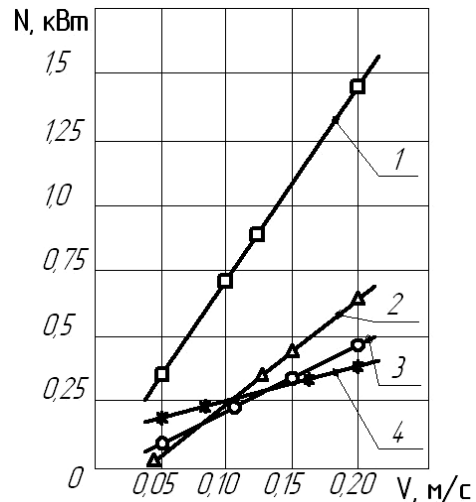


Рис. 4.3 – Зміна потужності приводу вовчка залежно від швидкості витікання м'яса через гратки: 1 - сумарна необхідна потужність, кВт; 2 - потужність подачі, кВт; 3 - потужність на подолання тертя в різальному механізмі, кВт; 4 – потужність, яка витрачається на різання продукту, кВт

Аналізуючи отримані в роботі [62] дані, неможливо визначити, як змінюватиметься тиск в робочій камері вовчка при зниженні коефіцієнта ефективності площі гратки, тобто при зниженні її пропускної спроможності.

Автори робіт [130, 164] та ін. відмічають обмаль проведених досліджень і необхідність керування процесом протискування м'яса через гратки вовчка для забезпечення належного структуроутворення фаршу. Це можна зробити за рахунок застосування шнека, здатного перепускати сировину у зворотньому напрямку при надмірному підвищенні тиску у різальному вузлі. Для отримання еластичного покриття на зовнішньому діаметрі шнека можна застосовувати

електрофоретичні покриття на основі фторопласту – 4Д, модифікованого графітом для підвищення гнучкості [202, 239].

Можна задатись метою - на основі математичного моделювання процесу подрібнення м'яса у вовчках обґрунтувати можливість авторегулювання процесу подачі сировини і тиску на ґратках для збереження нативних властивостей продукту.

Вважаємо, що механічна система (рис. 4.4), що складається з шнека, разом з ножем, і продуктом, що знаходиться між поверхнею шнека і внутрішньою поверхнею корпусу, має одну ступінь свободи. Це означає, що кінематичні характеристики шнека, ножа і подрібнюваного продукту, що рухається, повністю визначаються обертальним рухом шнека. Крім того, вважаємо, що процес руху продукту є таким, що встановився, і баланс силових дій на шнек з боку двигуна і продукту призводить до одного рівняння рівноваги, яке записується за допомогою принципу можливих переміщень для системи з одним ступенем свободи:

$$(M_e - M_c) \cdot \delta\varphi - (1 - K) \cdot P_{дон} \cdot S_2 \cdot \delta S = 0 \quad (4.36)$$

Після ряду перетворень (додаток Щ) знайдемо крутний момент на валу шнека:

$$M_e = \frac{8Q_m}{hd^2n\rho} (f(\omega) + \frac{P_{дон} R_2^2 h}{2\omega} \cos \alpha), \quad (4.37)$$

де в рівняннях (3.36), (3.37)  $M_e$  – крутний момент, що передається шнеку з боку двигуна, Нм;  $M_c$  - момент сил опору обертанню, обумовлений наявністю тертя продукту по поверхні шнека при його обертальному русі і опором різання, що виникає в парі ґратка-ніж;  $P_{дон}$  - допустимий тиск на продукт перед ґраткою, Па;  $S_2$  - площа перерізу шнека перпендикулярного осі z (вісі шнека), м<sup>2</sup>;  $\omega$  - кутова швидкість обертання шнека, с<sup>-1</sup>;  $Q_m$  - масова витрата продукту, кг/год;  $\rho$  - щільність продукту, кг/м<sup>3</sup>;  $h$  - крок гвинтової лінії на радіусі шнека  $R_2$ , м;  $d$  - діаметр отворів ґратки, м;  $R_2$  - радіус шнека, м;  $\alpha$  - кут нахилу гвинтової лінії шнека, град;  $f(\omega)$  - функція, що зв'язує момент опору зі швидкістю;  $n$  - кількість отворів у ґратці;  $\delta S$  - можливе переміщення продукту вздовж корпусу при повній відсутності обертання продукту навколо вісі z, тобто тільки при його поступальному переміщенні;  $\delta\varphi$  - можливе кутове переміщення шнека навколо вісі z;  $K$  - коефіцієнт, що враховує ступінь захоплення продукту в обертальний рух. ( $K=0$  - немає обертального руху продукту, а при  $K=1$  - повне захоплення продукту в обертальний рух).

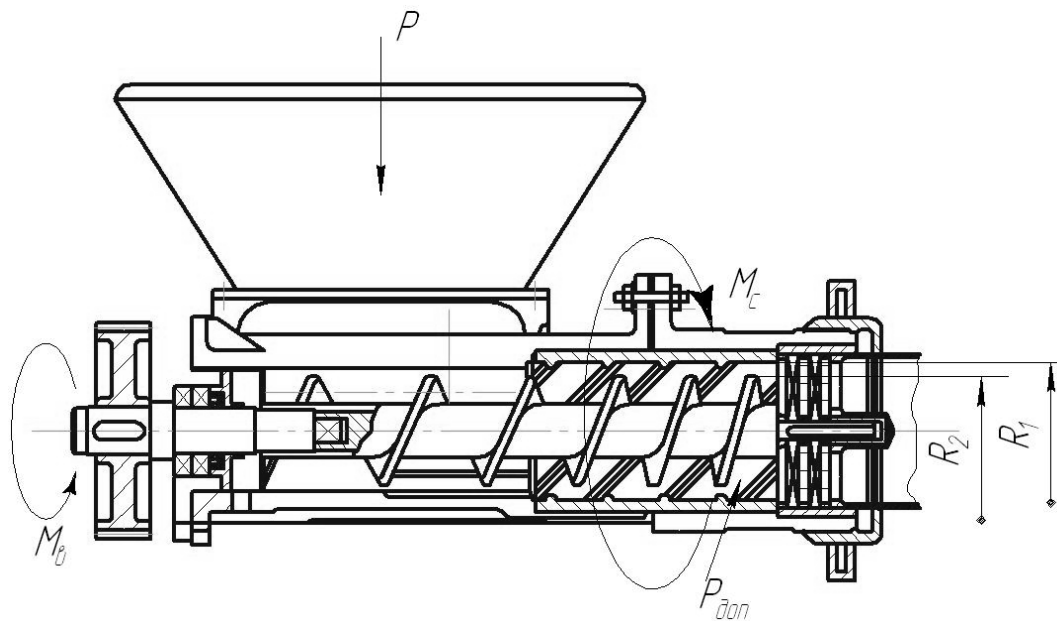


Рис. 4.4 – Механічна система вовчка:  $P$  – тиск на вході у вовчок;  $P_{\text{доп}}$  – допустимий тиск перед граткою.

У рівнянні (4.37) величина  $P_{\text{доп}}$  для різних видів продукту має бути визначена, виходячи з додаткових міркувань, наприклад, шляхом проведення серії експериментальних досліджень для визначення граничних тисків, що не порушують структури продукту.

Рівняння (4.37) зв'язує масову витрату  $Q_m$  і крутний момент двигуна  $M_\epsilon$  прямою пропорційною залежністю, тобто при  $Q_m=0$  і  $M_\epsilon=0$ .

Проте, це не зовсім так і рівняння (4.37) треба розуміти в тому сенсі, що при  $Q_m=0$  рух продукту в просторі між шнеком і корпусом або перебудовується (з'являється зворотній рух), або продукт залучається тільки до обертального руху. Момент сил опору, що виникає при цьому, значно менший від моменту сил опору за наявності поступального руху продукту. В цьому випадку і крутний момент двигуна буде значно менший, ніж за наявності поступального руху продукту.

В процесі подрібнення м'яса у вовчках найбільший тиск виникає у кінці шнека на внутрішній поверхні граток, тому що тут відбувається продавлювання м'яса через різальний механізм. Знаючи величину тиску витікання м'яса через гратку, при якому починає відбуватися руйнування структури м'яса, і використовуючи залежність (додаток Щ) між максимальним тиском та величиною зазору між зовнішнім діаметром шнека і корпусом  $\delta$ , можна так підібрати геометричні і фізичні характеристики шнека, що при гранично допустимому тиску  $P_{\text{доп}}$  витки шнека почнуть відгинатися в напрямку, протилежному напрямку

переміщення м'яса, утворюючи при цьому зазор, через який частина продукту перетече за виток шнека, а поступове продавлювання м'яса, що залишилося перед ґратками, продовжитися.

Нижче наведені результати експериментальних досліджень з визначення величини тиску, при якому відбувається протискування свинини і яловичини через ґратки вовчка без руйнування структури м'яса, -  $P_{доп}$ . Експерименти проводилися на випробувальному стенді на базі гідравлічного преса з манометром. М'ясо протискувалось поршнем через ґратки з різними діаметрами отворів, які були встановлені у гільзі рис. 4.5.

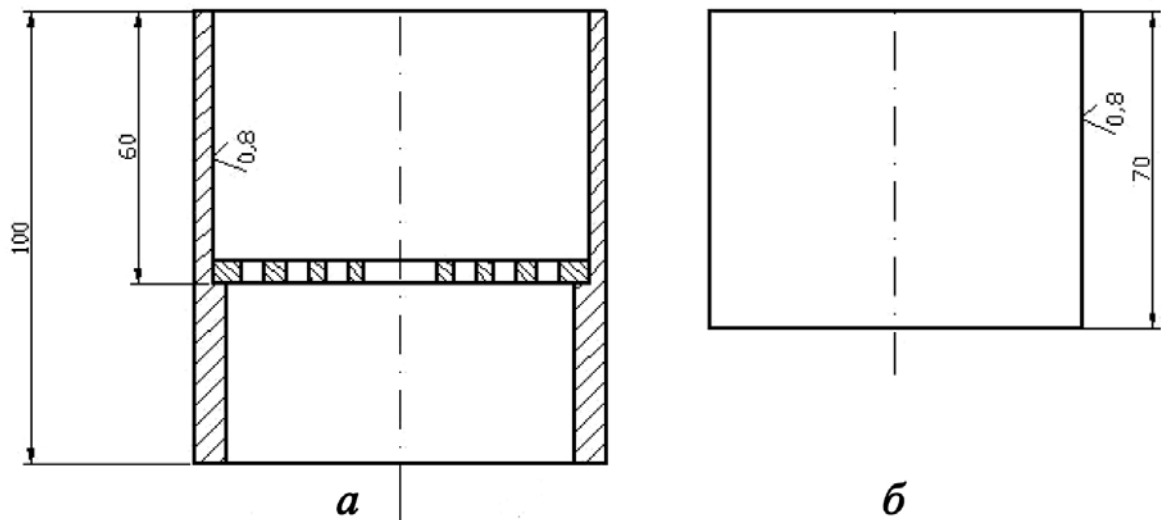


Рис. 4.5 – Деталі випробувального стенду для протискування фаршу через ґратки вовчка: а – гільза з установленою ґраткою; б – поршень.

В результаті обробки експериментальних даних по протискуванню м'яса яловичини і свинини через ґратки з різним діаметром отворів рис. 4.6 були отримані аналітичні залежності для розрахунку тиску витікання :  
для яловичини:

$$P = 13,73 \cdot 10^4 \cdot d_0^{-0,87} \cdot V_n^{0,17} \cdot \varphi_0, \quad (4.38)$$

для свинини:

$$P = 13,3 \cdot 10^4 \cdot d_0^{-0,79} \cdot V_n^{0,25} \cdot \varphi_0, \quad (4.39)$$

де  $d_0$  - діаметр отворів ґратки, м;

$V_n$  - швидкість протискування, м/с;

$\varphi_0$  - коефіцієнт ефективності ґраток.

Дослідним шляхом було встановлено, що структура м'яса починає руйнуватися, якщо протискування через ґратки яловичини відбувається при тиску більшому за 3,7 МПа. При такому тиску ще зберігається

цілісність структури м'яса і практично відсутнє руйнування його частинок (рис. 4.7, а,б). Відповідно, при проектуванні еластичного шнека необхідно враховувати, що максимально допустимий тиск на яловичину перед ґратками, який не викликає руйнування його структури,  $P_{\text{доп}} = 3,7 \cdot 10^6$  Па.

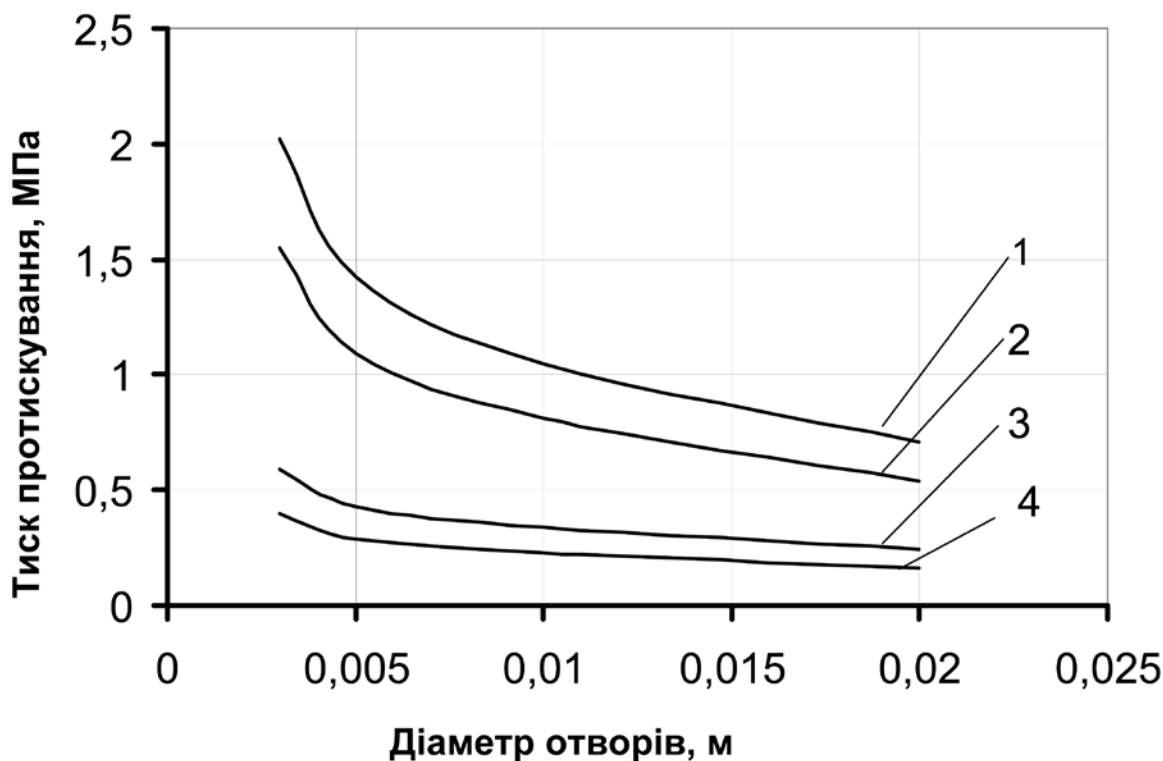
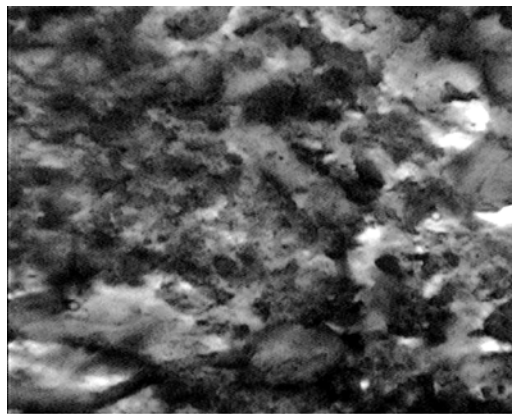
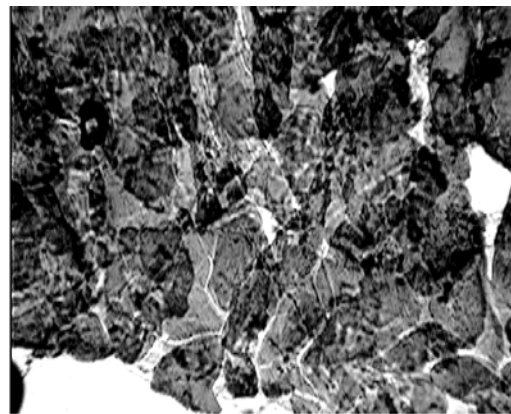


Рис. 4.6 – Залежність тиску протискування від діаметра отворів ґраток для свинини і яловичини: 1 – яловичина ( $v = 0,00083$  м/с); 2 - яловичина ( $v = 0,00018$  м/с); 3 – свинина ( $v = 0,00083$  м/с); 4 - свинина ( $v = 0,00018$  м/с)

Дослідним шляхом було встановлено, що структура свинини починає руйнуватися, якщо до неї прикласти тиск більший за 2,5 МПа. При такому тиску ще зберігається цілісність структури м'яса і, практично, немає руйнування сполучної тканини (рис. 4.7, в,г). Відповідно, при проектуванні гнучкого шнека необхідно враховувати, що максимально допустимий тиск на свинину перед ґратками, який не викликає руйнування її структури,  $P_{\text{доп}} = 2,5 \cdot 10^6$  Па.



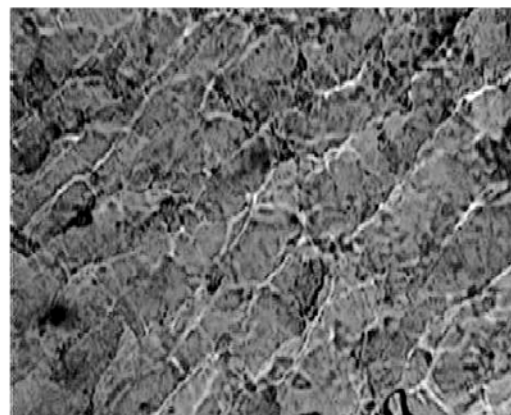
*a*<sup>x400</sup>



*б*<sup>x400</sup>



*в*<sup>x400</sup>



*г*<sup>x400</sup>

Рис. 4.7 – Зміна структури яловичини (а,б) і свинини (в,г) від тиску: а,в – 5 мПа; б – 3,7 МПа; г – 2,5 МПа

Був виконаний розрахунок вигину витків шнека з еластичною зовнішньою гвинтовою поверхнею методом кінцевих елементів. За допомогою засобів моделювання геометрії в програмі *Nastran* була створена геометрична модель шнека, а методом кінцевих елементів розраховані зміщення його еластичних кінцівок, утворених модифікованими фторопластовими електрофоретичними покриттями (рис. 4.8).

На основі математичного моделювання процесу переміщення м'яса еластичним робочим органом і застосування методу кінцевих елементів при розрахунку вигину витків гнучкого шнека, були запропоновані основні геометричні і фізичні параметри для конструювання шнеків цього типу, які можуть бути використані у вовчках із стандартизованим рядом вживаних вихідних ґраток.



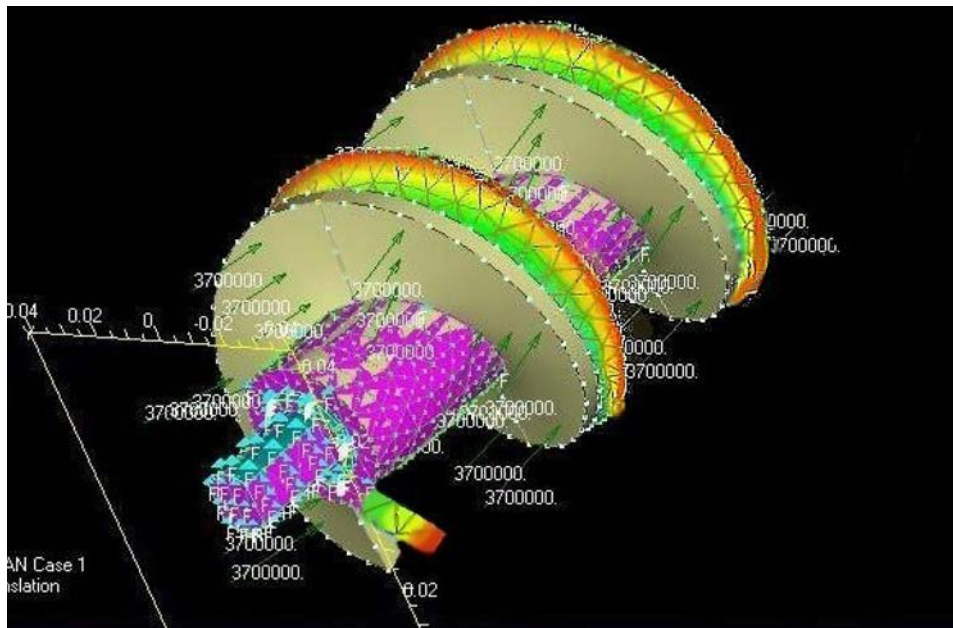


Рис. 4.8 – Відображення результатів розрахунку

Спираючись на результати моделювання і розрахунків та з використанням розробленої методики розрахунку еластичного подаючого шнека був виготовлений експериментальний зразок шнека з електрофоретичним покриттям для вовчка МІМ-300.

Покриття осаджували у водяному поліелектроліті, до складу якого входили: емаль – плівкоутворювач ВФЛ-149 «Е», наповнювач – суспензія фторопласту Ф-4ДВ і модифікатор – суспензія графіту [33, 238].

В процесі випробування експериментального зразка на кафедрі м'ясних, рибних і морепродуктів НУБіП України було вироблено дослідну партію сосисок «Молочних». В якості контролю був вироблений той же сорт сосисок на традиційному обладнанні. Аналіз змін органолептичних показників, а також гістологічний аналіз виробленої продукції показали, що досліджувані зразки, вироблені на вовчку з еластичним шнеком, мають кращі показники якості і відповідають встановленим вимогам до цих м'ясопродуктів (акт додається).

Таким чином, доведена перевага процесу протискування м'ясної сировини через ґратки вовчка з використанням еластичного шнека, тому що він дозволяє отримувати якісні фарші.

#### **4.3. Взаємозв'язок експлуатаційних чинників і вихідних параметрів шнекових подрібнювачів**

Найважливішими чинниками, що впливають на якість подрібнення сировини є конструктивні і геометричні параметри різального інструмента, кінематика процесу і динамічні властивості системи машина-інструмент-матеріал. На рис. 4.9 подані параметри, що

впливають на параметричну надійність шнекових подрібнювальних машин.

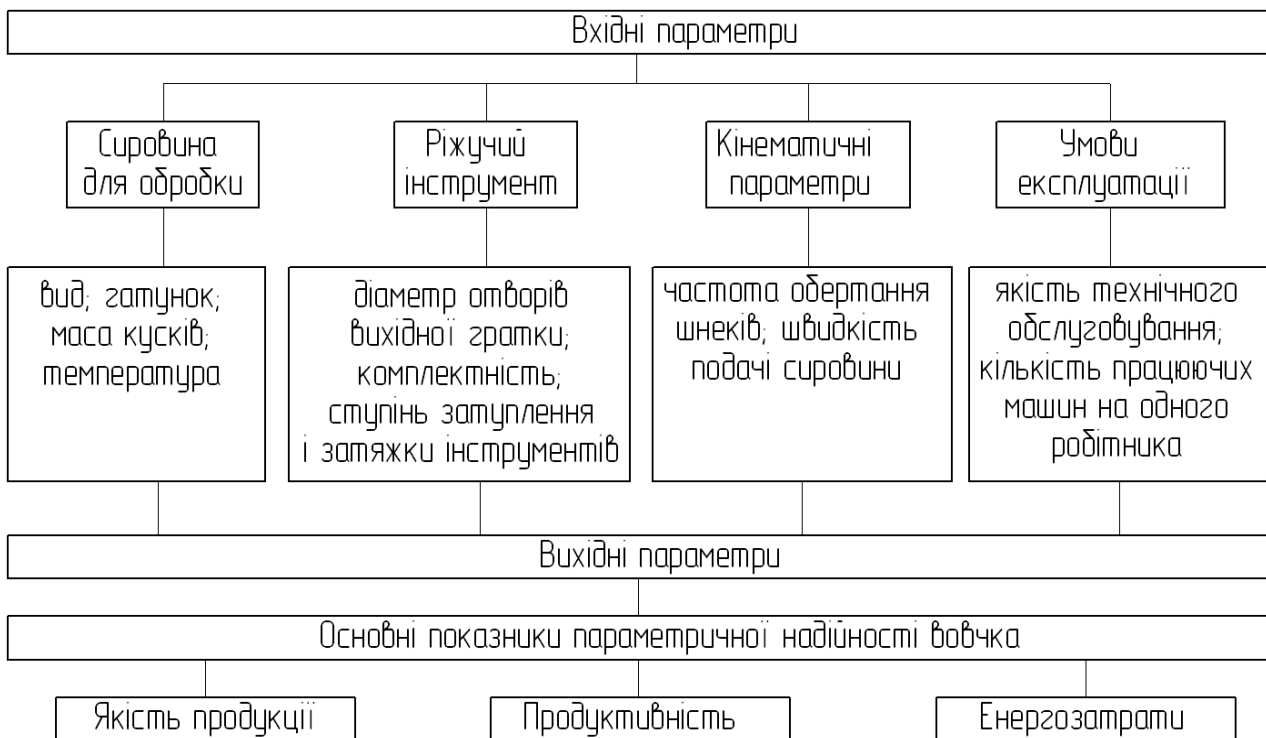


Рис. 4.9 – Параметри, впливаючі на параметричну надійність шнекових подрібнювальних машин

Важливі вхідні параметри вовчків, задані в технічній документації, наступні: зазор між напрямними ребрами циліндра і шнеком повинен бути не більшим 0,9 мм; температура продукту при подрібненні не повинна підвищуватися більш ніж на 5°С.

Величина і темп збільшення температури при подрібненні м'яса дає можливість оцінити правильність складання і заточування різального інструменту машини. За нормативних умов нагрівання подрібненого м'яса на вовчку з отворами у вихідній ґратці діаметром 3 мм становить 2-3°С, а при відхиленні від них досягає 8-9°С.

Доцільним є знаходження оптимальних параметрів роботи вовчків, що забезпечують найкраще різання продукту, найменше спрацювання різального комплекта, а отже, і щонайменше потрапляння металу в продукт. Дотримання оптимальних режимів різання забезпечує високу якість готових виробів, параметричну надійність роботи і максимальну продуктивність вовчка при мінімальних енергетичних витратах. Тому були дослідженні причини формування зазору між напрямними ребрами циліндра і шнеком, вплив зусилля у сполученні різальної пари (ступеня зтягування притискної гайки), зношування різального комплекта на вихідні параметри вовчка.

В експериментах використали машини для середнього подрібнення - вовчки К6-ФВЗП-200, що серійно випускаються ПАТ «Полтавський машинобудівний завод». Прийняті найбільш характерні умови роботи вовчків: один робітник обслуговує 3 машини, комплектність різального механізму - приймальна гратка, ніж-гратка з отворами діаметром 25 мм, ніж-решітка з отворами діаметром 3 мм, температура сировини 0-4°C, маса шматків жилованого м'яса 3÷5 кг. У цих умовах вовчок працював до відмови. Під відмовою розуміли напрацювання машини до затуплення різального комплекту.

Дослідження проводили на трьох вовчках. На першому подрібнювали яловичину I ґатунку, на другому - свинину жирну і напівжирну, на третьому - розморожену свинячу блочну сировину. Встановлено, що граничний стан різального комплекту для яловичини настає при подрібненні 40 т, для свинини - 60 т. Затуплення різального інструменту контролювали за граничним значенням радіуса кривизни різальної крайки ножа ( $r=50\div60$  мкм). Затуплення крайки визначали методом відбитків [162]. Якість сировини контролювали за її СМХ. З СМХ була обрана найбільш чутлива величина - граничне напруження зсуву ( $\Gamma\text{HЗ}$ ,  $\theta_0$ ).

Методика дослідження наступна. Після переробки на вовчку 10 т яловичини і 20 т свинини відбирали проби для визначення  $\Gamma\text{HЗ}$  та інших величин вихідних параметрів. Після кожного циклу проводили додаткову затяжку різального комплекту до початкового значення.

Залежності зносу різального комплекту  $\delta$ , температури продукту  $t$ , продуктивності вовчка  $\Pi$ , граничного напруження зсуву  $\theta_0$  різної м'ясної сировини і питомі витрати електроенергії  $q$  від зусилля затягування різального комплекту  $P$  наведено на рис. 4.10. Граничне напруження зсуву корелює з характером зміни продуктивності вовчка, причому, воно збільшується майже прямопропорційно при зростанні зусилля затягування від 3 до 6 кН. Очевидно, при слабкому затягуванні різального комплекта продукт зминається, з м'язової тканини виділяється сік, збільшується розмір водно-білкового прошарку, що викликає зміну реологічних властивостей фаршу. При подальшому збільшенні зусилля затягування комплекта реологічні властивості сировини і продуктивність вовчка стабілізуються. При зусиллі затягування понад 9 кН різко підвищуються спрацювання різального комплекту, питомі енерговитрати і температура сировини, що призводить до параметричної відмови

## МАШИНИ.

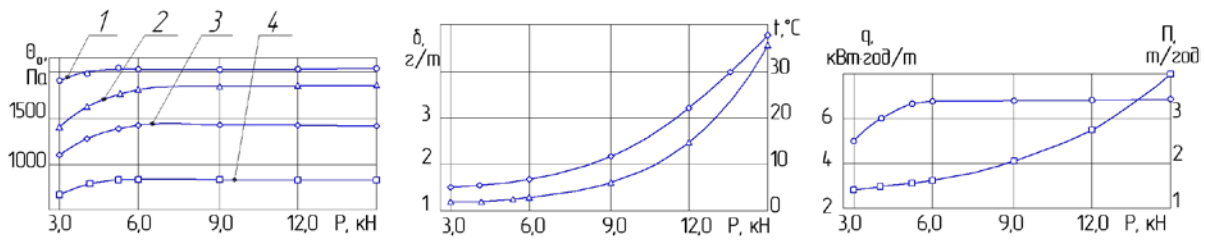


Рис. 4.10 – Зміна вихідних параметрів вовчка К6-ФВЗП-200 від зусилля зтягування: 1 – яловичина ( $W=69\%$ ,  $\varphi=20\%$ ); 2 – яловичина ( $W=61\%$ ,  $\varphi=20\%$ ); 3 – свинина напівжирна ( $W=60\%$ ,  $\varphi=25\%$ ); 4 – свинина жирна ( $W=31\%$ ,  $\varphi=61\%$ ), де  $W$  – вологість фаршу,  $\varphi$  - жирність фаршу

Таким чином, найкращі параметри процесу різання для дослідженої машини забезпечує зусилля зтягування різального комплексу на рівні 6 кН.

В процесі зношування зусилля зтягування зменшується, що викликає зниження продуктивності машини (рис. 4.11). Причому, при збільшенні кількості циклів повторного зтягування, зменшується продуктивність вовчка через збільшення радіуса кривизни різальних крайок ножів, що погіршує умови подрібнення.

Граничне напруження зсуву (Па) для яловичини з відповідним вмістом води і жиру:

$$\theta_0 = 4000 \exp[4\varphi - (0.31 + 21\varphi^2) \cdot U], \quad (4.40)$$

де  $\varphi$  - жирність, долі одиниці;  $U$  - вологовміст, долі одиниці.

Формула дійсна за наступних величин змінних: жирність  $\varphi = 0 \dots 0,25$  і вологовміст  $U = 1,6 \dots 2,6$ . При жирності сировини більше 0,25 після відповідного підпресовування частки злипаються, що викликає різке збільшення ГНЗ. Відсутність регулювання зусилля зтягування різального комплексу призводить до підвищеного зносу різальних інструментів і деталей привода, які працюють при перевантаженні, збільшення витрат електроенергії і зниження якості фаршу.

Зі збільшенням зазору між шнеком і корпусом машини сировина все більше рухається у зворотньому напрямку, зминається і перетирається, що зменшує її ГНЗ і погіршує продуктивність машини, якість фаршу та збільшує енерговитрати (рис. 4.12). Таке збільшення зазору часто пов'язане зі зносом підшипника ковзання, що спричиняє контакт ребер циліндра і шнека.

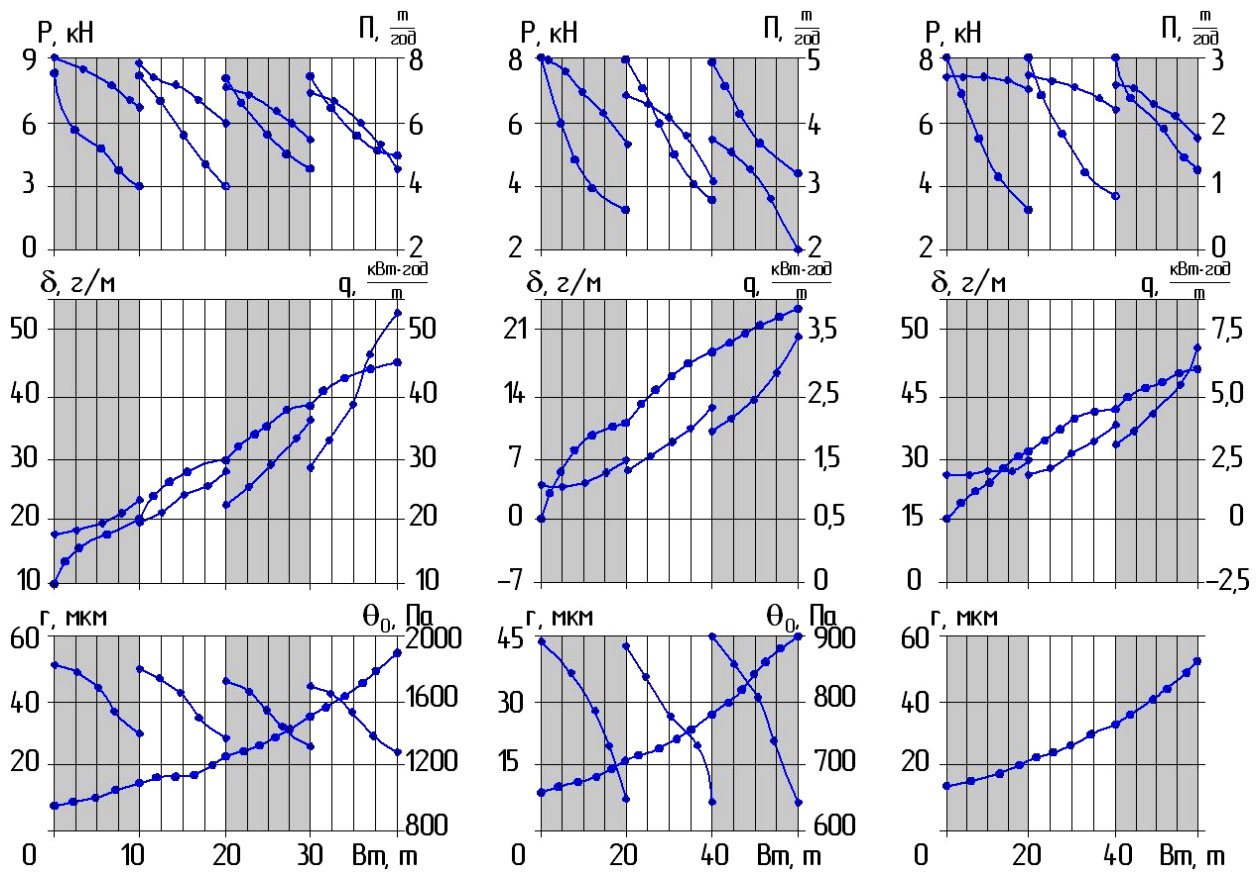


Рис. 4.11 –Зміна вихідних параметрів процесу подрібнення у вовчку К6-ФВЗП-200 від кількості подрібненої сировини: а – яловичини 1 ґатунку; б – свинини напівжирної; в – подрібненої розмороженої свинини; Р – зусилля затягування; Π – продуктивність вовчка; δ - знос різального інструменту; θ - граничне напруження зсуву подрібненої м'ясної сировини; q – питомі витрати електроенергії; r – радіус кривизни різального окрайка ножа; В – кількість виробленого фаршу

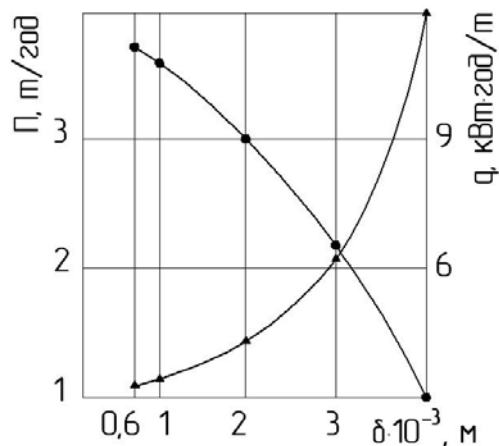


Рис. 4.12 – Зміни вихідних параметрів вовчка К6-ФВЗП-200 зі збільшенням зазору між шнеком корпусом

## **4.4. Моделювання м'ясоподрібнювальних процесів – основа для синтезу ефективних технологічних машин**

### **4.4.1. Сутність проблеми і мета моделювання**

Ефективність будь якого технологічного процесу, у т.ч. і процесу подрібнення м'яса і м'ясопродуктів залежить від правильного врахування властивостей і поведінки оброблювального об'єкту при виконанні над ним технологічних операцій, тобто можливості максимально точного прогнозування результатів його обробки і, за необхідності, внесення до технологічних режимів процесу відповідних уточнень, що забезпечують необхідну якість і максимальну продуктивність обробки.

Нажаль, теоретичні підходи до прогнозування результатів подрібнення м'ясопродуктів, як узагальнена система пізнавальних засобів, методів і прийомів, що забезпечує належну ефективність процесу, до теперішнього часу не розроблені для жодної групи біополімерів м'яса. Є лише окремі рекомендації з вибору оптимальних машин і режимів подрібнення для обмеженої кількості матеріалів, що вкрай недостатньо для розвитку м'ясопереробного обладнання.

Мета моделювання – розробка таких теоретичних і експериментальних засобів, що можуть бути застосовані при синтезі і проектуванні обладнання для подрібнення м'яса і м'ясопродуктів з різними механічними і реологічними властивостями.

### **4.4.2. Методологія прогнозування процесів подрібнення**

Одними з найважливіших питань у розробці методології прогнозування процесів подрібнення є пошук критеріїв якості, умов руйнування і продуктивності.

Формально процес подрібнення можна подати як засіб зміни властивостей оброблюваного матеріалу одним з відомих способів (рис. 4.13) з метою збільшення площі вільної поверхні або розділення на частини [142, 225]. Така схема відображає основне завдання промислової реалізації процесу подрібнення, яке полягає у виборі або створенні устаткування для подрібнення конкретного матеріалу з метою отримання необхідного результату. Для аналізу процесу подрібнення доцільно розглядати його у вигляді окремих стадій: завантаження матеріалу в зону подрібнення, навантаження його в робочій зоні, збільшення зусиль навантаження до початку руйнування, сам процес багатократного руйнування і видалення матеріалу із зони подрібнення.

З огляду модельного представлення подрібнення таке розділення необхідне, тому що при переході з однієї стадії на наступну починають змінюватись реологічні властивості матеріалу внаслідок його руйнування. Наприклад, видалення матеріалу із зони подрібнення має здійснюватись відразу, тому що пружно-пластична деформація його частин без руйнування позначається на якості кінцевого продукту і призводить до зайвих енерговитрат.

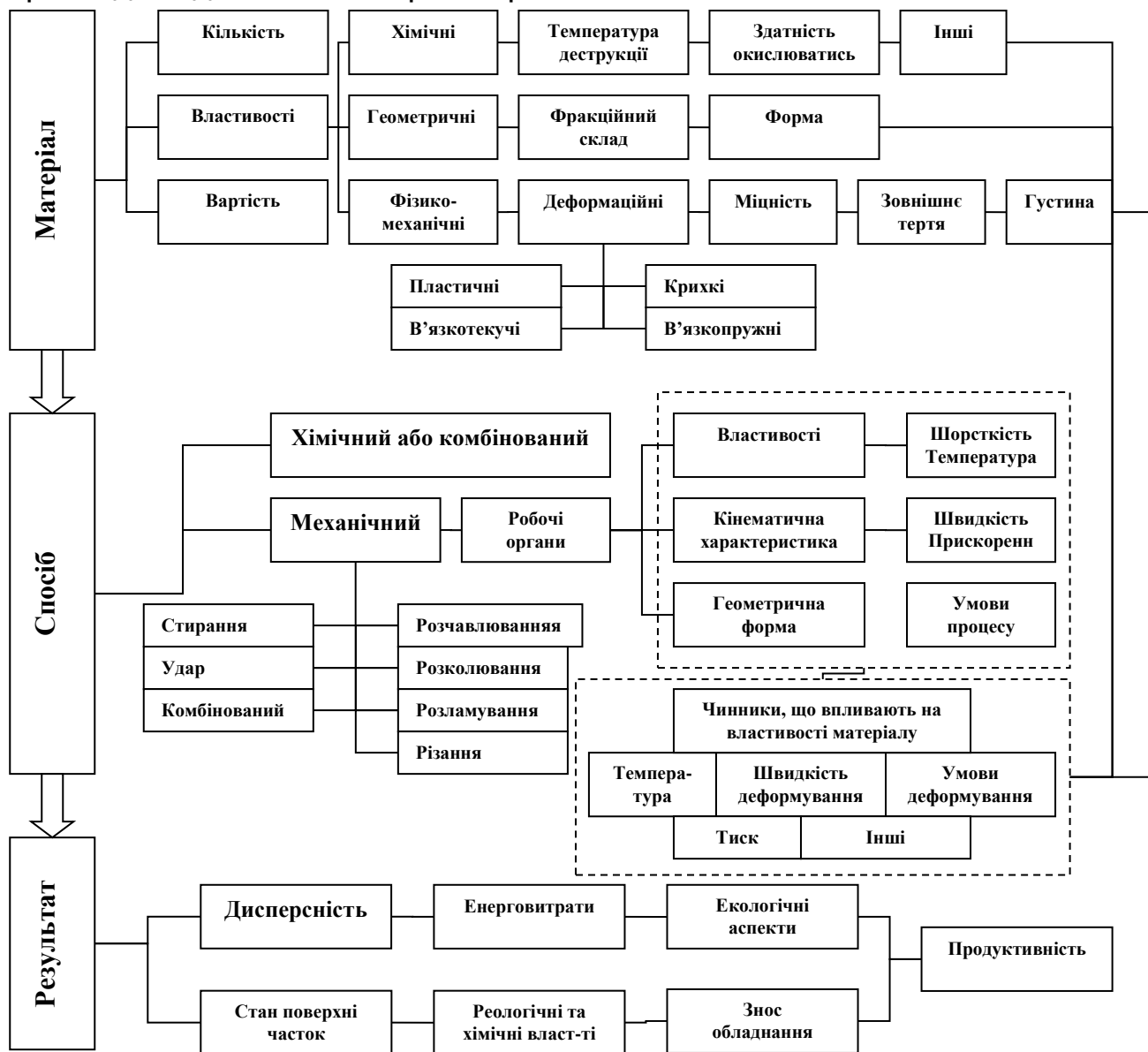


Рис. 4.13 – Взаємозв'язок чинників технологічного процесу подрібнення матеріалів

Рівняння енергетичного балансу для процесу подрібнення має вигляд [142, 225]:

$$\frac{dA_M}{dt} + \frac{dq_1}{dt} + \frac{dq_2}{dt} + \frac{dW_1}{dt} + \frac{dW_2}{dt} + \frac{dA_T}{dt} + \frac{dW_S}{dt} + \frac{dW_Z}{dt} + \frac{dW_{\Phi X}}{dt} = 0, \quad (4.41)$$

де  $A_M$  - робота зовнішніх механічних сил, що прикладаються до системи;  $q_1$  - кількість теплоти за рахунок зовнішніх джерел;  $q_2$  - кількість теплоти за рахунок внутрішніх процесів (дисипація, хімічні процеси та ін.);  $W_1$  - приток в систему інших видів енергії (радіаційне випромінювання, електричне поле високої частоти та ін.);  $W_2$  - енергія, витрачена на деформацію монолітних шматків матеріалу;  $W_z$  - енергія, витрачена на пластичну деформацію полідисперсної суміші матеріалу, яка не призводить до руйнування окремих шматків;  $A_T$  - робота сил зовнішнього тертя матеріалу і робочих органів;  $W_s$  - енергія, витрачена на утворення вільної поверхні в матеріалі в результаті його руйнування,  $W_{\Phi X}$  - енергія, витрачена на зміну фізико-хімічних властивостей матеріалу.

На основі термодинамічного підходу до процесу руйнування можна зробити припущення, що площа вільної поверхні матеріалу, яка утворилася в результаті його обробки пропорційна кількості енергії, витраченої на його деформацію. Рівняння зміни площі вільної поверхні в матеріалі можна записати в наступному вигляді:

$$\frac{dW_s}{dt} + \frac{dW_2}{dt} = 0. \quad (4.42)$$

Припустимо, що інтенсивність поглинання матеріалом енергії залежить від наступних параметрів процесу подрібнення:

$$\frac{dW_2}{dt} = f(A, \Phi, S), \quad (4.43)$$

де  $A$  - параметр, що відображає фізико-механічні властивості матеріалу;  $\Phi$  - функціональний параметр, що залежить від форми робочих органів подрібнювального обладнання;  $S$  – площа руйнування. Фізична сутність рівняння (4.43) у тому, що інтенсивність деформації матеріалу і, відповідно, інтенсивність його руйнування залежить від способу прикладання механічних сил, ступеня його попередньої дисперсності і його фізико-механічних властивостей при деформуванні. Останні залежать від накопиченої ним теплової енергії та енергії, витраченої на зміну фізико-хімічних властивостей.

Взаємозалежність інших видів енергетичних потоків може бути виражена диференціальними рівняннями, які записуються на основі класичної термодинаміки з урахуванням конструктивно-технологічних параметрів подрібнювача. Загалом аналітична модель процесу подрібнення може бути записана системою диференціальних рівнянь,



що відображають динаміку енергетичних потоків в системі «матеріал - подрібнювальний пристрій - зовнішнє середовище».

У загальному вигляді така модель може бути представлена схемою причинно-наслідкових зв'язків між елементами, що визначають параметри процесу подрібнення (див. рис. 4.13). Для математичної реалізації такої узагальненої моделі досить відобразити кожний з елементів у математичній формі і записати рівняння залежності між ними.

Згідно з схемою (див. рис. 4.13) початковими параметрами моделі є хімічні, фізико-механічні і геометричні властивості матеріалу. В математичній моделі повинні бути враховані ті хімічні властивості м'яса, які впливають на хід процесу подрібнення (СМХ фаршу, агресивність по відношенню до обладнання, температура деструкції, здатність окиснюватися та ін.). Аналітично ці показники можуть бути представлені у вигляді коефіцієнтів, які є постійними або залежать від динаміки процесу. Фізико-механічні властивості можна подати у вигляді рівнянь залежності реологічних властивостей, критерію міцності, сил тертя, густини, в'язкості та інших необхідних характеристик від чинників що впливають на ці показники. Геометричні властивості початкового матеріалу (м'ясної сировини) є фіксованими і визначаються фракційним складом і особливостями його геометричної форми.

Спектр механічних способів подрібнення досить широкий і вибір параметрів робочих органів подрібнювача не просте завдання. Спосіб, за допомогою якого здійснюється процес, можна аналітично подати у вигляді рівнянь, що визначають геометричну форму робочих органів машини, їх кінематичну характеристику, властивості (шорсткість поверхні, температуру) і умови проведення процесу (тиск, наявність супутніх речовин тощо). Процес подрібнення механічним способом зручно поділити на стадії завантаження матеріалу, навантаження його до початку руйнування, зростання поверхні руйнування, і видалення матеріалу із зони обробки. Між цими стадіями у переважній більшості випадків неможливо провести розмежування у просторі.

Таким чином, для створення математичної моделі процесу подрібнення необхідно вибрати спосіб реалізації кожної з трьох вищенаведених стадій і записати рівняння, які описують поведінку матеріалу на кожній з них. Основна проблема в аналітичному описі процесу деформації і руйнування полідисперсної суміші матеріалу. Адекватно описати цей процес функціональними залежностями можна

лише на основі експериментальних досліджень поведінки сукупності матеріалу у певному виді подрібнювального обладнання.

Одним з важливих етапів вирішення проблеми математичного моделювання процесів подрібнення є розроблення узагальненої класифікації способів і устаткування для подрібнення м'яса і м'ясопродуктів.

#### **4.4.3. Класифікаційні ознаки способів і засобів подрібнення**

Аналіз способів і устаткування для подрібнення м'яса показав, що на даний час запропоновано безліч структурних схем подрібнювального обладнання, які розрізняються за способом механічної дії на матеріал, станом біополімерів м'яса при подрібненні, принципом організації процесу (періодичний, безперервний), конструкцією машин і робочих органів, способом завантаження і видалення матеріалу із зони подрібнення. Характерною особливістю всіх запропонованих класифікаційних схем є та, що в їх основу покладений поділ способів і пристроїв за дискретними ознаками: подрібнення при низьких і підвищених температурах; обробка крихких в'язкотекучих та еластичних матеріалів, застосування ударної стираючої, різальної, зсувної дії робочих органів тощо. А щодо конструктивних ознак, то з використанням принципу створення класифікаційних схем [209] їх можна розвивати до нескінченності по мірі поглиблення аналізу існуючих і створення нових конструкцій. Жодна із запропонованих класифікацій, навіть при їх об'єднанні, не дозволяє провести узагальнений аналіз існуючих конструкцій через наявність безлічі дискретних класифікаційних ознак та бути основою для синтезу нових видів устаткування.

Тому, для узагальнення класифікації способів і устаткування для подрібнення, потрібно визначити ті дискретні ознаки, що характеризують способи і обладнання для подрібнення, які можуть бути описані безперервними функціями їх зміни в залежності від виду сировини і технологічних умов подрібнення, і ті загальні ознаки, які неможливо подати як безперервні і їх кількість мінімальна. Тільки на основі такої класифікації можливе створення узагальненої математичної моделі.

В результаті аналізу процесів, що відбуваються при подрібненні біополімерів м'яса і хімічних полімерів в механічних пристроях [110, 140, 225] встановлено, що їх дискретними ознаками є лише структурні схеми обладнання, що визначають характер руху матеріалу під час технологічної обробки і виділено наступні основні параметри, які можуть бути описані безперервними функціями:

- геометричні і кінематичні параметри робочих органів;
- геометричні характеристики матеріалу;
- фізико-механічні властивості біополімерів м'яса в залежності від технологічних умов подрібнення (температури, швидкості і умов деформування).

При взаємодії поверхонь робочого органу з матеріалом виконується робота:

$$A_p = A_{деф} + A_{руїн} + A_{тер}, \quad (4.44)$$

де  $A_{деф}$ ,  $A_{руїн}$ ,  $A_{тер}$  - відповідно, частини роботи, витрачені на деформування і руйнування матеріалу та подолання сил тертя.

Коефіцієнт корисної дії робочого органу:

$$\eta_p = \frac{A_{руїн}}{A_p}. \quad (4.45)$$

Елементарні акти утворення вільної поверхні матеріалу можливі при дії робочого органу в межах:

$$V_p = S_a \cdot l_a \quad (4.46)$$

де  $V_p$  - об'єм області можливого руйнування матеріалу;  $S_a$  - площа перетину робочої порожнини подрібнювача у напрямку нормалі до відносної швидкості основного потоку матеріалу і робочих органів;  $l_a$  - довжина області можливого руйнування.

При розтягуванні зразка матеріалу область  $V_\delta$  обмежена повним об'ємом, що деформується, а при різанні це область об'ємом  $V_p = \Delta_p L_p h_m$ .

Очевидно, що геометричні параметри робочих органів подрібнювального обладнання характеризують потенційну інтенсивність технологічної дії на матеріал, яка, перш за все, визначена ступенем охоплення робочими органами об'єму порожнини машини. Цю потенційну інтенсивність можна записати так:

$$I_0 = \frac{S_a}{\sum S_p}, \quad (4.47)$$

де  $\sum S_p$  - сумарна площа проекції ефективної поверхні робочих органів, яка має безпосередній контакт з матеріалом, на площину  $S_a$  (очевидно  $0 < I_0 \leq 1$ ).

Ступінь заповнення робочої порожнини подрібнювача матеріалом:

$$0 < \frac{V_m(t)}{O_{II}} \leq 1. \quad (4.48)$$

де  $V_m(t)$  - кількість матеріалу в подрібнювачі в даний момент часу;

$O_{II}$  - об'єм робочої порожнини подрібнювача.

Тоді дійсний коефіцієнт інтенсивності технологічної дії.

$$I_{\partial} = I_0 \frac{V_m(t)}{O_{II}}. \quad (4.49)$$

Опір матеріалу подрібненню залежить від його механічних властивостей як суцільного середовища і його макроструктури, зокрема від наявності дефектів і тріщин, кількість яких можна виразити як площу вільної поверхні в одиниці об'єму, тобто питому площу вільної поверхні:

$$S_{num} = \frac{S_m}{V_m}, \quad (4.50)$$

де  $S_m$  - площа вільної поверхні в об'ємі  $V_m$  матеріалу.

Для досягнення початку руйнування суцільного бездефектного об'єму  $V_m$  матеріалу потрібно виконати роботу:

$$A = [w] \cdot V_m, \quad (4.51)$$

де  $[w]$  - граничне значення питомої енергії деформації, перевищення якого супроводжується скиданням механічної енергії на утворення нової поверхні.

Наступне приращення роботи деформування призводить до утворення нової поверхні:

$$dS_i = \frac{dA}{\alpha^S}, \quad (4.52)$$

де  $\alpha^S$  - питома енергія утворення одиниці площі вільної поверхні матеріалу (Дж/м<sup>2</sup>).

Початкові умови розв'язання рівняння (4.52):

$$S = 0, \text{ при } A = [w] \cdot V_m. \quad (4.53)$$

Така оцінка інтенсивності дії робочих органів на матеріал буде справедливою для всіх типів механічних подрібнювальних машин.

Кінематичні характеристики робочих органів можуть бути описані рівняннями руху, а геометричні характеристики матеріалу можна подати за допомогою функції зміни площі вільної поверхні матеріалу [140, 225,

92]. Опір матеріалів деформуванню, міцність і сили тертя та їх залежність від температури, швидкості та умов деформування можна описати на основі експериментальних досліджень та теоретичних відомостей з фізики і механіки полімерів та біополімерів.

Для визначення характерних ознак пристроїв для подрібнення, що мають дискретний характер, нами [225] проведений аналіз можливих структур потоків подрібнювальних матеріалів (м'ясної сировини), що складає математичний опис їх гідродинамічної структури, особливості якої визначають ефективність роботи подрібнювачів.

**За моделлю ідеального витискання**, незалежно від складних реальних траєкторій руху матеріалу, він рухається через зону обробки прямолінійної і частинки, що мають різні властивості не зміщуються одна відносно іншої. Час перебування частинок в зоні подрібнення однаковий:

$$t = \frac{O_{з.н.}}{Q_m}, \quad (4.54)$$

де  $O_{з.н.}$  - об'єм зони подрібнення;  $Q_m$  - об'ємна продуктивність потоку подрібнюваного матеріалу.

Швидкість зміни властивостей такого ідеалізованого потоку:

$$\frac{dC}{dt} = -v \left( \frac{dC}{dz} \right), \quad (4.55)$$

де  $C$  - досліджуваний параметр;  $v$  - лінійна швидкість потоку матеріалу;  $z$  - координата переміщення.

**За моделлю повного перемішування** в усіх точках об'єму зони обробки властивості частинок однакові і рівні їх значенням на виході:

$$\frac{dC}{dt} = \left( \frac{Q_m}{V_{з.н.}} \right) \cdot (C_{ex} - C_{вих}). \quad (4.56)$$

У реальних випадках час перебування частинок у потоці не однаковий і відрізняється від середнього часу, визначеного за рівнянням (4.54), а будь-яке відхилення від ідеального витискання умовно називають перемішуванням. Це явище можна описати з використанням дифузійної і осередкової моделей.

**За дифузійною моделлю** перемішування матеріалу в потоці у напрямі його руху описується виразом, формально відповідним закону молекулярної дифузії Фіка [96]. По аналогії з коефіцієнтом молекулярної дифузії в законі Фіка ступінь поздовжнього перемішування у дифузійній моделі характеризується коефіцієнтом поздовжнього перемішування  $D_L$ . Цю модель можна записати так:

$$\frac{dC}{dt} = -v \left( \frac{dC}{dz} \right) + D_L \left( \frac{d^2C}{dz^2} \right). \quad (4.57)$$

Як і у моделі ідеального витискання профіль швидкостей частинок матеріалу в перпендикулярному перетині зони обробки однаковий. Лише коефіцієнт поздовжнього перемішування  $D_L$  враховує вплив чинників, які викликають структурну нерівномірність потоку, але він не дозволяє повною мірою їх врахувати. Включення ж у рівняння (4.57) додаткових корегуючих членів для більш достовірного відображення реальної структури потоку призводить до ускладнення моделі і можливостей її практичного застосування.

**Осередкова модель** структури потоку дозволяє, окрім поздовжнього перемішування, врахувати й інші особливості руху потоку подрібнюваного матеріалу.

За цією моделлю подрібнювач складається з послідовно сполучених  $n$  осередків повного перемішування. Якщо їх об'єм однаковий, то така модель описується системою  $n$  рівнянь:

$$\left( \frac{1}{n} \right) \cdot \left( \frac{dC_i}{dt} \right) = \left( \frac{Q_m}{V_{з.н.}} \right) \cdot (C_{i-1} - C_i) \left( \frac{1}{n} \right) \cdot \left( \frac{dC_i}{dt} \right) = \left( \frac{Q_m}{V_{з.н.}} \right) \cdot (C_{i-1} - C_i), \quad (4.58)$$

де  $i = 1, 2 \dots n$ .

В цій моделі,  $n$  - це єдиний параметр за допомогою якого характеризується ступінь нерівномірності розподілу частинок потоку матеріалу за часом перебування в моделі. Тому така модель, як і дифузійна, не дозволяє адекватно відобразити складні явища, якими характеризується рух матеріалу при подрібненні. Разом з тим, її легко можна удосконалити за рахунок більш повного віддзеркалення характеру руху матеріалу в подрібнювачах.

Області застосування розглянутих моделей безумовно залежать від виду технологічного обладнання, геометричних параметрів робочих зон та інструментів, фізико-механічних та реологічних властивостей подрібнюваного матеріалу і режимів обробки.

Залежності характеристик готового продукту від часового чинника, а саме від добутку константи швидкості подрібнення на час подрібнення, дають рішення диференціальних рівнянь моделей.

На відміну від хімічних процесів, які характеризуються безперервними, монотонними кінетичними рівняннями, подрібнення може відбуватись за рахунок ряду окремих актів руйнування матеріалу. Тому цей процес доцільно подати у вигляді послідовного ланцюга з комірок, кожна з яких характеризується стаціонарними умовами руху,

деформування і руйнування матеріалу при незмінних властивостях. Кожна комірка характеризується певною інтенсивністю і умовами технологічної дії робочих органів на матеріал. При проходженні  $i$ -ї комірки вільна поверхня матеріалу змінюється до величини  $S_{i+1}$ . В залежності від виду подрібнювача кількість комірок може складати:  $n = 1$  - при одноразовому навантаженні і руйнуванні певного об'єму матеріалу  $V_m$ ;  $n = k$  - при дискретному деформуванні об'єму  $V_m$   $k$  разів;  $n = \infty$  - при монотонно зростаючій інтенсивності деформування протягом часу перебування матеріалу в подрібнювачі.

В залежності від типу структури матеріального потоку і значення  $n$  подрібнювачі можна класифікувати за схемою, поданою на рис. 4.14.

**Подрібнювачі першого типу** з ідеальним витисканням матеріалу і кратністю механічної дії  $n = 1$  характеризуються постійною швидкістю утворення нової поверхні (інтенсивністю подрібнення), а руйнування матеріалу відбувається по мірі його переміщення відносно робочих органів і збільшується пропорційно узагальненій координаті переміщення  $x$ . Кінетика такого процесу подрібнення описується рівнянням:

$$\frac{dS}{dt} = f(x) = \text{const}, \quad (4.59)$$

де  $f(x)$  - деяка функція координати взаємного переміщення робочого органу і матеріалу.

До таких подрібнювачів можна віднести всі технологічні машини, в яких відбувається цілеспрямоване руйнування матеріалу при його однократній взаємодії з робочим органом.

Характерною ознакою подрібнювачів цього типу є та, що матеріал при взаємодії з руйнуючим інструментом спочатку деформується до критичного стану  $\sigma_\delta$  (початку руйнування), а потім відбувається сталий процес утворення нової поверхні аж до його завершення.

Відносний рух матеріалу і робочого органу може бути простим і складним. Наприклад, при вирубуванні частин туші тварини різакми на пресах реалізується простий відносний рух матеріалу і інструменту, а при розрізанні пластових матеріалів дисковими ножицями чи стрічковими ножами відбувається складний рух матеріалу відносно інструменту. Таке ускладнення руху дає можливість цілеспрямованого керування технологічними зусиллями і ступенем підвищення продуктивності.

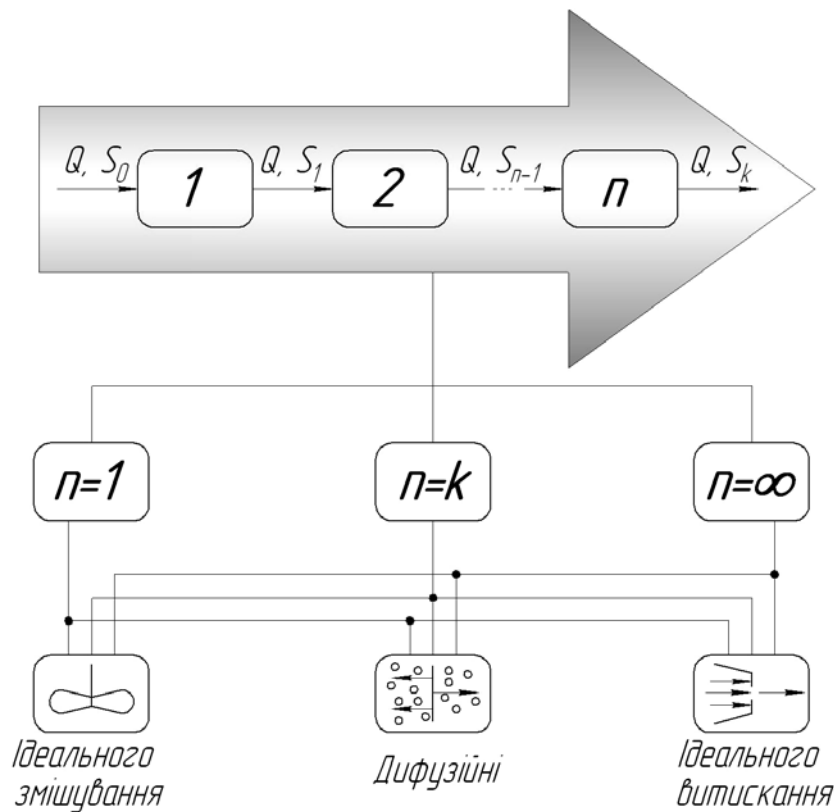


Рис. 4.14 – Схема класифікації пристроїв для подрібнення за структурою потоків матеріалу

Вид функції  $f(x)$  визначається конструктивними і технологічними параметрами подрібнювача. Наприклад, для машини, що розрізає смугу матеріалу, наприклад, шпика, товщиною  $v_i$  за умови його подачі з постійною швидкістю  $v_i$  на нерухомий ніж функція (4.59) запишеться так:

$$dS/dt = bv_m. \quad (4.60)$$

Легко прийти до висновку, що такі подрібнювачі ефективні при поділі на частини довгомірних матеріалів і при дробленні на невелику кількість частин великогабаритної м'ясної сировини.

**Подрібнювачі другого типу**, з ідеальним витисканням і кратністю механічної дії  $n = k$  можна подати як послідовний ряд руйнуючих елементів подрібнювачів першого типу зі збільшенням інтенсивності дії на матеріал. Зняття навантаження на матеріал при його переході до наступного руйнуючого органу знижує енергетичну ефективність подрібнення.

**Подрібнювачі третього типу** з ідеальним витисканням і кратністю механічної дії  $n = \infty$  характеризуються монотонним безперервним



збільшенням коефіцієнту інтенсивності механічної дії на матеріал по мірі збільшення узагальненої координати переміщення:

$$I_o = f(x) \quad (4.61)$$

Очевидно, що збільшення технологічної інтенсивності механічної дії  $I_a$  може відбуватись за рахунок зменшення  $\sum S_p$ , або об'єму робочої порожнини пристрою  $O$ , як функцій від координати  $x$ .

**Подрібнювачі четвертого типу** з дифузійною схемою потоку матеріалу і кратністю механічної дії  $n=1$ , характеризуються змінною швидкістю утворення нової поверхні (інтенсивністю подрібнення), а руйнування матеріалу відбувається незалежно від координати його розташування відносно робочих органів і приріст поверхні руйнування залежить від миттєвого значення ступеня подрібнення матеріалу, тобто зменшується пропорційно збільшенню значення  $S_p$ . Кінетика процесу подрібнення для цих подрібнювачів описується рівнянням:

$$dS/dt = f(t, I(S)). \quad (4.62)$$

До подрібнювачів четвертого типу відноситься роторні ножові, ударні молоткові подрібнювачі, струменеві млини та всі інші, в конструкціях яких є пристрої для часткового виведення матеріалу з зони подрібнення по мірі зменшення дисперсності частинок.

Враховуючи, що інтенсивність механічної дії на матеріал по мірі зменшення розмірів частинок у цих подрібнювачах зменшується, для них існує значне обмеження розмірів кінцевого продукту. Тому для отримання дрібнодисперсних частинок матеріалу такі подрібнювачі не ефективні.

**Подрібнювачі п'ятого типу** з дифузійною структурною схемою потоку матеріалу і кратністю механічної дії  $n=k$  характеризуються змінною швидкістю утворення нової поверхні (інтенсивністю подрібнення). Інтенсивність механічної дії на матеріал залежить від координати його розташування в зоні подрібнення і приріст поверхні руйнування залежить від миттєвого значення ступеня подрібнення матеріалу, тобто зменшується пропорційно збільшенню значення  $S_p$ . Зміна інтенсивності механічної дії на матеріал від координати його розташування в подрібнювачі відбувається дискретно і має кінцеву кількість ступенів. Тому рівняння кінетики процесу подрібнення для цих подрібнювачів виглядає таким чином:

$$\frac{dS}{dt} = \sum_{I=I_1, S=S_0}^{I=I_n, S=S_k} f(t, I(S), I_k). \quad (4.63)$$

Представниками таких подрібнювачів є дисмембратори та дезінтегратори, в яких зменшується крок установки руйнуючих елементів по мірі збільшення діаметра їх розташування на рухомих дисках.

**Подрібнювачі шостого типу** з дифузійною структурною схемою матеріального потоку і кратністю механічної дії  $n = \infty$  відрізняються від попередніх подрібнювачів тільки тим, що інтенсивність механічної дії на матеріал змінюється монотонно за певною закономірністю  $I = f(x)$  в залежності від координати переміщення матеріалу. Кінетика процесу подрібнення описується рівнянням:

$$dS/dt = f(t, I(S), I(x)). \quad (4.64)$$

Наприклад, таким вимогам могли б відповідати подрібнювальні дезінтегратори, в яких крок між руйнуючими елементами і діаметр розташування кожного з них змінюються за певними монотонними функціями.

**Подрібнювачі сьомого типу** з структурною схемою потоку матеріалу ідеального змішування і кратністю механічної дії  $n = 1$  характеризуються змінною швидкістю утворення нової поверхні (інтенсивністю подрібнення). В них інтенсивність механічної дії на матеріал і приріст поверхні руйнування залежить від миттєвого значення ступеня подрібнення матеріалу і зменшується пропорційно збільшенню значення  $S_p$ . Досягнення певного ступеня подрібнення регулюється часом обробки матеріалу. Для таких подрібнювачів рівняння кінетики процесу має наступний вигляд:

$$\frac{dS}{dt} = f(t, I(S)). \quad (4.65)$$

До цього типу подрібнювачів можна віднести барабанні і вібраційні млини.

**Подрібнювачі восьмого типу** з схемою потоку матеріалу ідеального змішування і кратністю механічної дії  $n = k$  відрізняються від попередніх подрібнювачів дискретним збільшенням інтенсивності механічної дії на матеріал в залежності від координати його розташування. Кінетику процесу подрібнення у цих подрібнювачах можна описати рівнянням:

$$\frac{dS}{dt} = \sum_{I=I_1, S=S_0}^{I=I_n, S=S_k} f(t, I(S), I(x)). \quad (4.66)$$

До цього виду подрібнювачів можна віднести кульові млини з нахиленим барабаном, який розділений на секції з різним розміром руйнуючих елементів. Кут нахилу барабана визначає швидкість переміщення матеріалу з однієї зони інтенсивності подрібнення в іншу.

**Подрібнювачі дев'ятого типу** з схемою потоку матеріалу ідеального змішування і кратністю механічної дії  $n = \infty$  відрізняються від подрібнювачів сьомого і восьмого типів збільшеною у часі інтенсивністю механічної дії на матеріал незалежно від координати його розташування. Кінетика процесу подрібнення для них описується рівнянням:

$$\frac{dS}{dt} = f(t, I(S), I(t)). \quad (4.67)$$

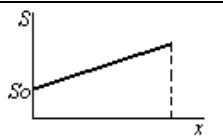
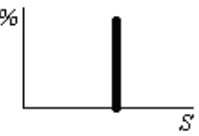
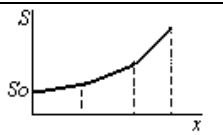
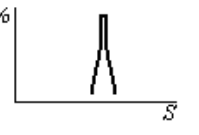
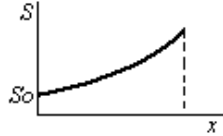
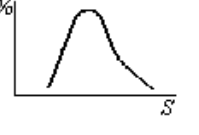
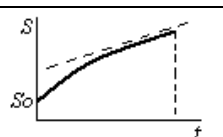
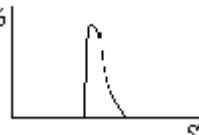
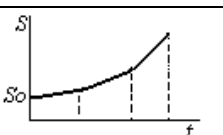
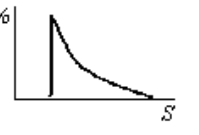
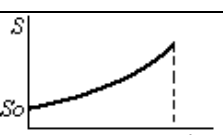
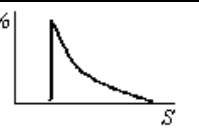
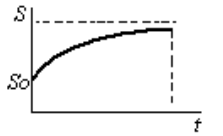
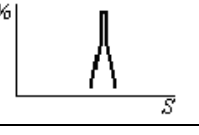


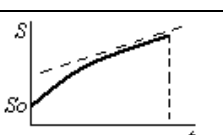
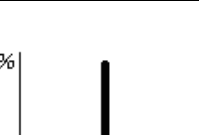
Таким вимогам могли б теоретично відповідати подрібнювачі, в яких по мірі зростання поверхні руйнування в матеріалі буде зростати інтенсивність механічних навантажень. Це в певній мірі свідчить про те, що запропонований принцип класифікації подрібнювальних пристроїв може бути підґрунтям для теоретичного прогнозування і створення нових способів подрібнення і обладнання для їх реалізації.

Отже, дискретні ознаки подрібнювальних машин зводяться до дев'яти структурних схем матеріальних потоків. По кожній структурній схемі визначені характерні рівняння кінетики збільшення площі вільної поверхні матеріалу  $S$  при подрібненні в залежності від координати його переміщення  $x$ , значення інтенсивності технологічної дії  $I$ , а також вид розподілу розмірів продукту подрібнення (табл. 4.1).

#### 4.4.4. Енергетична ефективність подрібнювачів

Традиційні способи подрібнення в основному базуються на комбінації двох методів деформаційного навантаження - стисненні руйнованого тіла в квазістатичному і динамічному режимах, причому деформується весь об'єм тіла. Для оцінки коефіцієнта використання енергії  $k$  за різних способів подрібнення проведемо наступний уявний експеримент. Циліндричний бездефектний зразок, складений з набору атомних площин, розташованих на відстані  $d$ , розтягується до руйнування. Знехтуємо крайовими ефектами і не враховуватимемо різницю в питомій енергоємності роз'єднання двох напівпросторів і двох атомних площин. При подальших міркуваннях буде зрозуміло, що врахування обох обставин привело б тільки до зменшення коефіцієнта використання енергії  $k$ . Тому отримана нижче оцінка буде завищеною.

Таблиця 4.1 – Характеристика процесів подрібнення за різних структурних схем матеріальних потоків

№	Загальний вигляд рівнянь кінетики процесу подрібнення	Тип моделі	Вид функції подрібнення	Вид розподілу розмірів продукту подрібнення	Приклади реалізації
1	$\frac{dS}{dt} = f(x)$	$\overrightarrow{I}$			Одноступеневі ріжучі, пили, пластовочні машини
2	$\frac{dS}{dt} = \sum_{I=I_1, S=S_0}^{I=I_n, S=S_k} f(x)$	$\overrightarrow{k}$			Багатоступеневі ріжучі, дробарки, силові подрібнювачі
3	$\frac{dS}{dt} = f(t, I(S), I(x))$	$\overrightarrow{\infty}$			Валкові, конусні, камерні, вовчки
4	$\frac{dS}{dt} = f(t, I(S))$	$\overleftrightarrow{I}$			Роторні ріжучі, ударної дії з колосниковою решіткою, струменеві
5	$\frac{dS}{dt} = \sum_{I=I_1, S=S_0}^{I=I_n, S=S_k} f(t, I(S), I_k)$	$\overleftrightarrow{k}$			Дисмембратори, дезінтегратори
6	$\frac{dS}{dt} = f(t, I(S), I(x))$	$\overleftrightarrow{\infty}$			Не реалізовані
7	$\frac{dS}{dt} = f(t, I(S))$	$\overrightarrow{D}$			Барабанні, вібромлини
8	$\frac{dS}{dt} = \sum_{I=I_1, S=S_0}^{I=I_n, S=S_k} f(t, I(S), I(x))$	$\overrightarrow{k}$			Кутери, барабанні багатоступеневі, колоїдні млини, емульситатори
9	$\frac{dS}{dt} = f(t, I(S), I(t))$	$\overrightarrow{\infty}$			Не реалізовані

При розтягуванні зразок накопичуватиме потенційну енергію деформації, співрозмірну з роботою зовнішніх сил по роз'єднанню атомних площин.

За бездефектної структури зразка не існує жодної пари сусідніх площин з ослабленим зв'язком і роз'єднання продовжуватиметься до тих пір, поки всі атомні площини не відокремляться. Лише у цей момент чергова енергетична флуктуація стає здатною порушити ослаблений зв'язок між довільно взятими двома атомними площинами, що приводить до поділу зразка на дві частини з утворенням нової поверхні площею

$$S_p = 2 \cdot S_n, \quad (4.68)$$

де  $S_n$  - площа поперечного перетину зразка.

Робота зовнішніх сил до моменту руйнування майже досягає рівня, достатнього для роз'єднання всього зразка на атомні площини і утворення нової поверхні площею

$$\sum S = 2nS_n, \quad (4.69)$$

де  $n$  - кількість атомних площин, що складають зразок.

Таким чином, при руйнуванні зразка теоретичної міцності коефіцієнт використання енергії буде таким:

$$K = \frac{2S_n w}{2nS_n w} = \frac{1}{n} = \frac{d}{l}, \quad (4.70)$$

де  $l$  — довжина зразка.

Характерний розмір  $d$  в твердих тілах складає близько  $2 \cdot 10^{-10}$  м [96]. Приймавши  $l = 20$  мм і підставляючи обидва значення у вираз (4.30), знаходимо  $K = 10^{-8}$ .

Така надзвичайно низька енергоефективність - наслідок прикладення зовнішніх сил до всього об'єму зразка. Гіпотетичний експеримент у перебільшеному вигляді продемонстрував енергетичну згубність такого деформування. Надмірна пружна деформація накопичується в процесі навантаження тіла, а потім переходить у тепло. Енергоємність надмірної деформації особливо велика при руйнуванні великих шматків матеріалу. Так, зі збільшенням лінійного розміру  $D$  шматка енергія його об'ємної деформації росте пропорційно  $D^3$ , а площа поверхні, що утворюється в результаті руйнування, пропорційно  $D^2$ . Тому питома витрата енергії деформації на одиницю утвореної поверхні виявляється пропорційною  $D^{-1}$ . Таким чином при крихкому руйнуванні коефіцієнт використання енергії деформації обернено пропорційний розміру шматка матеріалу.

Разом з тим описане явище відноситься до частинок однакової міцності. Відомо, що зі зменшенням розміру дефектність частинки зменшується а її міцність росте. При деякому граничному мінімальному розмірі повністю припиняється крихке руйнування частинки і настає пластична течія. Але це не відноситься до таких же частинок уявно виділених у довільному місці великого шматка матеріалу. «Міцність» цього об'єму в середньому співпадає не з міцністю згаданої частинки, а з міцністю шматка. Відповідно і середня щільність енергії «граничної» деформації елементарного об'єму і всього шматка теж співпадають. Таким чином, підвищення енергоселективності руйнування пов'язане із створенням локальних граничних навантажень безпосередньо в початковому шматку по місцю руйнування - в протилежність його навантаженню «цілком». Зі збільшенням градієнта напруження збільшується і енергоселективність руйнування.

Високоградієнтні методи застосовувалися на найраніших стадіях розвитку процесів подрібнення. Достатньо згадати розколювання клинами полін дерев і кам'яних блоків. Згодом цей процес замінили розпилюванням, яке забезпечило масову високопродуктивну переробку і витіснило цей енергетично селективний спосіб з одночасним підвищенням масштабів переробки і продуктивності праці та збільшенням витрат енергії. Інший приклад – це різання лезом. Чим гостріше лезо, тим вищий градієнт напруження, менші зусилля різання та енерговитрати.

Таким чином варто організувати подрібнення високоградієнтними способами, зберігши високу продуктивність технологічного процесу.

Важливо знизити витрати енергії на пластичну деформацію біополімерів м'яса за рахунок вибору оптимального співвідношення між навантаженням, швидкістю деформації і тривалістю навантаження. Наприклад, велика швидкість деформування локалізує пластичну деформацію у порівняно невеликій кількості атомних шарів в області формування магістральної тріщини.

Часом варто вдатися до попереднього підвищення крихкості, максимально блокуючи і гальмуючи наявні дислокації, що утворюються в процесі навантаження тіла. Ефект підвищення крихкості твердого тіла виникає тоді, коли дифузія точкових дефектів відбувається з швидкістю, достатньою для їх підходу до існуючих дислокацій, які знов виникають, і утворення навколо них скупчень певної щільності. Для збільшення рухливості атомів інколи необхідне підвищення температури тіла, яка повинна відповідати рівню деформаційного навантаження, а швидкості

переміщення дислокацій і дифузії точкових дефектів повинні узгоджуватись.

Якщо порівняти в подрібнювальних машинах втрати на тертя деталей у вузлах і матеріалу в робочій зоні машини з іншими видами енергетичних втрат, то легко побачити їх вирішальну роль у реалізації технологічного процесу. За рахунок запобігання дисипативної взаємодії робочих органів і навантажуваних частинок подрібнюваного матеріалу енергоємність подрібнення можна знизити щонайменше на порядок. Подальше зменшення енергоємності процесу можливе за умови виключення взаємодії вже подрібнених частинок матеріалу з робочими органами машин і між собою. Це значить, що час  $t_2$  перебування частинки в дисипативних контактах при подрібненні має наближатись до тривалості акту її руйнування  $t_1$ . Він може оцінюватись за допомогою коефіцієнта використання часу:

$$K_t = \frac{t_2}{t_1} \quad (4.71)$$

Зрозуміло, що бажано наближення цього коефіцієнта до 1.

Оцінимо величину цього коефіцієнта для подрібнювальних пристроїв, класифікованих у відповідності з структурою матеріальних потоків (див. табл. 4.1). З урахуванням того, що руйнування крихкого матеріалу відбувається завдяки розповсюдженню тріщин з швидкістю  $v$ , яка швидко досягає закритичних максимальних швидкостей  $v_{\max}$  то приріст утворення нової поверхні від розповсюдження однієї тріщини можна описати формулою:

$$\Delta S_1 = v_{\max} h, \quad (4.72)$$

де  $\Delta S$  - приріст нової поверхні;  $h$  - глибина тріщини (лінійний розмір частинки).

Середнє значення часу руйнування матеріалу в подрібнювачі:

$$t_1 = O_3 / Q, \quad (4.73)$$

де  $O_3$  - об'єм завантаження робочої порожнини подрібнювача;  $Q$  - продуктивність машини.

Якщо загальний приріст поверхні при дробленні  $1 \text{ м}^3$  матеріалу за прийнятого режиму складає  $S_n$  ( $\text{м}^2/\text{м}^3$ ), то загальний середній приріст поверхні при руйнуванні однієї частинки об'ємом  $h^3$  за час  $t_1$  буде рівним  $S_n h^3$ . Тоді приріст поверхні частинки за 1 секунду складає:

$$\Delta S_1 = \frac{S_n h^3}{t_1} = \frac{S_n h^3 Q}{O_3} \quad (4.74)$$

Для гіпотетичного випадку розповсюдження всередині частинки в кожен момент часу лише однієї тріщини (міркування введене для більшої наочності викладок) можна записати:

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{\Delta S_1}{\Delta S_2}. \quad (4.75)$$

Розділивши вираз (4.74) на (4.75) і підставивши результат у (4.73), одержимо:

$$K_t = \frac{v_{\max} O_3}{S_i h^2 Q}. \quad (4.76)$$

З виразу (4.76) очевидно, що подрібнювач тим енергетично вигідніший, чим менше відношення об'єму його завантаження до продуктивності і чим вищий питомий приріст поверхні при подрібненні одиниці об'єму матеріалу.

Формула (4.76) передбачає, що в частинці розповсюджується тільки одна тріщина. Насправді такого обмеження не існує. Це значить, що реальний коефіцієнт часу  $K_t$  набагато більший. Він ще більше зростає зі зменшенням лінійного розміру частинок  $h$ .

Таким чином витрати на зовнішнє тертя в подрібнювачах можна знизити вживши наступних заходів:

- зменшити співвідношення об'єму робочої зони і об'ємної продуктивності машини;
- швидкість переміщення робочих органів машини і їх хід по відношенню до взаємодіючих в процесі руйнування тіл потрібно зменшувати;
- після руйнування готовий продукт потрібно якнайшвидше вилучити з робочої зони.

Проведений аналіз дозволяє провести наближену оцінку енергоефективності подрібнювальних машин за класифікаційними ознаками (див. табл. 4.1).

Найнижча енергетична ефективність притаманна подрібнювачам типів 7, 8, 9. Середня – подрібнювачам типів 4, 5, 6. Найбільш енергоекономними є подрібнювачі 1, 2, 3 типу, завдяки негайному виведенню готового продукту після руйнування з робочої зони.



#### 4.4.5. Математична модель процесу подрібнення біополімерів м'яса

Будь яку зі структурних схем подрібнювачів (див. табл. 4.1) можна математично описати за наявності рівнянь, які зв'язують у часі безперервними функціями геометричні розміри обладнання, властивості і фізико-механічний стан подрібнюваного матеріалу залежно від умов подрібнення, геометричні і кінематичні характеристики робочих органів.

Узагальнену математичну модель процесу подрібнення можна подати системою диференціальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI}{dt} = f_I(x, S, t); \\ \frac{dS}{dt} = f_S(x, I, t); \\ \frac{dx}{dt} = f_x(t); \\ \frac{dA}{dt} = f(I, M, S, t, x, T); \\ \frac{dM}{dt} = f(T, x, \frac{dx}{dt}, S); \\ \frac{dT}{dt} = f(x, t, A, \theta), \end{array} \right. \quad (4.77)$$

де  $S$  - площа вільної поверхні матеріалу;  $I$  - інтенсивність механічної дії на матеріал;  $A$  - робота подрібнення;  $T$  - температура;  $M$  - параметр механічних властивостей матеріалу;  $\theta$  - тепловий потік;  $x$  - узагальнена координата положення.

Зрозуміло, що така система може розв'язуватись за певних початкових і граничних умов, які визначають стан матеріалу до руйнування, граничні умови його міцності, температурну стійкість біополімеру та ін.

Очевидно, що для полегшення розв'язку системи для кожного окремого випадку треба визначити можливі спрощення. Задача ускладнюється тоді, коли потрібно розглянути деформування і руйнування не суцільного середовища, а сукупності часток матеріалу, різних за розміром і формою.

Таке відображення процесу руйнування сукупності частин матеріалу в робочих зоні подрібнювача можна звести до вирішення наступних задач:

- розробки фізичної моделі матеріалу або її вибору;
- розв'язку задачі про напружений стан подрібнюваного матеріалу;

- аналітичного опису процесу руйнування окремого шматка матеріалу у визначеному силовому полі;
- моделювання трансформації гранулометричного складу матеріалу в робочій зоні за час його подрібнення;
- математичного опису взаємодії функціональних зон подрібнювача.

Розробку фізичної і реологічної моделей сукупності подрібнюваного матеріалу можна розпочати з представлення його у вигляді однорідного за хімічним складом, але різнорідного за формою і розмірами окремих шматків. Разом з тим, аналітичні методи розрахунку напруженого стану таких середовищ не досконалі, а тому доцільно представляти матеріал у вигляді суцільного середовища із відповідно підібраними фізичними і реологічними властивостями. Тоді для вивчення процесу руйнування матеріалу в робочій зоні машини можна скористатись аналітичним апаратом механіки суцільного середовища і класичної термодинаміки. Важливо підібрати просту модель, описуючу дійсні реологічні властивості подрібнюваного біополімеру м'яса.

Однією з можливих моделей сукупності подрібнюваного матеріалу, може бути модель деформуємого твердого тіла [225, 142], якій притаманні різновиди тіл: пружне, пружно-пластичне, в'язке і в'язко-пружне та різні модифікації цих тіл.

Для моделювання подрібнюваного біополімерного матеріалу можливе використання також моделей суцільного середовищ, призначених для опису сипких середовищ (зв'язаних, не зв'язаних, ідеальних пластичних, зернистих). При цьому можна виходити з того факту, що у сипкому середовищі виникають тільки напруження стиснення  $\sigma$  і дотичні напруження  $\tau$  [225, 142]. Напруження  $\sigma$  і  $\tau$  можуть виникати одночасно на одній площині. Причому  $\sigma$  і  $\tau$  зв'язані залежністю

$$\tau \geq \pm\Phi(\sigma), \quad (4.78)$$

де  $\Phi(\sigma)$  - безперервно зростаюча функція.

Частинам сипкого середовища властива пружність і міцність, які забезпечують відсутність пластичних деформацій за наявності  $\sigma$  і  $\tau$ . В загальному випадку сипке середовище анізотропне.

Як основну розрахункову модель реального сипкого середовища можна використовувати суцільне середовище, яке має здатність чинити опір розтягуванню і зрушенню в межах сил внутрішнього тертя і зчеплення. Така розрахункова модель називається зв'язаним сипким середовищем [142].

Іншою моделлю сипкого середовища може бути таке суцільне середовище, в якому відсутнє зчеплення. Така модель представляє незв'язане сипке середовище.

Якщо в моделі сипкого середовища відсутнє внутрішнє тертя, то така модель називається ідеальним пластичним середовищем.

Моделлю сипкого середовища може бути так зване зернисте середовище, тобто середовище, що складається з твердих зерен правильної форми. Але застосування такої моделі проблематичне через відсутність розвинутого математичного апарату. У загальному випадку перевагу потрібно віддати суцільним моделям сипкого середовища.

Для моделей суцільного середовища запропоновані [60, 96, 142] дві умови міцності. Умова міцності Кулона-Мора яка заснована на тому, що для рівноваги сипкого середовища необхідно, щоб сила зрушення була меншою за суму сил внутрішнього тертя і зчеплення. Умова рівноваги сипкого середовища в точці має вигляд:

$$|\tau| = \sigma \tan \varphi + c, \quad (4.79)$$

де  $|\tau|$  - абсолютна величина дотичного напруження;  $\sigma$  - нормальне напруження;  $\varphi$  - кут внутрішнього тертя;  $c$  - питома сила зчеплення частинок матеріалу.

Загальним критерієм міцності сипкого матеріалу прийнято вважати енергетичну гіпотезу Р.Мізеса [60], згідно якої руйнування матеріалу настає тоді, коли питома енергія, що витрачена на зміну форми тіла, досягає критичної величини:

$$\sigma_i = \tau_{cp} \tan \varphi + c, \quad (4.80)$$

де  $\sigma_i$  - приведені напруження;  $\tau_{cp}$  - дотичне напруження;  $\varphi$  - кут внутрішнього тертя;  $c$  - характеристика міцності сипкого матеріалу, що визначається експериментально.

Багато вчених займалися проблемами деформації м'яса, а до цього часу універсальної теорії не існує. На нашу думку, це пов'язано зі складністю вивчення властивостей реології реальних подрібнених тіл. Основними реологічними моделями, на підґрунті яких розроблені різні математичні теорії є такі: ідеально пружне середовище Гука; ідеально в'язке середовище Ньютона та ідеально пластичне середовище Сен-Венана. Для опису поведінки м'яса при деформуванні часто ці моделі поєднують. Насправді всі природні тіла, у т.ч. і м'ясо мають всі властивості названих реологій, але, в залежності, від умов навантаження

одні домінують, а тоді іншими нехтують для спрощення моделювання [225, 231].

Друга проблема полягає у розв'язанні задачі про напружений стан сукупності матеріалу, що перебуває в робочій порожнині подрібнювача. Щоб дослідити поля напружень у матеріалі треба мати динамічні рівняння його руху. Якщо моделювати сукупність матеріалу суцільною фазою у вигляді твердого тіла то рівняння такого руху описані у багатьох літературних джерелах і тоді це питання не потребує особливого розгляду.

Розглянемо випадок представлення сукупності матеріалу, наприклад, м'ясного фаршу суцільною моделлю сипкого середовища. Вважатимемо, що сипке тіло складається з однорідних частин, розміри яких малі порівняно з областю, що зайнята середовищем. Між частинами тіла є внутрішнє тертя і деяке зчеплення, що характеризується критичним напруженням зчеплення  $k$ . Необхідно розглянути стан середовища після досягнення критичної рівноваги, коли в результаті її порушення частини матеріалу починають рухатися. Переміщення частин представляється таким, що відбувається за рахунок кінцевих деформацій зрушення. Тоді модель рухомого середовища можна подати у вигляді ідеальної рідини, яка має сухе тертя і зчеплення. Приймаємо, що в кожній рухомій точці середовища виконується умова критичної рівноваги:

$$\max(\tau_n - \sigma_n \operatorname{tg} \varphi) = k, \quad (4.81)$$

де  $\tau_n$  - дотичне напруження, що розглядається на майданчику з нормаллю  $\bar{n}$ ;  $\sigma_n$  - відповідне нормальне напруження;  $\varphi$  - кут внутрішнього тертя;  $k$  - критичне напруження зчеплення.

Для плоскої задачі маємо п'ять невідомих функцій - компонентів тензора напружень і переміщень:

$$\sigma_{xx}(x, y, t), \sigma_{yy}(x, y, t), \sigma_{xy}(x, y, t), u(x, y, t), v(x, y, t). \quad (4.82)$$

Тоді у змінних Ейлера рівняння руху для прийнятої ідеальної рідини має вигляд:

$$\begin{cases} X - \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}; \\ Y - \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} \right) = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}, \end{cases} \quad (4.83)$$

де  $X, Y$  – проекції діючої об'ємної сили;  $\rho$  - насипна густина сипкого середовища;  $u, v$  – складові швидкостей переміщень;  $\sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{yy}$  - складові тензора напружень.

За третє рівняння можна прийняти рівняння критичної рівноваги [60, 142]:

$$(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})^2 + 4\sigma_{xy}^2 = \sin^2 \varphi (\sigma_{xx} - \sigma_{yy} + 2k \operatorname{ctg} \varphi)^2. \quad (4.84)$$

За четверте рівняння, яке описує стан моделі матеріалу, приймаємо рівняння суцільності середовища:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (4.85)$$

П'яте рівняння впливає з умови однакового напрямку максимальних швидкостей деформацій зсуву і напрямку швидкостей ковзання [59, 142]:

$$\frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}} = \frac{\frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \pm \frac{\partial u}{\partial x} \operatorname{tg} \varphi}{\frac{\partial u}{\partial x} \mp \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \operatorname{tg} \varphi}. \quad (4.86)$$

Вибір знаку в рівнянні (4.86) визначається активним номером сімейства ліній ковзання.

Таким чином, маємо замкнуту систему рівнянь (4.83) - (4.86) яку треба доповнити крайовими умовами, які повністю визначаються конкретною конструкцією подрібнювача.

Розв'язок задачі про напружений стан сукупності матеріалу в робочому об'ємі подрібнювача для кожної моделі середовища можна отримати чисельним методом розрахунку.

Можливість розрахунку поля напружень у робочій порожнині подрібнювача дає підхід до вирішення проблеми аналітичної інтерпретації процесу руйнування окремого шматка матеріалу на підґрунті теорії розвитку тріщин в тілі, що знаходиться під дією конкретної системи сил. При цьому руйнування твердого тіла умовно можна підрозділити на два типи: крихке і пластичне.

Підхід до вирішення проблеми розробки методів розрахунку зміни гранулометричного складу матеріалу може бути оснований на використанні напівемпіричних законів подрібнення, статистичних даних за видами машин і на розрахунковому полі діючих на матеріал сил у робочій зоні конкретного подрібнювача. При цьому порядок досліджень може бути наступним:

- за розрахунковим полем напружень і деформацій визначається енергія, що передається шматку матеріалу у конкретному подрібнювачі;
- з використанням закономірностей подрібнення, емпіричних і статистичних даних визначаються особливості процесу поділу шматків на частини;
- проводяться спеціальні експерименти для уточнення закономірностей подрібнення у конкретній машині.

Оскільки параметри процесу подрібнення в першу чергу залежать від фізико-механічних і хімічних властивостей матеріалу, які для м'яса залежать від температури, тиску, швидкості деформування та інших чинників [225], то аналітичний опис процесу можливий на основі математичної моделі, яка до певної міри їх враховує. Основним показником ефективності кінцевого результату може служити кількість енергії, витраченої на утворення одиниці площі вільної поверхні матеріалу. Крім цього показниками кінцевого результату є дисперсність і якість продукту продуктивність процесу, інтенсивність спрацювання робочих органів тощо.

#### 4.4.6. Моделі руйнування м'яса при подрібненні

М'ясо і м'ясопродукти, які подрібнюють для отримання якісних готових виробів мають широкий спектр властивостей [175, 225, 244]. Кожний з матеріалів має свої особливості механічної поведінки і їх залежності від технологічних умов переробки. Разом з тим, на наш погляд, буде достатнім описати процес утворення нових поверхонь у біополімерах м'яса за крихким, високоеластичним і пластичним механізмами руйнування, що перекликається з процесами подрібнення хімічних полімерів.

Міцність крихкого матеріалу характеризується граничним напруженням крихкого руйнування  $[\sigma_k]$ . При досягненні таких напружень полімер руйнується миттєво за атермічним механізмом. Енергія у цьому випадку витрачається на динамічні і поверхневі втрати при розриванні жорстких зв'язків, а прирощення пружної деформації матеріалу майже відсутнє ( $\frac{d\varepsilon_{np}}{d\tau} \rightarrow 0$ ) [60, 139].

За термодинамічним підходом до міцності ця енергія витрачається в основному на утворення вільної поверхні [141]:

$$[w_k] = \alpha_k^s S_k, \quad (4.87)$$

де  $S_{\kappa}$  - площа поверхні руйнування за крихким механізмом;  $\alpha_{\kappa}^S$  - коефіцієнт, що характеризує питому енергію утворення площі вільної поверхні при крихкому руйнуванні.

Умова міцності  $\sigma \leq [\sigma_{\kappa}]$  лише якісно відображає початок процесу руйнування крихкого матеріалу. Для кількісного відображення процесу руйнування використовуємо енергетичний критерій міцності Мізеса-Губера-Генкі [60], згідно з яким руйнування матеріалу настає за умови досягнення питомої енергії пружної деформації зміни форми деякого критичного значення:

$$[w_{\kappa}] = A_{np}^{num} = \frac{\alpha_{\kappa}^S S_{\kappa}}{V_{деф}}, \quad (4.88)$$

де  $A_{np}^{num}$  - питома робота пружної деформації;  $\frac{\alpha_{\kappa}^S S_{\kappa}}{V_{деф}}$  - питома енергія, достатня для утворення вільної поверхні  $S_{\kappa}$  в частині об'єму матеріалу, що деформується  $V_{деф}$ .

З урахуванням того, що  $\frac{S_{\kappa}}{V_{деф}} = S_{\kappa}^{num}$ , формула (4.88) прийме вигляд:

$$[w_{\kappa}] = A_{np}^{num} = \alpha_{\kappa}^S S_{\kappa}^{num}, \quad (4.89)$$

де  $S_{\kappa}^{num}$  - питома площа передбачуваної поверхні руйнування.

У прогнозуванні площі  $S_{\kappa}^{num}$  є невизначеність, тому що в реальних матеріалах утворення тріщин відбувається по місцях ослабленої структури у напрямку головного дотичного напруження [95]. Для спрощення прийемо, що утворювана вільна поверхня є площиною, направленою в матеріалі так, що енергія  $[w_{\kappa}]$  мінімальна.

Приріст питомої роботи пружної деформації зміни форми запишеться так:

$$dA_{np}^{num} = \sigma d\varepsilon_{np}. \quad (4.90)$$

Рівняння утворення вільної поверхні в умовах пружного руйнування:

$$dS_p = \frac{V_{деф}}{\alpha_{\kappa}^S} dA_{np}^{num}. \quad (4.91)$$

Або

$$dS_p^{num} = \frac{dA_{np}^{num}}{\alpha_{\kappa}^S}. \quad (4.92)$$

Розв'язок рівняння (4.83) можливий за наступних початкових умов:

$$\left. \begin{aligned} A_{np}^{num} &= [w_{\kappa}] \\ S_{\kappa} &= S_{\kappa 0} \end{aligned} \right\} \quad (4.93)$$

де  $S_{\kappa 0}$  - площа руйнування в об'ємі  $V_{деф}$  матеріалу до деформування (за відсутності руйнування і дефектів структури  $S_{\kappa 0}=0$ ).

Значення  $[w_{\kappa}]$  можна визначити експериментально при випробуваннях на зріз або розтягування зразків матеріалу в умовах крихкого руйнування.

При деформуванні м'яса у високоеластичному стані відбувається нерівномірне навантаження з наступним розриванням зв'язків. Це пов'язано перш за все нерівномірністю розподілу довжин ланцюгів макромолекул біополімеру і частоти поперечних зв'язків.

Високоеластичне руйнування призводить до утворення нової поверхні в об'ємі матеріалу, причому приріст поверхні руйнування пропорційний приросту деформації елемента матеріалу.

Припустимо, що руйнування за високоеластичним механізмом також розпочинається при досягненні напруження в матеріалі критичного значення. Тоді умова початку високоеластичного руйнування буде такою:

$$\sigma = [\sigma_{вел}], \quad (4.94)$$

де  $[\sigma_{вел}]$  - граничне напруження початку високоеластичного руйнування матеріалу.

Приріст питомої роботи:

$$dA_{вел}^{num} = [\sigma_{вел}] d\varepsilon_{вел}, \quad (4.95)$$

де  $\varepsilon_{вел}$  - приріст високоеластичної деформації.

За критерієм Губера-Мізеса-Генкі, умовою початку високоеластичного руйнування буде така:

$$[w_{вел}] = \alpha_{вел}^S S_{вел}^{num} = \frac{\alpha_{вел}^S S_{вел}}{V_{деф}}, \quad (4.96)$$

де  $S_{вел}^{num}$  - питома площа збільшення вільної поверхні;  $\alpha_{вел}^S$  - коефіцієнт, характеризуючий питому енергію утворення площі вільної поверхні;  $\frac{\alpha_{вел}^S S_{вел}}{V_{деф}}$  - питома енергія, достатня для утворення вільної поверхні  $S_{вел}$  при деформуванні об'єму  $V_{деф}$ .



Якщо матеріал поєднує високоеластичні і пружні властивості, то руйнування за високоеластичним механізмом почнеться за умови:

$$[w_{вел}] = A_{np}^{num} + A_{вел}^{num} \quad (4.97)$$

Рівняння утворення нової поверхні для такого матеріалу:

$$dS_{вел} = \frac{V_{деф}}{\alpha_{вел}^S} d(A_{np}^{num} + A_{вел}^{num}), \quad (4.98)$$

або

$$dS_{вел}^{num} = \frac{d(A_{np}^{num} + A_{вел}^{num})}{\alpha_{вел}^S}. \quad (4.99)$$

Розв'язок останнього рівняння можливий за наступних початкових умов:

$$\left. \begin{aligned} (A_{np}^{num} + A_{вел}^{num}) \\ S_{вел}^{num} = S_{вел0}^{num} \end{aligned} \right\} = [w_{вел}] \quad (4.100)$$

де  $S_{вел0}^{num}$  - площа вільної поверхні в матеріалі до деформації.

Початок руйнування м'яса за механізмом пластичного (в'язкого) деформування розпочинається при досягненні межі пластичної деформації:

$$\sigma = [\sigma_{нл}], \quad (4.101)$$

де  $\sigma$  - напруження в матеріалі;  $[\sigma_{нл}]$  - межа пластичності.

Приріст питомої роботи у цьому випадку:

$$dA_{нл}^{num} = [\sigma_{нл}] d\varepsilon_{нл}, \quad (4.102)$$

де  $\varepsilon_{нл}$  - деформація матеріалу за пластичним механізмом.

На відміну від крихкого і високоеластичного руйнування при пластичній деформації всередині об'єму матеріалу не утворюється нова поверхня, а відбувається відносно зміщення мікрооб'ємів, якому протидіють сили міжмолекулярної взаємодії, що супроводжується виділенням теплоти. За критерієм Губера-Мізеса-Генкі умову початку пластичної деформації можна подати так:

$$[w_{нл}] = \alpha_{нл}^S S_{нл}^{num} = \frac{\alpha_{нл}^S S_{нл}}{V_{деф}}, \quad (4.103)$$

де  $S_{нл}^{num}$  - питома площа мікрооб'ємів (молекулярного рівня);  $\alpha_{нл}^S$  - коефіцієнт, що характеризує питому енергію утворення площі вільної

поверхні;  $\frac{\alpha_{nl}^S S_{nl}}{V_{деф}}$  - питома енергія, достатня для початку відносного

зміщення поверхні  $\frac{\alpha_{nl}^S S_{nl}}{V_{деф}}$  при деформації об'єму матеріалу  $V_{деф}$ .

Якщо матеріал поєднує пластичні, високоеластичні і пружні властивості, то механізм його руйнування при критичному деформуванні буде залежати від співвідношення питомих робіт цих деформацій і умова початку пластичного деформування (якщо не відбувається крихкого руйнування) буде такою [225, 141]:

$$[w_{nl}] = A_{np}^{num} + A_{вел}^{num}. \quad (4.104)$$

Рівняння утворення вільної поверхні при пластичній деформації пластично-пружного тіла:

$$dS_{\Pi} = \frac{V_{деф}}{\alpha_S^{\Pi}} d(A_{np}^{num} + A_{вел}^{num}), \quad (4.105)$$

а

$$dS_{nl}^{num} = \frac{d(A_{np}^{num} + A_{вел}^{num})}{\alpha_{nl}^S}. \quad (4.106)$$

Розв'язок рівняння (4.106) можливий за початкових умов:

$$\left. \begin{aligned} (A_{np}^{num} + A_{вел}^{num}) \\ S_{nl}^{num} = S_{nl0}^{num} \end{aligned} \right\} = [w_{nl}] \quad (4.107)$$

де  $S_{nl0}^{num}$  - площа поверхні ковзання мікрооб'ємів у матеріалі в зоні деформації.

Наприклад, при плоскопаралельному зсуві куба дисперсного матеріалу розміром  $a_0$ , що складається з кубічних часток розміром  $a_1$ , площа поверхні ковзання при пластичній деформації складає:

$$S_{nl0} = a_0^2 \left( \frac{a_0}{a_1} - 1 \right). \quad (4.108)$$

Якщо  $a_0 \gg a_1$ , то матимемо:

$$S_{nl0}^{num} = \frac{1}{a_1}. \quad (4.109)$$

Отримані теоретичні залежності відображують в загальному вигляді процеси прирощення нової поверхні м'яса за різних механізмів руйнування.

Розглянемо процес руйнування матеріалу який поєднує пружні, високоеластичні і пластичні властивості. Питома робота його загальної деформації  $A^{num}$  представляє суму робіт:

$$A^{num} = A_{np}^{num} + A_{вел}^{num} + A_{nl}^{num} + A_{руйн}^{num} , \quad (4.110)$$

де  $A_{np}^{num}$ ,  $A_{вел}^{num}$ ,  $A_{nl}^{num}$  - відповідно, питомі роботи пружної, високоеластичної і пластичної деформації;  $A_{руйн}^{num}$  - питома робота руйнування матеріалу, що витрачається на утворення нової поверхні і включає всі види механічних втрат.

Прирощення роботи руйнування є сумою прирощень робіт, що витрачаються на утворення нових поверхонь за всіма згаданими механізмами руйнування:

$$dA_{руйн}^{num} = \alpha_S^к dS_к^{num} + \alpha_S^{вел} dS_{вел}^{num} + \alpha_S^{nl} dS_{nl}^{num} . \quad (4.111)$$

Дольова участь кожного виду руйнування залежить від властивостей біополімеру м'яса і умов його деформування:

$$dS_к^{num} = k_к dS^{num} ; dS_{вел}^{num} = k_{вел} dS^{num} ; dS_{nl}^{num} = k_{nl} dS^{num} , \quad (4.112)$$

де  $dS^{num}$  - загальне прирощення питомої площі вільної поверхні;  $k_к$ ,  $k_{вел}$ ,  $k_{nl}$  - коефіцієнти дольової участі, відповідно, крихкого, високоеластичного і пластичного руйнування в утворенні нової поверхні. Підставляючи (4.111) в (4.111) отримаємо:

$$dA_{руйн}^{num} = (\alpha_S^к k_к + \alpha_S^{вел} k_{вел} + \alpha_S^{nl} k_{nl}) dS^{num} . \quad (4.113)$$

Якщо умови змінні в процесі руйнування то рівняння (4.113) можна записати так:

$$dA_{руйн}^{num} = (\alpha_S^к dk_к + \alpha_S^{вел} dk_{вел} + \alpha_S^{nl} dk_{nl}) dS^{num} . \quad (4.114)$$

Не вирішеним є питання про граничні значення питомих енергій деформацій, при яких розпочинається процес руйнування, що входять до початкових умов (4.93), (4.100) і (4.107). Потрібно знайти раціональний шлях для визначення їх чисельних значень, які залежать від умов виконання технологічних операцій подрібнення м'яса.

#### **4.4.7. Алгоритм пошуку ефективного способу і обладнання для подрібнення м'ясної сировини**

Загальний підхід до проектування процесів подрібнення біополімерів м'яса і визначення найбільш ефективного обладнання можна подати у вигляді наступних кроків:

- Задати один або декілька критеріїв якості процесу подрібнення (розмір і форми часток фаршу, розвиненість поверхні, хімічні властивості, вологоутримуючу здатність, енерговитрати, продуктивність та ін).

- Визначитись з видом подрібнювача за розробленою класифікацією і записати у загальному вигляді рівняння кінетики прирощення поверхні руйнування;

- У відповідності з структурою матеріального потоку для конкретного подрібнювача вибрати підхід до розв'язання задач з визначення характеру взаємодії матеріалу і робочих органів машини. Для моделювання машин 1, 2, 3 типу (див. табл. 4.1) можна розглядати подрібнювальний матеріал як суцільне середовище зі зміною властивостей під дією механічних сил і температури. Для моделювання машин 4, 5, 6 типів варто застосовувати підхід, що враховує стохастичний характер взаємодії робочих органів і окремих елементів матеріалу на основі складання рівняння балансу матеріальних потоків. Моделюючи процеси подрібнення у машинах 7, 8, 9 типів доцільно розглядати перероблюваний матеріал як сипке середовище зі змінною дисперсністю в полі дії механічних сил і температур.

- Визначити показники фізико-механічних і реологічних властивостей подрібнюваної м'ясної сировини і встановити характер їх залежності від технологічних умов процесу.

- Скласти у явному вигляді та розв'язати систему рівнянь (4.77).

- Проаналізувати аналітичні залежності, що описують процес подрібнення і їх вплив на цільові функції критеріїв якості процесу.

- Знайти найбільш раціональні конструктивні і технологічні параметри процесу подрібнення біополімерів м'яса.

Таким чином, розроблена вище класифікація обладнання для механічного подрібнення біополімерів м'яса охоплює всі можливі структурні схеми потоків матеріалу і відображає кінетику перетворення його дисперсного складу.

Аналітичне ж поєднання процесів подрібнення біополімерних матеріалів доцільно здійснювати на основі розгляду сукупності енергетичних потоків, що протікають в системі подрібнювач-матеріал.

Обов'язково треба враховувати витрати механічної енергії на переміщення, деформування, руйнування матеріалу робочими органами машин, подолання сил тертя, розсіювання теплової енергії, а також оцінити вплив зовнішніх енергетичних потоків на властивості подрібнюваного матеріалу.

Аналіз енергоощадності подрібнювачів з різними структурними схемами з урахуванням класифікаційних ознак показав, що найбільш економічні машини, в яких матеріал відразу після руйнування видаляється з робочої зони. Енергозатратність на подрібнення біополімерів м'яса можна також знизити за рахунок зменшення їх межі міцності і ступеня деформування до початку руйнування завдяки цілеспрямованому впливу на його фізико-механічні властивості, наприклад, з використанням відповідної термообробки, терміну автолізу тощо.

Подану вище узагальнену математичну модель процесу механічного подрібнення біополімерних матеріалів (4.77) можна застосовувати для аналітичного опису подрібнювального обладнання, яке застосовується у м'ясопереробці.

Корисні у застосуванні також моделі процесів руйнування крихких, пластичних і високоеластичних біополімерних матеріалів, які загалом характеризують майже увесь спектр м'ясної сировини і є добрим підґрунтям для аналізу технологічних процесів і розробки раціональних конструктивних схем обладнання. Алгоритм пошуку найефективніших способів подрібнення м'яса і високопродуктивного обладнання дозволяє реалізувати переробку матеріалів з відомими властивостями при заданих вимогах до кінцевого продукту.

#### **4.4.8. Вибір напрямків синтезу м'ясоподрібнювальних машин**

Структура матеріальних потоків у подрібнювачі визначає його місце у класифікаційній схемі (див. табл. 4.1). Технологічна задача, яку треба розв'язати є основою у виборі структурної схеми обладнання. Для її вирішення бажано мати повну інформацію щодо фізико-механічних і хімічних властивостей сировини, її початкових розмірів, бажаної продуктивності подрібнення, якісних показників подрібненого продукту.

Вибрана структурна схема машини прямо впливає на енергетичну ефективність процесу подрібнення і властивості отриманого продукту (розмір часток, стан поверхні, вологоутримуючу здатність, органолептичні показники, консистенцію, реологію подрібненої маси,

можливість безперешкодного і раціонального застосування в операціях виготовлення готової м'ясної продукції).

Найбільш раціональними за енергетичною ефективністю є подрібнювачі, в яких структура потоку матеріалу відповідає 1, 2 і 3 видам (див. табл. 4.1). Обладнання 1 типу раціонально використовувати для розділення на частини великогабаритних або довгомірних кусків м'яса, особливо якщо до кінцевого продукту пред'являється вимога до чітко визначених розмірів часток. Наприклад, розрізання довгомірних шматків або розрубання на частини сировини з великими розмірами.

Застосування обладнання 2-го типу доцільне якщо потрібно декілька разів застосувати схему 1-го типу і отримати частинки матеріалу дещо менших розмірів. Прикладом такого процесу подрібнення може бути багаторазове, послідовне розрубання чи розрізання шматків матеріалу, або послідовне різання довгомірних м'ясних напівфабрикатів на кількох дискових ножицях зі зменшенням кроку між ножами, або в різних напрямках руху матеріалу. Обладнання 3-го типу є найбільш енергетично ефективним при подрібненні матеріалів на дрібні фракції. Розмір часток матеріалу, які отримують при подрібненні на обладнанні 1, 2, 3 типів визначається геометричними параметрами робочих органів і є керованою величиною. Недоліком обладнання з структурними схемами 1, 2 і 3 є той, що розміри відходів матеріалів, які підлягають подрібненню, повинні відповідати певним вимогам: бути довгомірними при різанні дисковими ножицями, подібними за формою при розрубванні, або мати певний середній розмір при подрібненні, наприклад, у вовчку.

Машини для подрібнення з дифузійною схемою матеріального потоку 4, 5, 6 типів (див. табл. 4.1), хоча і є менш енергетично вигідними, але при їх застосуванні особливі вимоги до розмірів подрібнюваних шматків майже відсутні. Застосування подрібнювачів з структурною схемою 4, 5 і 6 доцільне для отримання часток матеріалу з певним розкидом середнього розміру і форми заготовок, що мають обмеження тільки за максимальним розміром, що відповідає типорозміру обладнання. Зі збільшенням кратності механічної дії  $n$  на такому обладнанні можна отримувати частки матеріалів менших розмірів.

Обладнанню 7, 8 і 9 типів притаманна найменша енергетична ефективність. Це зумовлено багаторазовими механічними діями на матеріал, які не всі призводять до руйнування, а інтенсивність механічної дії зменшується по мірі зменшення розмірів частинок матеріалу. Розмір частинок кінцевого продукту визначається, в першу чергу, часом перебування матеріалу в робочій зоні. Разом з тим, таке обладнання

ефективне, якщо треба досягти дуже малих розмірів частинок матеріалу навіть за підвищених енерговитрат.

Аналітичний аналіз запропонованих структурних схем подрібнення дозволяє вибрати напрямки синтезу машин для подрібнення біополімерів м'яса.

#### **Висновки до розділу 4**

1. Сучасна класифікація подрібнювальних процесів за видами напруженого стану і методами зовнішнього впливу на сировину не дозволяє намітити напрямки синтезу ефективних м'ясоподрібнювальних машин.

2. Запропонований параметр енергетичної ефективності подрібнювачів-змішувачів, який може бути використаний для порівняння будь-яких видів подрібнювального устаткування.

3. Доведено, що на крихке руйнування м'ясопродуктів потрібно значно менше енергії, ніж на в'язко-пластичне і пластичне.

4. Теорія тріщин, які можуть утворюватись за різними схемами у подрібнюваному матеріалі, є надійним підґрунтям для математичного опису м'ясоподрібнювальних процесів і основою для застосування високо градієнтних способів диспергування сировини.

5. Аналітично доведено, що при вільному різанні м'яса (кутеруванні) загальна робота, що втрачається на реалізацію процесу, є сумою робіт на розривання міжмолекулярних зв'язків продукту, в'язкопластичну деформацію, зміщення боковин розтину, подолання сил тертя і переміщення відрізаних кусочків. Всі ці складові впливають на якість фаршу.

6. Стиснуте різання у шнекових подрібнювальних машинах, при надмірному підвищенні тиску, призводить до руйнування структури фаршу, що можливо упередити завдяки використанню модифікованих електрофоретичними покриттями еластичних шнеків, які забезпечують збереження нативних властивостей м'яса.

7. На параметричну надійність шнекових подрібнювальних машин і якість подрібнення впливає вид сировини, стан і навантаженість різальних інструментів, кінематика різання та умови експлуатації обладнання.

8. Сформульовані вимоги до обладнання, яке здатне забезпечити максимальну ефективність подрібнювально-змішувальних процесів у м'ясопереробних виробництвах.

9. Проведений аналіз можливих структур потоків подрібнюваної сировини, що складає математичний опис їх гідродинамічної структури, особливості якої визначають ефективність роботи подрібнювачів. За структурою потоків всі подрібнювачі розділені на 9 типів і проведена оцінка їх енергетичної ефективності.

10. Розроблені узагальнена математична модель процесу подрібнення м'яса і м'ясопродуктів та моделі руйнування крихких, високоеластичних і пластичних м'ясопродуктів та м'ясної сировини, яка поєднує у собі комплекс цих властивостей.

11. Запропонований алгоритм пошуку раціональних способів і обладнання для подрібнення м'яса та обґрунтовані напрямки синтезу ефективних м'ясоподрібнювальних машин.



## **РОЗДІЛ 5. ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ НА СПРАЦЮВАННЯ М'ЯСОПОДРІБНЮВАЛЬНИХ МАШИН**

### **5.1. Показники надійності м'ясоподрібнювальних інструментів в умовах корозійно-механічного зношування**

Стабільне виконання поставлених перед м'ясопереробною промисловістю завдань здебільшого залежить від надійності та довговічності технологічного обладнання. Наприклад, через недостатню стійкість різальних інструментів вовчків і кутерів порушується ритм виробництва, погіршується якість фаршу та збільшуються енергетичні затрати [238].

Виконаний нами протягом 2011 р. аналіз працездатності м'ясорізного інструменту у вовчках на 10-ти м'ясопереробних підприємствах м. Києва показав, що для виготовлення ножів і ґраток не визначені не тільки конкретні марки сталей, захисних покриттів, методи їх зміцнення, але не визначені навіть групи придатних сталей, а тому ножі і ґратки вовчків виготовляються на підприємствах з любых сталей – від конструкційних до високолегованих інструментальних. В нормативній документації на інструменти обумовлена лише твердість ножів (52 HRC<sub>e</sub>), і ґраток (61 HRC<sub>e</sub>). Обумовлюється також нормативний термін служби – 200 год, який на жодному з обстежених підприємств не досягається.

М'ясопереробне обладнання випускається малими серіями, що призводить до застосування широкої номенклатури ножів і ґраток. Тільки на м'ясопереробних підприємствах Києва застосовують більше 25-ти типорозмірів м'ясоподрібнювальних інструментів з 11-ти марок сталей, які мають різний строк служби. З великої кількості ножів, замінених у групі обстежених великих і малих м'ясопереробних підприємств більша частина випала на інструментальну вуглецеву сталь У8А та загалом на інструментальні сталі – 1709 ножів. Друга за чисельністю група – це леговані сталі, які мають у своєму складі 0,4% мас. вуглецю і сталі, леговані до 13% хромом та нікелем (табл. 5.1).

Гарантований термін служби м'ясоподрібнювальних інструментів вовчків повинен становити 200 год, у т.ч. до наступного заточування – 24 год. За результатами проведеного нами дослідження строк служби ножів не перевищував 168 год, а середній термін їх безперервної роботи обмежувався 13,8 год. Середньорічна потреба у ножах на обстежених підприємствах коливалась в межах від 45 до 110 шт., в залежності від типу обладнання і ступеня його завантаження.

Таблиця 5.1 – Показники експлуатаційної надійності м'ясорізальних ножів вовчків із різних марок сталей

Марка сталі	Кількість заміненних ножів за 2011 р, шт.	Відсоток від загальної кількості ножів, які витримали нормативний строк служби (+) і були зняті достроково (-)		Середній термін служби ножів, год
		«+»	«-»	
У8А	792	26,5	73,5	166,2
ХВГ	465	24,8	75,2	165,3
95Х18Л	451	54,3	45,7	162,2
40Х2НЛ	147	31,3	68,7	168,8
40ХНЛ	113	45,1	54,9	171,0
40Х13	119	52,9	47,1	180,6
65Г	51	66,7	33,3	178,2

Було встановлено, що відсутня єдина концепція, обґрунтовуюча використання тих чи інших марок сталей для виготовлення ножів. Наприклад, ножі, виготовлені з вуглецевих інструментальних сталей, були замінені через прискорене зношування різальних лез, хоча високий вміст вуглецю мав би забезпечити їх належну твердість і зносостійкість. Не покращились суттєво експлуатаційні характеристики ножів з високим вмістом хрому. Не забезпечило також належного підвищення зносостійкості і економне легування сталей (див. табл. 5.1). Очевидно, причину швидкого зношування інструментів необхідно шукати не лише у доцільному виборі легуючих елементів, але також у особливих властивостях м'ясної сировини, дія якої на різальні інструменти майже не досліджена.

## **5.2. Механіка контактної взаємодії різальних інструментів з сировиною**

Аналіз досліджень процесів різання м'яса [221, 245] показує, що більшість з них направлені на оптимізацію загальних енергетичних показників процесу для конкретних умов роботи м'ясоподрібнювальних інструментів. Детальне вивчення основних елементарних складових процесу різання, кутів заточування та сил, які діють на різальне лезо, сприятиме поглибленню знань в області м'ясопереробки і більш цілеспрямованій роботі над створенням та удосконаленням м'ясорізальних машин з метою підвищення довговічності і надійності обладнання для подрібнення [238].

Розглянемо профіль ножа, розмістивши його на площині у відповідності з розташуванням у м'ясоподрібнювальній машині (вовчку) в момент перерізання м'яса, і розставимо сили, які діють зі сторони подрібнюваного продукту на окремі частини ножа (рис. 5.1).

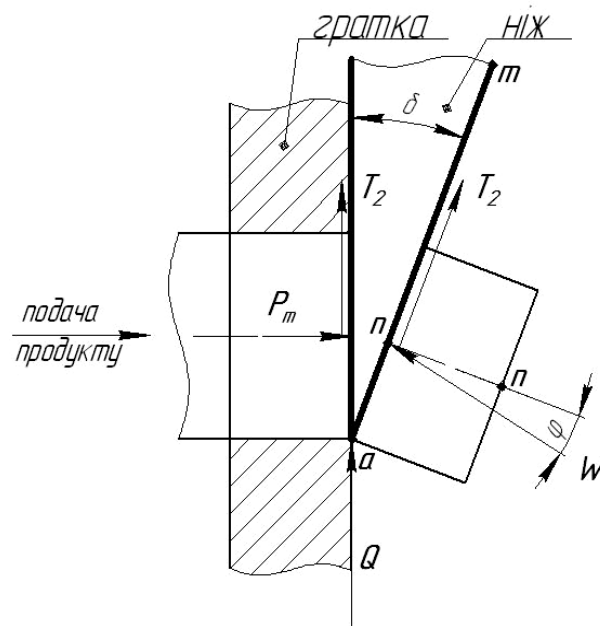


Рис. 5.1 – Схема сил, які діють на ніж зі сторони подрібнювального матеріалу

Різання проводиться різальним крайком леза ножа, а видалення відрізаної частини продукту досягається дією на неї передньої поверхні леза  $am$ .

На лезо ножа зі сторони матеріалу діє сила  $Q$  – опір перерізання. По передній поверхні рухається відрізана частинка, яка тисне на неї з силою  $W$ , спричиняючи силу тертя  $T_1$ , а до задньої поверхні притискається гратка і продукт, який подається шнеком з силою  $P_m$ , яка викликає силу тертя  $T_2$ . Величину кута заточки  $\delta$  приймаємо довільною для зручності зображення діючих сил на лезо.

Аналіз діючих сил на робочі поверхні леза ножа показав [232] (додаток Ю), що на передню поверхню ножа діють сили стискання і обтискування, величина яких залежить від кута заточки леза. Так, ножі з великим кутом заточки будуть зношуватись переважно за рахунок сили обтискування завжди менша сили стискання, можна стверджувати, що ножі з меншими кутами заточки будуть зношуватись менш інтенсивно.

Разом з тим, передня поверхня ножа постійно знаходиться під впливом нормального тиску і тертя і, завдяки зміні кута заточки, досягнути самозаточування леза неможливо. Єдиним рішенням

проблеми підвищення терміну служби ножів є зміцнення передньої поверхні леза зносостійким матеріалом (див. розділ 6).

Враховуючи механізм взаємодії поверхні різальної крайки леза з подрібненим продуктом, нами запропонована схема урахування зміни його геометричних параметрів в процесі роботи і при заточці, що зображена на рис. 5.2.

З використанням схеми затуплення зменшення ширини передньої поверхні леза по діагоналі між заточками зі збільшенням товщини різального окрайка від початкової  $d$  до граничної  $D$  величини, визначається за формулою:

$$L = C \cdot (D - d) \quad (5.1)$$

де  $C$  – коефіцієнт, який показує відносне зменшення ножа по ширині при зміні товщини ріжучого окрайка від  $d$  до  $D$ .

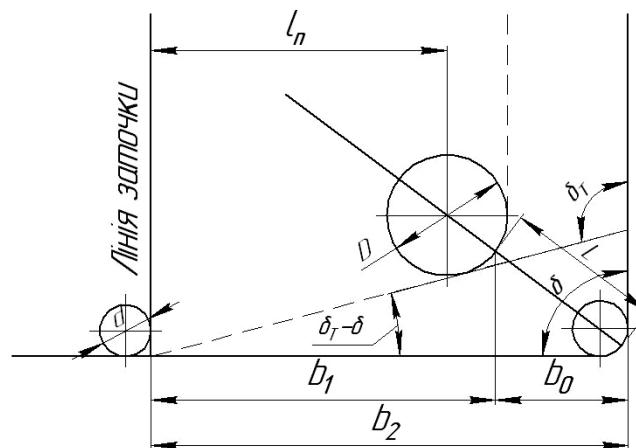


Рис. 5.2 – Схема затуплення леза і зменшення ножа по ширині при експлуатації і переточках

З іншої сторони, зменшення ширини передньої поверхні леза по діагоналі може бути виражене залежністю

$$L = b_0 / \cos \frac{\delta}{2} \quad (5.2)$$

де  $b_0$  – зменшення стрічки леза при експлуатації;

$\delta$  – кут заточки ріжучого окрайка нового ножа.

Підставивши значення  $L$  із формули (5.1) в (5.2) отримаємо

$$b_0 = C \cdot \cos \frac{\delta}{2} \cdot (D - d) \quad (5.3)$$

Формула (5.3) характеризує зменшення ширини передньої поверхні леза при експлуатації між переточками.

Збільшення товщини різального окрайка супроводжується змінами кута заточки. На передній поверхні утворюється зношена площадка  $l_n$ .

Зменшення розміру ножа по ширині при переточках визначається за формулою:

$$b_1 = \frac{D}{2} + l_n \cdot \cos(\delta_T - \delta) \quad (5.4)$$

де  $\delta_T$  – кут заточки при товщині ріжучого окрайка  $D$ .

Тоді зменшення ширини леза при експлуатації і заточці опишеться залежністю

$$b_2 = b_0 + b_1 = C \cdot \cos \frac{\delta}{2} (D - d) + \frac{D}{2} + (D - d) + \frac{D}{2} + l_n \cos(\delta_T - \delta). \quad (5.5)$$

Підставивши значення з отриманого раніше рівняння регресії  $l_n = 2.67\rho + 0.061$ , отримаємо залежність

$$b_2 = b_0 + b_1 = C \cdot \cos \frac{\delta}{2} (D - d) + \frac{D}{2} + (2.67\rho + 0.061) \cdot \cos(\delta_T - \delta) \quad (5.6)$$

Знаючи робочу ширину зуба ножа  $b_p$  і зменшення цієї ширини при експлуатації і заточці  $b_2$ , можна знайти число переточок за повний термін служби інструмента за формулою:

$$n = \frac{b_p}{b_2} \quad (5.7)$$

Користуючись формулою (5.7) можна знайти кількість заточок за повний термін служби ножа. Визначивши річну продуктивність машини в тоннах подрібненого м'яса, можна знайти норми витрат ножів для забезпечення виконання плану випуску продукції.

### **5.3. Обґрунтування основ забезпечення довговічності подрібнювальних машин**

Корозійно-активні середовища (КАС) м'ясопереробних виробництв (див. розділ 2), діючи на деталі обладнання, зокрема на подрібнювальні інструменти, спричиняють надзвичайно швидке їх спрацювання, що впливає на ритмічність роботи підприємств завдає їм великих економічних збитків та погіршує якість харчової продукції [136].

Була поставлена мета дослідити вплив КАС в м'ясоподрібнювальних машинах на субмікроструктуру і зносостійкість поверхонь твердих тіл (інструментів) при їх терті і деформуванні і, на цьому підґрунті, дати науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору сталей і способів їх зміцнення для досягнення високого опору спрацюванню різальних інструментів.

### 5.3.1. Вплив м'ясних середовищ на дислокаційну структуру твердих тіл

При терті ковзання деталей м'ясоподрібнювальних машин у КАС, в результаті сорбційних та електрохімічних процесів, на їх поверхнях утворюються адсорбовані шари і плівки вторинних структур, властивості яких залежать від хімічного складу і рН робочих середовищ, природи і структури металів, умов роботи вузлів тертя. Вони в значній мірі визначають характер зношування спряжених поверхонь [113, 225]. Сорбційні та електрохімічні процеси змінюють фізико-хімічні властивості і тонку структуру твердих тіл, викликаючи додатковий потік дислокацій до поверхні внаслідок зниження поверхневого потенціального бар'єру за рахунок енергії реакції (хемомеханічний ефект) [113]. Вид руйнувань матеріалів залежить від величини і характеру напружень в них. Під впливом напружень значно прискорюється взаємодія металів з середовищем, що в свою чергу, полегшує процеси деформації (механіко-хімічний і адсорбційно-механічний ефекти) [40]. Багаточисельні і зазвичай взаємопов'язані форми впливу середовища на механічні властивості твердих тіл залежать від ряду чинників, з яких можна виділити основні: хімічний склад і рН робочих середовищ; електрохімічні властивості твердих тіл в конкретному середовищі, їх атомну будову і структуру дефектів в об'ємі і на поверхні; умови деформування і їх вплив на електрохімічні властивості і структуру дефектів в тілах.

Для визначення впливу рН м'ясного соку на дислокаційну структуру поверхонь тертя експерименти проводили на монокристалах фториду літію при терті без змащування, у воді та у м'ясному соку з рН 5,5 та 7,4. Такі водневі показники соку характерні для яловичого м'яса за різних термінів автолізу. Кристали деформували на мікротрибометрі індентором Т-1,5 при навантаженні 0,5 Н (Додаток К2).

При терті без змащування на деформованих кристалах чітко виділяються лінії ковзання, утворені крайовими дислокаціями (рис. 5.3,а1) і розташовані у напрямку легкого ковзання  $\{110\}$  для даної сингонії. Їх довжина значно більша за половину ширини сліду індентора на поверхні зразка, а відстань між ними повторюється досить регулярно. На доріжці тертя, перпендикулярно до напрямку ковзання, спостерігали виступи (валки), що періодично повторюються.

Характер розташування ліній ковзання і виступів на поверхні тертя свідчить про циклічність процесів розповсюдження пружно-пластичних хвиль напружень у зразках [40]. В перетині, перпендикулярному до ліній ковзання, в результаті взаємодії і виникнення нових дислокацій утворюється зона суцільних дислокацій. Максимальна її ширина знаходиться у приповерхневому шарі на глибині близько 50 мкм (рис. 5.3,а2). Поза цією зоною дислокації шикуються у лінії, орієнтовані у напрямку легкого ковзання  $\{110\}$ .

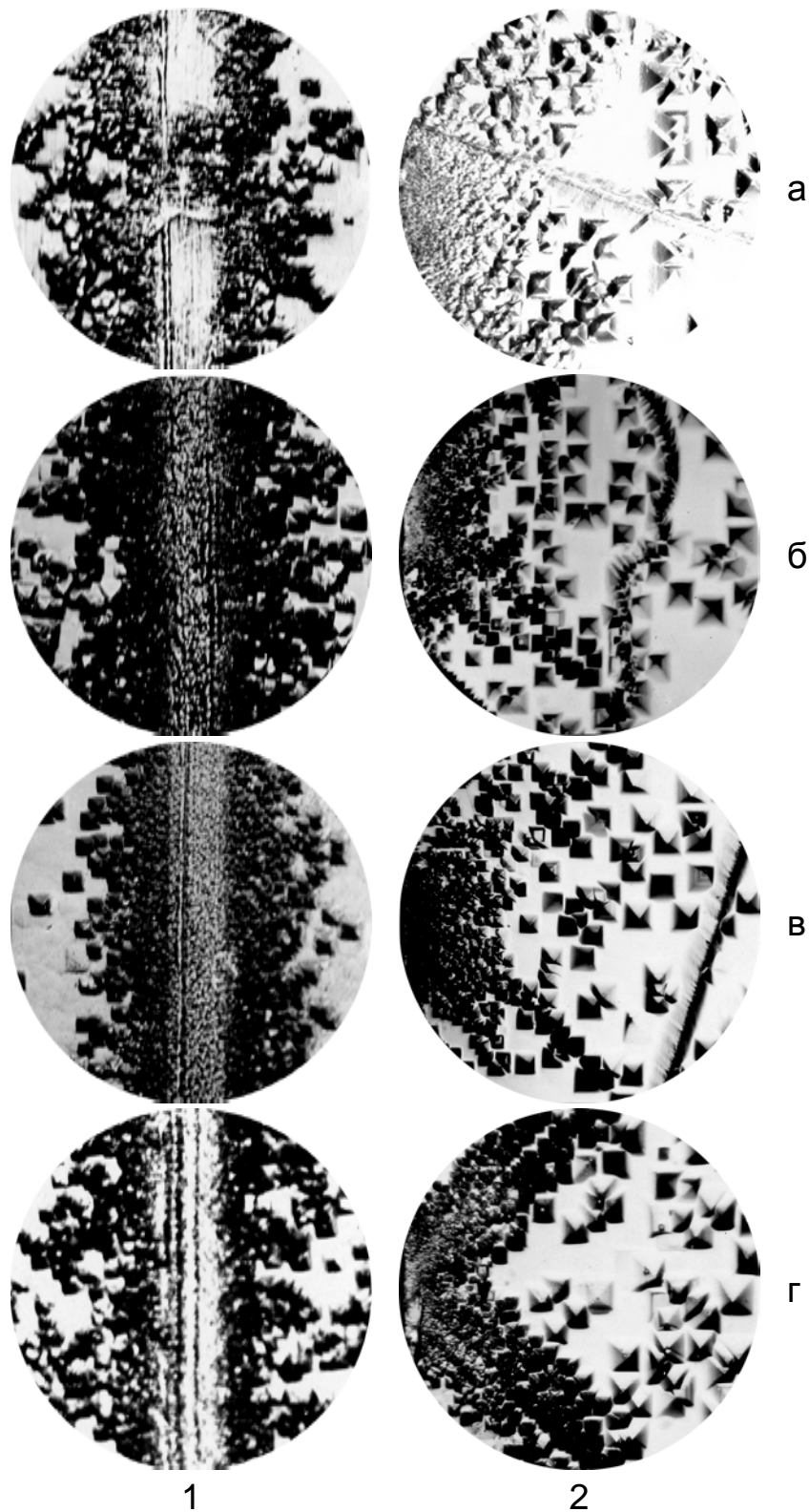


Рис. 5.3 – Дислокаційна структура поверхонь тертя (1) і по глибині деформованої зони (2) в монокристалах фториду літію при терті без змащування (а), в дистильованій воді (б), кислому рН 5,5 (в) і лужному рН 7,4 (г) м'ясних соках  $\times 250$

При терті у воді ширина деформованої зони більша, а нерівноважна концентрація дислокацій менша майже у 15 разів у порівнянні з тертям без змащування (рис. 5.4). При цьому довжина ліній ковзання і відстань

між ними набагато менша і повторюються вони менш регулярно (рис. 5.3, б1). Крім того, у воді об'єм деформованої зони менший, а найбільша її ширина знаходиться значно ближче до поверхні (на відстані 3-4 мкм від неї), ніж при терті без змащування (рис. 5.3, б2).

При терті у кислому м'ясному соку з рН 5,5 лінії ковзання на поверхні зразків ледве помітні. Зона деформацій має виразну межу, густина дислокацій у ній надзвичайно висока (рис. 5.3, в1). Ширина цієї зони така ж, як і при терті без змащування (рис. 5.3, б2).

Зі збільшенням рН соку з 5,5 до 7,4 ширина деформованої зони подвоюється, а локальна концентрація дислокацій зменшується майже у 18 разів (рис. 5.4). В лужному середовищі поверхня зразків пластифікована на значній площі, а межа деформованої зони майже не вирізняється (рис. 5.3, г1). Глибина цієї зони невелика (рис. 5.3, г2).

При терті дільниці фактичного контакту поверхонь – це джерела хвиль механічних напружень. В результаті фотон-електронної взаємодії енергія хвиль напружень частково передається елементарним носіям зарядів, що призводить до їх зміщення у напрямку розповсюдження хвиль і виникнення електричного струму (акусто-електричний ефект). Густина цього струму, наприклад, за інтенсивності хвиль від  $10^{-3}$  до  $10$  Вт/см<sup>2</sup> в натрії складала від 0,6 до 600 А/см<sup>2</sup> [182]. Опубліковані дослідження свідчать, що електричний струм може помітно впливати на напруження старту і усталену швидкість руху дислокацій [180]. Тому є підстави вважати, що при терті без змащування рух дислокацій відбувається не лише під впливом механічних напружень, але також під впливом електричних струмів, виникаючих при деформації твердих тіл.

В рідких середовищах змінюються пружні характеристики фрикційного контакту. У всіх досліджених нами випадках тертя в КАС зсувні процеси локалізуються у більш тонких поверхневих шарах порівняно з тертям без змащування (рис. 5.3...рис. 5.6). Плівки вторинних структур і адсорбовані чи бар'єрні шари по-різному впливають на поверхневу міцність матеріалів. В одних випадках вони знижують поверхневу енергію та зменшують приведену критичне зсувне напруження, збільшуючи тим самим швидкість деформації твердих тіл. При цьому робочі поверхні пластифіковані на значній площині, а нерівноважна концентрація дислокацій на них невелика.

Такі ефекти спостерігаються при терті у м'ясному соку з лужною реакцією. Ймовірно, у цьому випадку структура плівки і матричного матеріалу когерентні. Якщо плівка і матеріал підкладки мають різні параметри ґратки і структуру, то ґратка дислокацій невідповідності



гальмує роботу підповерхневих джерел і є перепорою виходу і розрядженню на поверхні рухомих дислокацій, збільшуючи межу текучості матеріалу [146]. В результаті на поверхнях тертя виникає висока локальна концентрація деформацій, яка може призвести до окрихчування поверхневого шару і утворення у цьому тріщин [113]. Це спостерігається на поверхнях тертя у кислому м'ясному соку, де надзвичайно висока нерівноважна концентрація дислокацій є причиною їх крихкого руйнування.

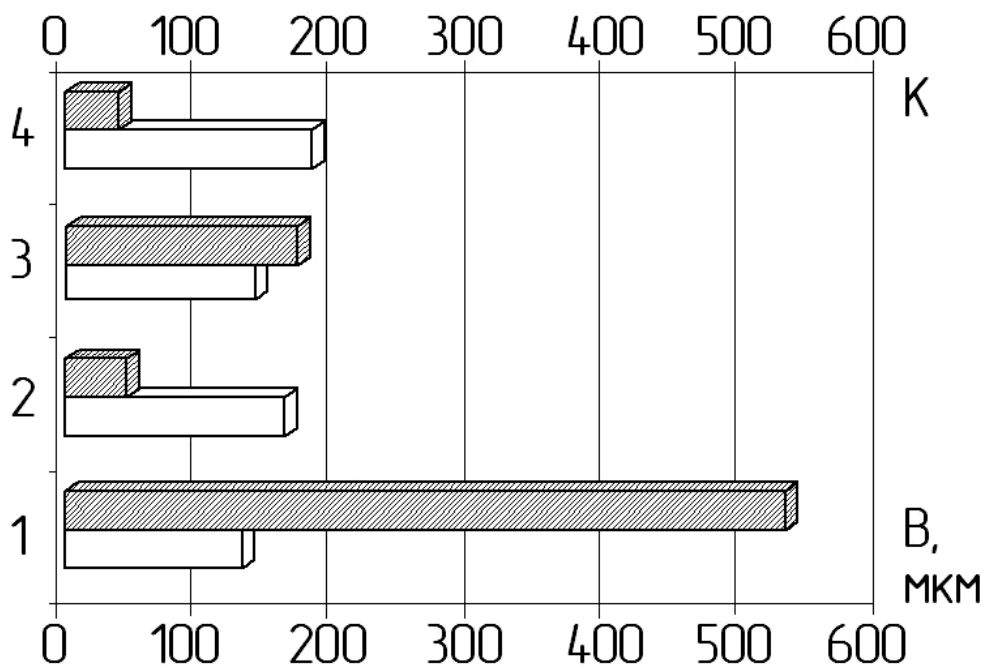


Рис. 5.4 – Залежність ширини деформованої зони В (не заштриховано) і нерівноважної концентрації дислокацій К (заштриховано) в монокристалах фториду літію при терті без змащування (1), в дистильованій воді (2), кислому рН 5,5 (3) і лужному рН 7,4 (4) м'ясних соках

Для перевірки адекватності впливу КАС на монокристали і полікристалічні тіла визначали розвиток пластичної деформації при терті ковзання у відпаленій сталі 65Г, з якої часто виготовляють м'ясоподрібнювальні інструменти. Вплив КАС на розвиток пружньо-пластичних деформацій сталі 65Г при терті ковзання визначали методом фотопружності [147] (додаток К2). З приведеного на рис. 5.6 графіка видно, що величина відносної деформації поверхонь збільшується, а глибина її розповсюдження зменшується при підвищенні рН м'ясного соку. Ці величини максимальні при терті без змащування. Аналогічно змінюються коефіцієнти тертя (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Вплив робочих середовищ на коефіцієнти тертя

Умови випробувань	Коефіцієнт тертя
Без змащування	0,43
У дистильованій воді	0,30
У кислому м'ясному соку	0,22
У лужному м'ясному соку	0,18

При співставленні графіків на рис. 5.5 і рис. 5.6 видно, що приведені на них залежності якісно подібні. Глибина зони суцільних дислокацій і її ширина в деформованих монокристалах відповідає глибині деформованої зони і відносної деформації поверхонь тертя зразків із сталі 65Г. Ці дані свідчать про можливість кореляції параметрів процесів деформування монокристалів і полікристалічних тіл.

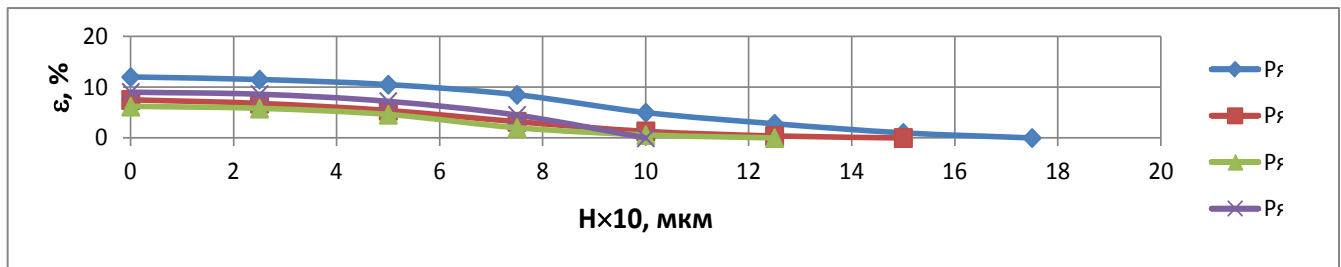


Рис. 5.5 – Вплив умов тертя на ширину В і глибину Н деформованої зони в монокристалах фториду літію при випробуваннях без змащування (1), в дистильованій воді (2), кислому рН 5,5 (3) і лужному рН 7,4 (4) м'ясних соках.

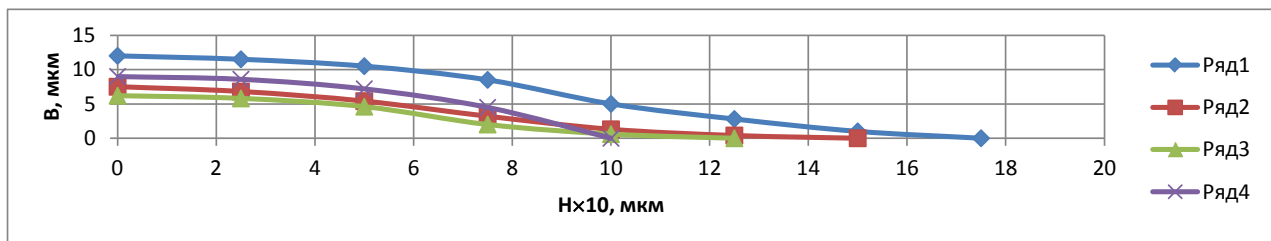


Рис. 5.6 – Залежність відносної деформації  $\epsilon$  і глибини деформованої зони Н сталі 65Г (НВ 2,5 гПа) від умов на фрикційному контакті (позначення на рис. 5.5)

Узагальнюючи викладене можна констатувати, що характер руйнування поверхонь тертя в КАС різний і залежить від їх властивостей. В кислому середовищі м'ясного соку реалізується крихке руйнування, а у лужному м'ясному соку – в'язке руйнування або диспергування [225, 227]. Локалізація зсувних деформацій у лужному м'ясному соку призводить до зменшення тангенційних зусиль, які обумовлюють цю

деформацію. Тому сила тертя у такому середовищі менша за силу тертя у кислих середовищах. Отримані і подані на рис. 5.5 і рис. 5.6 дані підтверджують результати досліджень Прейса Г.О., Сологуба М.А., Портера А.Й., проведені на монокристалах у нейтральних, кислих і лужних модельних розчинах цукрового виробництва [180, 181].

Відомо, що можливість схоплювання визначається імовірністю контакту ювенільних поверхонь і активністю дислокацій, які на них виходять (величиною енергії, акумульованої кристалічною ґраткою) [115]. У зв'язку з цим вантажопідіймальність вузлів тертя має бути меншою в кислих середовищах.

Вплив корозійно-активних середовищ на дислокаційну структуру деформованих поверхонь різний і залежить від властивостей середовищ, характеру і рівня напружень у зразках.

При терті у дистильованій воді з підвищенням стискаючих напружень збільшується густина дислокацій і ширина деформованої зони в плоско-напружених зразках (рис. 5.7,1). Лінії ковзання розташовані вздовж доріжки тертя у напрямку  $\{110\}$  на досить рівній відстані одна від однієї. В об'ємно-напружених зразках ширина деформованої зони більша, але помітно нижча нерівноважна концентрація дислокацій  $K$  (рис. 5.8):

$$K = N_d / N_c, \quad (5.8)$$

де  $N_d$  - густина дислокацій у деформованій зоні,  $\text{см}^{-2}$

$N_c$  - густина дислокацій по вільному полю,  $\text{см}^{-2}$ .

У кислому середовищі зі збільшенням напружень ширина деформованої зони стає більшою, особливо в об'ємно - напружених зразках. На поверхнях монокристалів, випробуваних на першому рівні напружень, в плоско напруженому стані, видно пошкрябини, розташовані у напрямку руху індентора (рис. 5.7,2). В об'ємно-напружених зразках, випробуваних на другому рівні напружень, на доріжці тертя під кутом  $100-110^\circ$  до напрямку ковзання утворюються тріщини, довжина яких більша за ширину сліду індентора. У цьому випадку нерівноважна концентрація дислокацій у деформованій зоні приблизно в 4 рази більша, ніж при випробуваннях плоско-напружених кристалів (рис. 5.8).

У лужному м'ясному соку збільшення стискаючих напружень сприяє зменшенню нерівноважної концентрації дислокацій на поверхнях тертя і незначному збільшенню ширини деформованої зони (рис. 5.8). Аналогічно змінюється характер деформації робочих поверхонь зразків при переході від плоского до об'ємно-напруженого стану (рис. 5.7,3). Тут

також очевидне пластичне відтискання матеріалу на доріжці тертя і висока густина полос ковзання. Відомо, що ступінь пластифікування поверхонь твердих тіл визначається кутом повороту блоків, величина якого обернено пропорційна відстані між дислокаціями вздовж меж блоків [255].

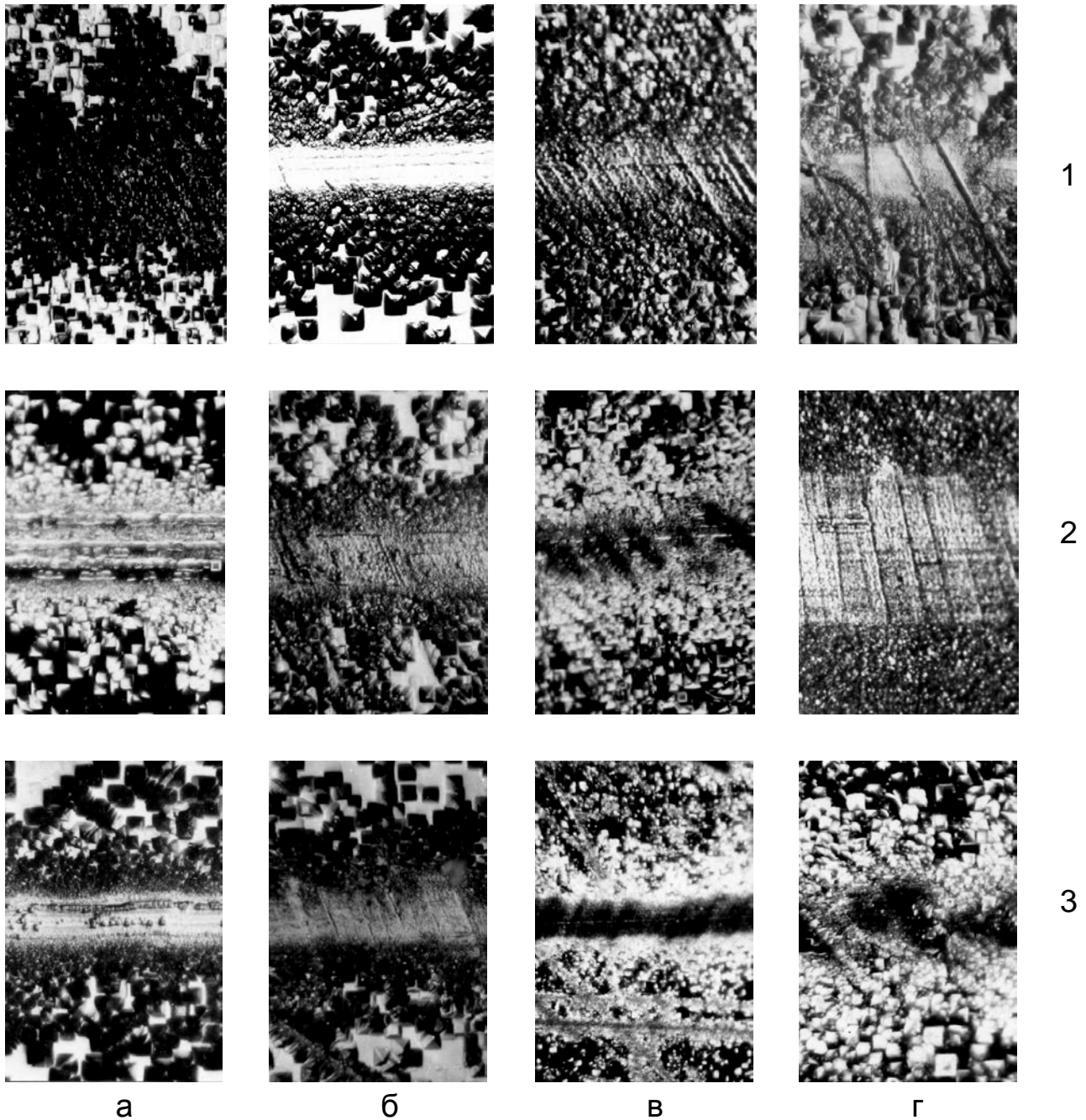


Рис. 5.7 – Дислокаційна структура робочих поверхонь монокристалів фториду літію при терті в плоско- (а,в) і об'ємно-напруженому стані (б,г) на першому (а,б) і другому (в,г) рівні напружень в дистильованій воді (1), кислому рН 5,5 (2) і лужному рН 7,4 (3) м'ясному соку

В кислому м'ясному соку при переході від плоского до об'ємного напруженого стану, а також при збільшенні рівня стискаючих напружень

відбувається окрихчування поверхонь тертя і утворення на них тріщин. У відповідності з моделлю Зінера-Стро [255] деформація у твердому тілі локалізується у полосах ковзання, які грають роль в'язких включень у пружній матриці. У кислому м'ясному соку висока локальна концентрація напружень головних дільниць полос ковзання не сприяє відновленню ковзання, а викликає втрату стійкості кристалічної ґратки монокристалів. Причиною цього, ймовірно, є блокуючий вплив на тонку структуру зразків хемосорбованих і оксидних плівок. У цьому середовищі виникає сама висока зі всіх розглянутих випадків локальна концентрація дислокацій. На першому рівні напружень вона більша, ніж при терті у лужному м'ясному соку, у 5 разів, а на другому рівні напружень – в 11 разів.

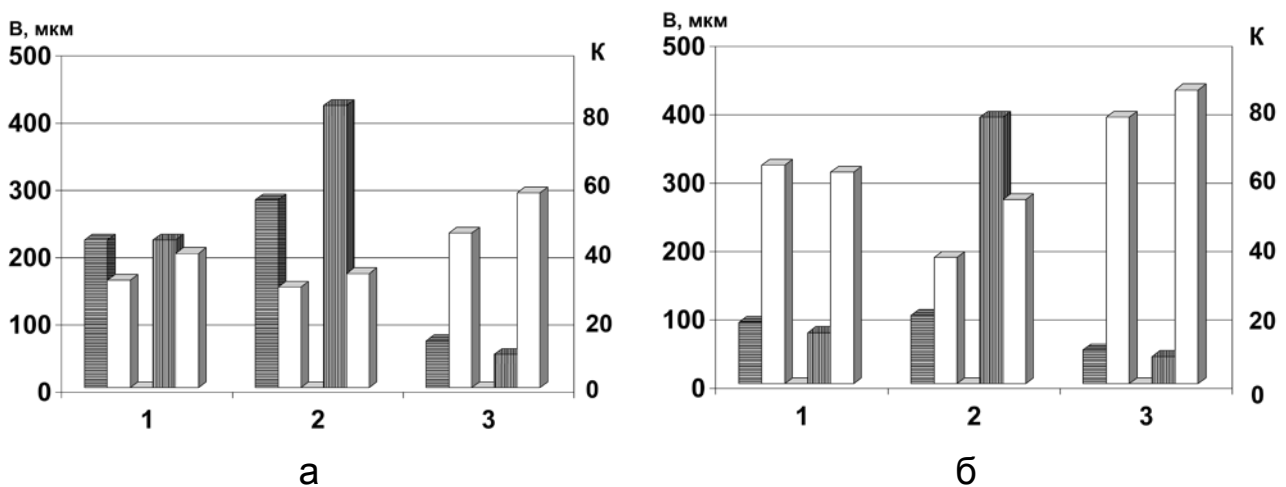


Рис. 5.8 - Ширина деформованої зони в (не заштриховано) і нерівноважна концентрація дислокацій К (заштриховано) при терті монокристалів фториду літію в плоско - (горизонтальні штрихи) і об'ємно-напруженому стані (вертикальні штрихи) на першому (а) і другому (б) рівні напружень у дистильованій воді (1), кислому рН 5,5 (2) і лужному рН 7,4 (3) м'ясному соку

Висока густина дислокацій на поверхнях монокристалів у лужному м'ясному соку, очевидно, є наслідком зниження їх енергії активації. Утворювані на поверхні сорбовані шари і вторинні структури не є перепорою для виходу і розрядження дислокацій. У цьому середовищі поверхні зразків пластифіковані настільки інтенсивно, що на їх стан впливає не характер стискаючих напружень, а лише їх величина.

З аналізу впливу КАС на субмікроструктуру зразків виходить, що для зменшення крихкого руйнування поверхонь тертя різальних інструментів м'ясоподрібнювальних машин в кислих м'ясних соках необхідно використовувати матеріали з мінімальних рівнем напружень у

кристалічній гратці. Це, наприклад, відпущені, нормалізовані або покращені сталі. У лужних середовищах поверхневі шари металів повинні мати підвищену твердість зі значними макро- і мікронапруженнями, що може зменшити їх спрацювання в результаті диспергування. Для цього можна використати хіміко-термічну обробку, термо- і електромеханічне зміцнення, наклепування, обробку на білий шар тощо [33, 217].

Прийнято вважати, що стійкість різального інструменту корелює зі зносостійкістю інструментального матеріалу. Тому для виготовлення інструментів, подрібнюючих м'ясну сировину з лужною реакцією, можна рекомендувати тверді і навіть крихкі матеріали і покриття, а у разі обробки сировини з кислою реакцією – матеріали в'язкі і пластичні. З урахуванням того, що м'ясна сировина в залежності від терміну автолізу може бути у кислому, лужному і нейтральному стані та може перероблятися на одній і тій же м'ясорізальній машині, то підібрати сталь, яка б мала одночасно високий рівень твердості і пластичності, або забезпечити такі властивості за рахунок її термічної обробки досить важко. У цьому випадку перспективними можуть бути захисні зносостійкі евтектичні покриття на різальних інструментах, нанесені з використанням концентрованих джерел енергії [216], вакуумні іонно-плазмові покриття дискретного типу (острівні, мозаїчні, перфоровані, стільникові) [29] та інші покриття, які, завдяки своїй конструкції, поєднують у властивостях твердість, пластичність і корозієстійкість у лужних, нейтральних і кислих середовищах та високу зносостійкість при терті.

Механізм корозійно-механічного зношування у м'ясному соку також може бути уточнений завдяки виконаним експериментам.

Адсорбовані і бар'єрні шари, а також оксидні плівки (за нашими та іншими багатьма чисельними дослідженнями) підвищують енергію активації незалежно від типу кристалічної гратки матеріалів, збільшують межу їх текучості [225, 255]. Пояснюють це явище заліковуванням субмікроскопічних тріщин за допомогою оксидів, аналогічно тому, як це відбувається з кам'яною сіллю у воді (ефект А.Ф. Йоффе), утрудненням виходу дислокацій на поверхню і блокуванням поверхневих джерел Франка-Ріда і Фішера, обмеженням ковзанням по границях кристала [82].

Ще в тридцятих роках минулого століття були виявлені напівпровідникові властивості оксидів перехідних металів. Дослідженнями підтверджено, що в подавляючій більшості випадків поверхневі шари і оксидні плівки на металах є напівпровідниками з

власною або примісною провідністю. У зв'язку з цим для розуміння і подальшого вивчення корозійно-механічного зношування металів в КАС м'ясопереробної галузі можуть бути використані закономірності фізико-хімії поверхні напівпровідників [39].

Загальною властивістю оксидів є відхилення їх складу від стехіометрії. Ступінь цього відхилення (переважає в гратці надлишковий метал чи кисень, характеризується оксид електронною або дірковою провідністю) визначає його реакційну здатність. Іншими словами, кінетика електродних реакцій на окиснених металах залежить від концентрації заряду в оксиді і пов'язана з процесами перенесення через нього заряду і речовини [127].

Різноманітні речовини, які входять до складу м'яса, адсорбовані поверхнею окиснених металів, відіграють в тонкому поверхневому шарі таку ж роль донорів або акцепторів, як і штучно впроваджені у напівпровідники елементи. В цьому друге можливе проявлення впливу хімічного складу і рН м'ясного соку на поверхневу міцність металів.

Характер зв'язку води, яка присутня завжди у випробуваних м'ясних соках, з поверхнею металу залежить не лише від природи цього металу, але також і від природи електроліту, зокрема від його кислотно-лужного балансу рН. Енергія зв'язку води з електролітом визначається величиною стаціонарного потенціалу в даному електроліті по відношенню до його нульової точки [84]. В хемосорбованому шарі вона може бути більшою або меншою за енергії ювенільних поверхонь металів. У першому випадку твердість поверхні збільшується і можливе її окрихчування в процесі деформації, а в другому – має місце хемосорбційне пластифікування поверхні. Виявлене нами експериментально крихке руйнування поверхонь тертя зразків у кислому м'ясному соку і характер дислокаційної структури деформованої зони дає підставу вважати, що у цьому середовищі поверхнева енергія збільшується. Тому вихід дислокацій, генерованих при деформації гетерогенними джерелами та джерелами Фішера затруднений. Установлено, що поблизу поверхні деформованих зразків утворюється шар з підвищеною густиною дислокацій (debris-шар), який є перепорою для виходу полос ковзання на поверхню кристала і гальмом для розвитку об'ємної деформації [26]. В кислому м'ясному соку збільшення бар'єрної дії поверхні на дислокації є, на нашу думку, причиною утворення підповерхневих тріщин, які починаються в debris-шарі.

В лужному середовищі умови деформування поблизу поверхні полегшені. Адсорбування ОН-іонів знижує поверхневу енергію зразків і

створює тим самим сприятливі умови для виходу і розрядження дислокацій. Пластифікування поверхонь кристалів, викликане дією цього середовища, зменшує величину активаційного об'єму і сприяє локалізації деформації в тонких поверхневих шарах.

Більшість відомих моделей використовують уявлення про те, що крихкому руйнуванню твердих тіл передують пластична деформація [225, 255]. Це значить, що взаємодія дислокацій відповідальна за утворення зародків тріщин. З використанням критерію Ешелбі-Франка-Набарро [255] можна оцінити імовірність руйнування монокристалів фториду літію. Гранична густина дислокацій визначається з умови формування тріщин:

$$n \cdot \tau > \frac{12 \cdot \alpha \cdot G}{1 + \nu}, \quad (5.9)$$

де  $n$  - кількість дислокацій у скопиченні;  $\alpha$  - безрозмірний параметр, який характеризує інтенсивність меж дислокаційних взаємодій;  $\tau$  - напруження зсуву;  $G$  - модуль зсуву;  $\nu$  - коефіцієнт Пуассона.

Після підстановки відповідних значень отримаємо  $n = (300 \div 800) \text{ см}^{-2}$ . Розрахована гранична густина дислокацій наближена до експериментально отриманих значень після випробування зразків у кислому м'ясному соку. З викладеного вище видно, що у лужному м'ясному соку напруження, що викликають крихке руйнування зразків значно вищі, ніж у кислому. Таким чином, в одних випадках під впливом КАС спостерігається зміцнення робочих поверхонь деталей машин і обладнання (блокування дислокацій і дислокаційних джерел), а в інших – полегшення їх деформування.

### **5.3.2. Електричне зарядження деталей м'ясоподрібнювальних машин як засіб підвищення опору спрацюванню**

Робочі середовища м'ясопереробних виробництв, як правило, є електролітами і, при їх контакті з металами, розвиваються електрохімічні корозійні процеси, які інтенсифікуються в процесі тертя.

Деталі м'ясорізальних машин і середовища, в яких вони працюють, є фізичними об'єктами, а тому їх взаємодію треба пояснювати як матеріальні зв'язки між атомами і молекулами. Рух цих мікрочастинок, складаючи основу мікросистем, має свою специфіку і підлягає законам квантової механіки. Тертя – це проявлення електромагнітної взаємодії мікрочастинок і, перш за все електронів атомів і молекул, з яких складаються деталі та середовища. Характерною особливістю цього процесу є та, що під дією сили тертя проходить зміна відстані між



взаємодіючими атомами і молекулами об'єктів спочатку в сторону зменшення. Досягнувши деякої мінімальної відстані ці частинки роз'єднуються [174]. В ідеальному випадку всі взаємодіючі частинки повинні були б зайняти ті свої місця, які вони займали до взаємодії. В реальних об'єктах такого, як правило, не буває. В металах, з яких виготовляються деталі і, зокрема, м'ясорізальні інструменти, присутня пружня і пластична деформації, а якщо до них приєднати дефектність кристалічних ґраток, то все це стає передумовою виникнення дислокацій та їх бар'єрів.

Очевидно, що на тертя та зношування деталей м'ясорізальних машин повинні впливати м'ясні середовища – електроліти, що нівелюють взаємодію молекул, атомів і електронів цих об'єктів. Дослідження цих процесів є актуальною науковою і практичною задачею, розв'язання якої дасть можливість підвищити довговічність подрібнювального обладнання м'ясопереробної галузі.

Нижче наведені результати дослідження впливу електрохімічних процесів і поляризації на поверхневу міцність твердих тіл з метою прогнозування зносостійкості конструкційних та інструментальних матеріалів у м'ясних середовищах з кислою і лужною реакцією і застосування результатів для підвищення опору спрацюванню деталей подрібнювальних машин.

Вплив технологічних середовищ на механічні характеристики твердих тіл проявляється через утворення на поверхнях тертя поверхневих плівок і вторинних структур, які можуть відігравати двояку роль [147]. Тонкі, міцні та еластичні сприяють підвищенню антифрикційних властивостей поверхонь тертя. Більш товсті і тверді викликають збільшення сили тертя, напружень і деформацій в матеріалі підкладки. Робота поверхневого руйнування матеріалів при терті може змінюватись на 1-3 порядки в залежності від типу вторинних структур [114].

Експериментально встановлена залежність механічних властивостей металів в електролітах від величини їх електродних потенціалів [114]. Відомо, що електрохімічна поляризація твердих тіл змінює кінетику електродних процесів та властивості адсорбованих шарів і окислів [183]. Змінюючи вільну поверхневу енергію електродів в результаті зміни донорно-акцепторної взаємодії на межі фаз, поляризація впливає на інтенсивність накопичення дефектів в деформованих матеріалах [72]. У зв'язку з цим було запропоновано використати електрохімічну поляризацію для регулювання поверхневої

міцності матеріалів при терті в корозійно-активних середовищах (КАС) [181].

Залежність дислокаційної структури поверхонь тертя від електродних потенціалів досліджували на зразках монокристалів кремнію, які поміщали в електрохімічну комірку. Досліди проводили при терті сферичних інденторів Т-0,15 і Т1,5 по зразку без змащування, а також у м'ясному соку, відпресованому з одного зразка мускульної тканини парної телятини 2-ї категорії через 2 години після забою (рН 7,4) і після завершення автолізу через 240 годин (рН 5,5). Методика проведення досліджень викладена у додатку К2.

При пропусканні через фрикційний контакт постійного струму, негативний полюс джерела якого підключений до зразка, при терті без змащування дещо збільшується сила тертя, зменшується ширина деформованої зони і майже втричі збільшується густина дислокацій (рис. 5.9). При позитивному заряджуванні монокристалу характер деформування поверхонь тертя змінюється. Очевидно, у першому випадку, негативний заряд зменшує роботу виходу дислокацій завдяки дії на електростатичний бар'єр на міжфазній межі та інтенсифікує хемосорбційні процеси, а у другому випадку, завдяки позитивному зарядженню зразка, його адсорбційна здатність до кисню зростає, що ще більше стабілізує пасивний стан поверхні [53].

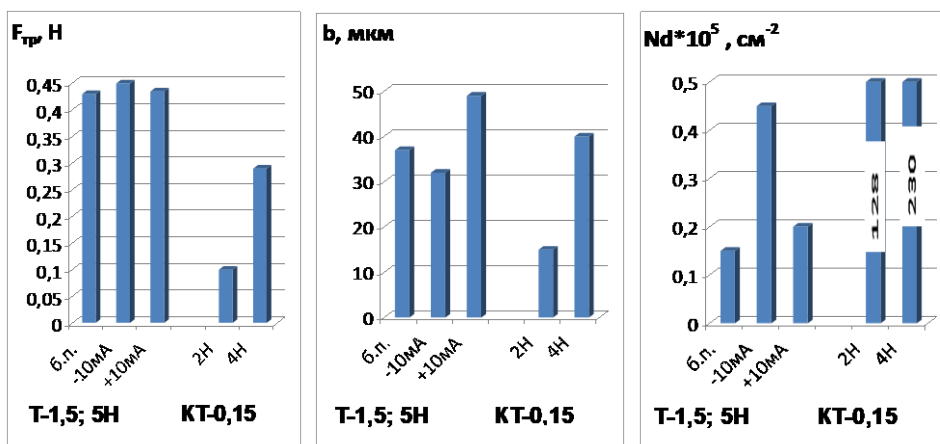


Рис. 5.9 – Сила тертя  $F_{тр}$ , ширина  $b$  і щільність дислокацій  $N_d$  деформованої зони монокристалів кремнію в залежності від величини струму (індентор Т-1,5) і навантаження на фрикційному контакті при терті без змащування

В кислому м'ясному соку (рН 5,5) на поверхнях тертя монокристалів виникають окремі виразки неоднорідної пластичної деформації з високою густиною дислокацій [218, 225], які є зародками крихких тріщин і сколів, що утворюються при наступних навантаженнях. Сила тертя і

ширина деформованої зони більші, а середня густиною дислокацій в ній майже у 20 разів менша у порівнянні з тертям без змащування (рис. 5.8).

Катодна поляризація в цьому середовищі сприяє порушенню пасивного стану зразків. Утворені в цих умовах оксидні шари на поверхні зразків можуть виконувати функції гетерогенних джерел дислокацій, діючих за менших навантажень, ніж гомогенні джерела всередині кристала [150]. Цим можна пояснити полегшення умов деформації, що проявляється у зменшенні сил тертя, збільшенні ширини деформованої зони і щільності в ній дислокацій у порівнянні з тертям без поляризації (рис. 5.10) [225].

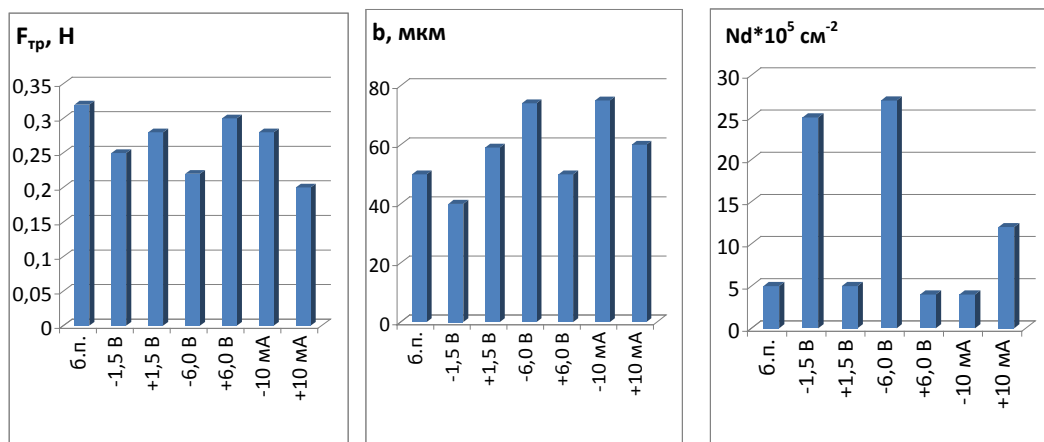


Рис. 5.10 – Вплив поляризації у м'ясному соку з рН 5,5 на силу тертя  $F_{тр}$ , ширину  $b$  і щільність дислокацій  $Nd$  деформованої зони монокристалів кремнію

Анодна поляризація збільшує дифузію кисню до поверхні зразка та сприяє потовщенню оксидної плівки. Одночасно дислокації блокуються киснем та підсилюється бар'єрний вплив на них оксидної плівки. Хоча середня щільність дислокацій на доріжці тертя менша, ніж у попередніх випадках, деформаційна гетерогенність поверхні набагато більша. Значно підвищується локальна концентрація напружень, що сприяє утворенню в приповерхневих шарах дислокаційних ансамблів граничної щільності, що збільшує вірогідність крихкого руйнування [218]. Пасивуюча плівка, на нашу думку, є фазовою по відношенню до підкладки і відрізняється від неї параметрами ґратки та величиною мікронапружень [145].

В лужному середовищі кремній схильний до саморозчинення, в процесі якого знижується локальна концентрація напружень на його поверхні (стравлювання сходинок і тріщин). Його деформація у цьому середовищі викликає пластичну течію тонких поверхневих шарів у зоні

фрикційного контакту. Доріжка тертя була суцільна і рівна [225], сила тертя менша, а густина дислокацій в деформованій зоні більша, ніж при випробуванні в кислому м'ясному соку (рис. 5.11).

Отримання екіпотенціальних поверхонь при катодній поляризації в лужному м'ясному соку зменшує швидкість анодної реакції і сприяє утворенню екрануючої плівки на поверхні монокристала. Деякі дислокації в деформованій зоні рухаються майже паралельно поверхні [218], а відстані пройдені ними, зменшуються майже на порядок при видаленні поверхневого шару завтовшки близько 2 мкм.

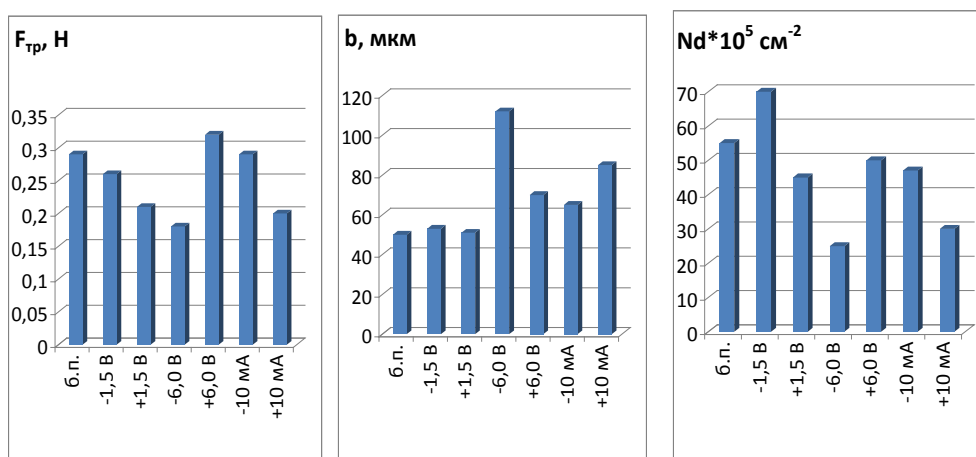


Рис. 5.11 – Вплив поляризації в лужному (рН 7,4) м'ясному соку на силу тертя  $F_{тр}$ , ширину  $b$  і щільність дислокацій  $N_d$  деформованої зони монокристалів кремнію

На цій підставі можна вважати, що катодна поляризація знижує поверхневу енергію зразків і полегшує, тим самим, рух і розрядження дислокацій у тонкому поверхневому шарі. При зміщенні електродних потенціалів у негативну область сила тертя і густина дислокацій у деформованій зоні зменшується і при потенціалі -6В указані параметри приймають екстремальне значення (рис. 5.11). Одночасно монотонно зменшується густина корозійного струму, що свідчить про покращення екрануючих властивостей поверхневих плівок. Вигляд субмікроструктури поверхонь тертя [218, 225] дозволяє стверджувати, що оксиди не є перепорою руху і розрядженню дислокацій. Це стає можливим при когерентності структур плівок і підкладки і свідчить про те, що в цьому випадку поверхневі плівки є псевдоаморфними по відношенню до матеріалу підкладки [94]. Маючи високу пластичність вони збільшують площу контакту спряжених тіл та зменшують концентрацію мікронапружень у зоні деформації. Навантаження робочих поверхонь може відбуватись за рахунок сил контактного тертя, виникаючих при

осадженні і розтіканні вторинних структур [150]. При цьому зсувні деформації локалізуються в поверхневих шарах, а руйнування поверхонь тертя відбувається в результаті диспергування.

Анодне розчинення кремнію в лужному м'ясному соку знижує бар'єрну дію на дислокації зміцненого поверхневого шару [225], але пластифікування поверхні монокристалів за рахунок зменшення енергії активації дислокацій менше, ніж у попередньому випадку. Поляризація потенціалом +1,5В сприяє зменшенню указаних вище параметрів, а подальше облагороджування потенціалу до +6В – їх збільшенню (див. рис. 5.11).

Приведені у цьому підрозділі дані якісно подібні результатам, поданим у роботі [227]. Слабокислий м'ясний сік підвищує схильність зразків до крихкого руйнування, а сік з лужною реакцією, полегшуючи генерацію і рух дислокацій, обумовлює в'язке руйнування або диспергування поверхні при терті.

Оцінюючи властивості використаних нами м'ясних соків їх можна розділити за ознакою взаємодії з зразками таким чином: сік, в якому зразки не розчиняються – слабкокислий; сік, в якому зразки добре розчиняються - слабколужний.

З урахуванням такого поділу можна зробити наступні важливі висновки:

- Анодна поляризація в нерозчиняючому середовищі знижує пластичні властивості зразків і сприяє збільшенню напружень в приповерхневих шарах (ефекти Роско і Баррета). В розчиняючому матеріалі середовищі позитивне зарядження полегшує деформацію його поверхні (ефекти Іоффе та Евальда-Поляні).
- Катодна поляризація в розчиняючих і нерозчиняючих середовищах зменшує поверхневу енергію твердих тіл, прискорює їх взаємодію з середовищем і, тим самим, полегшує деформацію поверхні.

Таким чином, експериментальні дослідження підтвердили можливість застосування електрохімічної поляризації для управління механізмом деформування твердих тіл в КАС. Щільність дислокацій  $N_d$  є функцією прикладених деформацій  $\epsilon$  і визначається кількістю діючих джерел ковзання  $m$ , кожне з яких генерує  $n$  петель при заданому рівні напружень  $\tau$  [150]. Тому вплив поляризації на тонку структуру поверхонь тертя можна пояснити зміною енергії активації руху дислокацій та активаційного об'єму.

При електрохімічній поляризації в КАС на електродах виділяється водень і кисень. Перший, відновлюючи поверхневий оксид, може проникати в поверхневі шари електрода і, тим самим, викликати втрату його пластичності і крихке руйнування [82, 218]. Вірогідно, кисень, дифундуючи у кристалічну ґратку, також впливає на кінетику процесів деформування і руйнування металів.

В спеціально поставленому експерименті вивчали вплив водню і кисню на субмікроструктури монокристалів кремнію у кислому і лужному м'ясних соках. Зразки частково занурювали в рідке середовище для того, щоб диференціювати дію цих газів в об'ємі рідини і над її поверхнею. Потенціали поляризації відповідали далеким анодним і катодним областям (більше зворотнього потенціалу кисневого електрода і менше зворотнього потенціалу водневого електрода) і забезпечували отримання густини струму на зразках  $75\text{mA}/\text{cm}^2$ .

Наводнювання твердих тіл у м'ясних соках – електролітах пояснюється тим, що у воді (основі електроліту) водень практично не розчиняється. Водень, що виділяється на катоді відновлює оксиди, забезпечуючи тим самим можливість дифузії в поверхневі шари електрода. В слабкокислому м'ясному соку в результаті наводнювання відбувається достатньо рівномірне по всій поверхні зразка підвищення щільності дислокацій до її граничного значення  $110\text{ cm}^{-2}$  (рис. 5.12, а2). В парях кислого м'ясного середовища водень розташовується по межах блоків монокристала, підвищуючи залишкові напруження другого роду і викликаючи утворення трьохвимірних дислокаційних сіток (рис. 5.12, а1). Тут особливо чіткий вплив водню як стимулятора крихкого руйнування. Відомо, що пластична деформація в кристалічній ґратці твердих тіл естафетно передається через малокутові межі [82]. Тому збільшення блокомежних напружень буде підвищувати вірогідність руйнування сколом.

У лужному м'ясному соку катодна поляризація викликає розвиток волокнистої дислокаційної структури на поверхні електрода (рис. 5.16, а2). Дислокації розташовуються вздовж ліній росту монокристала, що є місцем сегрегації домішок. Хоча і в цьому середовищі під впливом водню також підвищується щільність лінійних дефектів ґратки, але вона на тричотири порядки менша, ніж в кислому м'ясному соку.

Над рідиною інший характер взаємодії водню з кремнієм. Очевидні ямки травлення вздовж сліду дислокацій, що рухаються майже паралельно поверхні зразка (рис. 5.13, а1). Це свідчить про значне зменшення його поверхневої енергії. Таким чином, в парях лужного

середовища процеси сорбції водню викликають пластифікування поверхні монокристалів. Ефект протилежний тому, який спостерігався у кислому м'ясному соку і його парах.

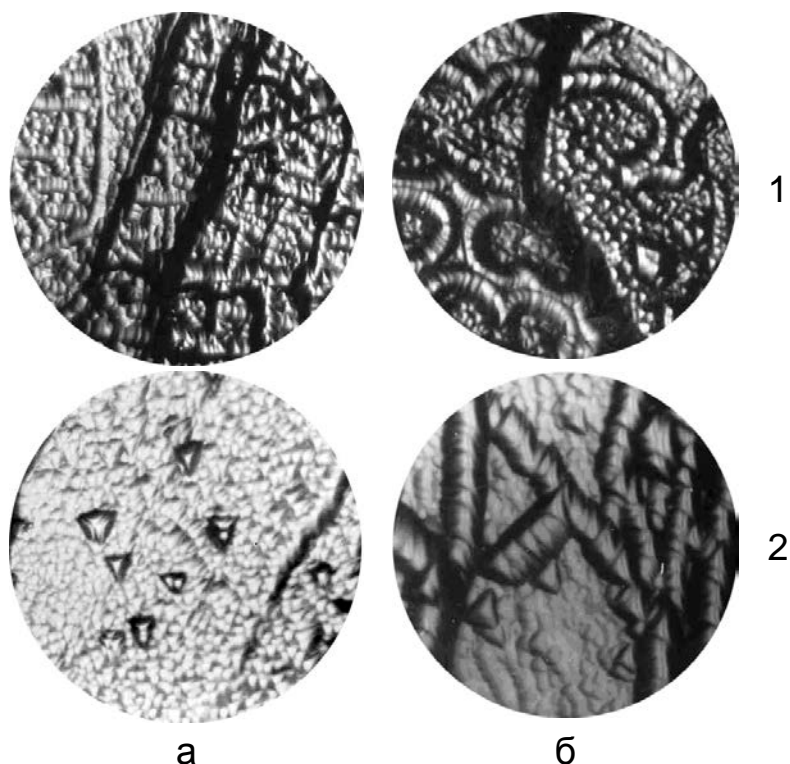


Рис. 5.12 – Дислокаційна структура монокристалів кремнію після катодної (а,  $\times 200$ ) і анодної (б,  $\times 340$ ) поляризації у кислому м'ясному соку (рН 5,5): поверхні над соком (1) і в соку (2)

Кисень сприяє крихкому руйнуванню монокристалів в парах кислого м'ясного соку і, в меншій мірі, – в парах лужного м'ясного соку. У лужному середовищі кисень зменшує вірогідність такого руйнування.

При різних видах навантаження деформація твердих тіл починається з поверхні і далі передається в глибинні шари матеріалу. Тому електричне зарядження металів в КАС може бути використане не лише для підвищення надійності і довговічності вузлів тертя технологічного обладнання м'ясопереробних підприємств але і в процесах лезової обробки м'яса.

Для виготовлення деталей м'ясоподрібнювальних машин застосовують чорні і кольорові сплави. Одним з простих способів підвищення їх довговічності в КАС є вибір електрорушійної сили внутрішньої поляризації за рахунок застосування матеріалів з відповідними електрохімічними властивостями. Ця задача може бути розв'язана з використанням конструктивних заходів.

Напружені поверхні деталей машин, як відомо, є анодами, а вільні – катодами. Швидкість електродних процесів у вузлі тертя визначається з залежності [250]:

$$\frac{S_a}{S_k} = \frac{i_a}{i_k} \quad (5.10)$$

де  $S_a$ ,  $S_k$  – площа анода і катода;

$i_a$ ,  $i_k$  – густина анодного і катодного струмів.

Таким чином, вибравши співвідношення площ електродів, можна забезпечити необхідний вид поляризації системи.

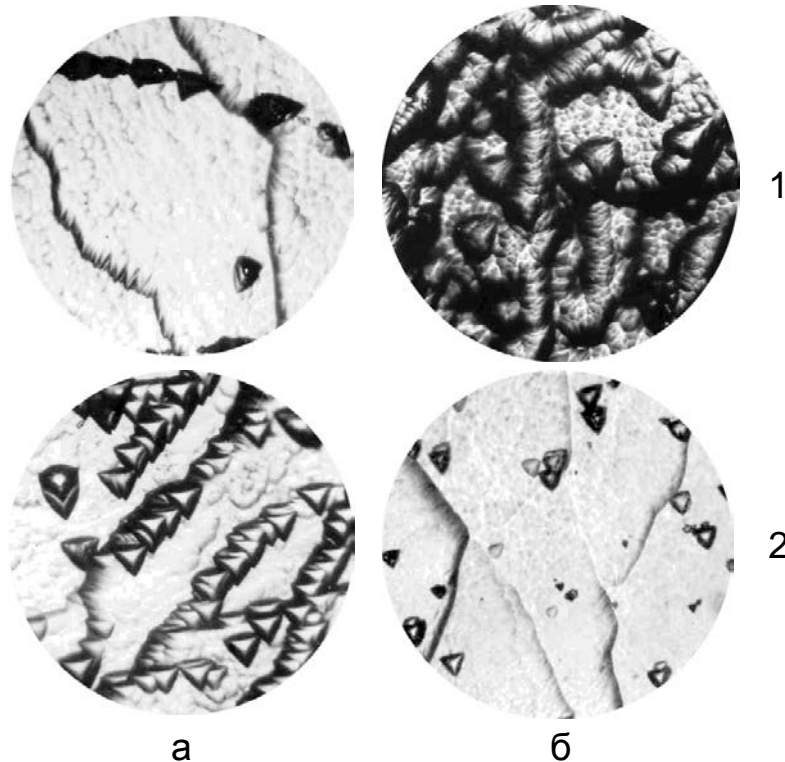


Рис. 5.13 – Дислокаційна структура монокристалів кремнію після катодної (а,  $\times 200$ ) і анодної (б,  $\times 340$ ) поляризації у лужному м'ясному соку (рН 7,4): поверхні над соком (1) і в соку (2)

Підвищення довговічності поверхонь тертя в лужних середовищах м'ясних соків можна досягти за рахунок їх катодного зарядження. При важких режимах тертя, як це має місце, наприклад, у м'ясорізальних комплексах вовчків для подрібнення м'яса, поверхневий шар інструментів є зоною, в якій розвивається крихке руйнування. У цьому випадку для підвищення вантажопідйомності пари тертя треба застосовувати анодну поляризацію. Вона також може значно підвищити зносостійкість схильних до пасивації металів, якщо на них подавати потенціал дещо більший Фладе-потенціалу.

Залежність інтенсивності зношування твердих тіл у часі має три чітко виражених періоди: припрацювання, сталий і прискорений знос.



Змінюючи заряд металів у КАС можна скоротити термін процесу припрацювання, збільшити термін сталого зношування та зменшити його вплив на корозійну-втомлювальну міцність деталей вузлів тертя.

Описаний спосіб регулювання деформації і руйнування твердих тіл в КАС притягує своєю простотою і можливістю безперервно і в широкому діапазоні змінювати їх поверхневу міцність і зносостійкість.

### **5.3.3. Ефективні способи підвищення зносостійкості деталей подрібнювальних машин**

Під час роботи різальні інструменти м'ясоподрібнювальних машин швидко зношуються, якість фаршу різко знижується, споживана потужність обладнання зростає до 20% [239]. При відновленні різальних властивостей інструментів перешліфовуванням з їх поверхонь видаляється зміцнений термообробленням чи наплавленням шар металу, а тому, в процесі подальшої експлуатації, інтенсивність зношування помітно зростає, що негативно позначається на якості фаршу і збільшує енергозатратність процесу.

Нині низька зносостійкість робочих органів технологічного м'ясоподрібнювального обладнання, зокрема, м'ясорізальних інструментів не забезпечує належного рівня його експлуатаційної надійності [238]. Враховуючи сучасні тенденції розвитку м'ясної промисловості, направлені на покращення якості продукції, підвищення властивостей надійності машин і агрегатів, а також на інтенсифікацію виробничих процесів, задача підвищення зносостійкості деталей м'ясоподрібнювального обладнання є досить актуальною [99, 239, 241].

Розв'язати її можна завдяки вибору перспективних захисних покриттів для зміцнення робочих поверхонь різальних інструментів м'ясоподрібнювального обладнання з урахуванням властивостей перероблюваної сировини.

У промисловості все частіше застосовуються інструментальні матеріали з покриттям, які є типовими композитами, що мають високу зносостійкість у поєднанні з задовільною міцністю, ударною в'язкістю, тріщиностійкістю [8, 239].

Для захисту інструментальних матеріалів широко застосовують покриття на основі титану, серед яких найбільш розповсюджені покриття нітридом титану (TiN), що утворюється в результаті реакції Ti з N<sub>2</sub> чи NH<sub>3</sub>, а також покриття карбідом титану (TiC) [3].

Відомі багат шарові покриття з TiN, (Ti,Al)N, (Ti,Cr,Al)N Mo<sub>2</sub>N, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, які широко використовують для нанесення на тверді сплави та

швидкоріжучі сталі (рис. 5.14) [7]. Ефективність застосування покриттів залежить від оброблюваного інструментом матеріалу.

Зносостійкі покриття на різальних інструментах зазвичай складаються із сполук, які є дуже твердими і крихкими. Одним із способів зниження крихкості таких покриттів є зменшення їх товщини. Високі міцнісні властивості тонких покриттів пов'язані з тим, що крихкі властивості, які притаманні твердим матеріалам, не проявляються при їх малій товщині. Разом з тим, тонкі покриття мають малу довговічність в умовах, наприклад, абразивного зношування, яке притаманне інструментам, що подрібнюють м'ясну сировину з вкрапленням дрібних кісток. Тому застосування принципу багат шаровості захисних покриттів дозволяє нанести покриття необхідної товщини, запобігши збільшенню крихкості поверхневого шару.

На підставі аналізу матеріалів покриттів для зміцнення різальних інструментів можна зробити висновок, що в даний час у розробці матеріалів для покриттів спостерігаються два підходи. Перший - полягає у створенні багат шарових покриттів. Кожен шар у таких покриттях виконує власну функцію і забезпечує поступовий перехід фізико-механічних властивостей покриття від поверхні до основи. Другий - полягає у створенні багатокомпонентних шарів змінного складу по товщині покриття. Разом з тим, ці методи значно підвищують вартість технологій отримання зносостійких покриттів і знижують рівень надійності покриття, тому що брак в одному із його шарів призводить до зниження якості всього покриття.

Останнім часом в промисловості для отримання захисних покриттів використовується порівняно новий спосіб – іонне азотування (азотування у тліючому розряді), який має ряд переваг перед стандартним пічним азотуванням. Іонне азотування дозволяє підвищити довговічність деталей, які експлуатуються у кислих і слабокислих середовищах, у тому числі і в середовищі м'ясного соку в 2...3 рази. Зносостійкість азотованих вуглецевих сталей у дистильованій воді в 4...10 разів вища, ніж покращених, нормалізованих і цементованих [238]. Все це стає можливим завдяки високій твердості азотованих шарів (рис. 5.15).

При терті в корозійно-активних м'ясних середовищах поверхні інструментів повинні мати не лише високу зносо- і корозійну стійкість, але також високий опір електрохімічній корозії. Корозійна стійкість азотованої поверхні збільшується з підвищенням вмісту азоту в сталі, тобто видалення найбільш багатой азоту ε-фази знижує корозійну стійкість азотованих деталей. Відомо також, що максимальна корозійна

стійкість спостерігається у тому випадку, коли всередині  $\epsilon$ -фази з високим вмістом азоту розсіяна  $\gamma'$ -фаза [133].

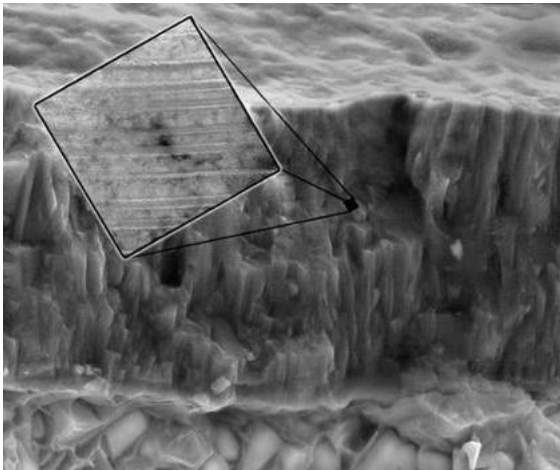


Рис. 5.14 – Структура зносостійкого покриття (Ti,Al)N

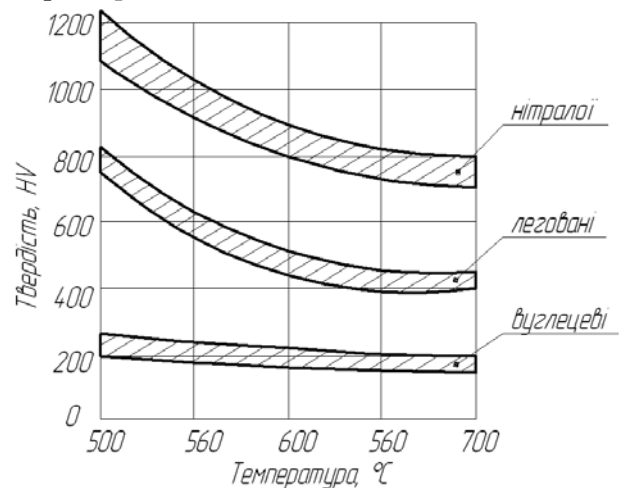


Рис. 5.15 – Залежність твердості азотованого шару від температури азотування і класів сталей [245].

Лазерне зміцнення інструменту полягає в потужному імпульсному (або безперервному) впливі світлового випромінювання з надзвичайно високою густиною енергії, що викликає локальні миттєві нагрівання його поверхні до високих температур, які перевищують не тільки температури структурно-фазових перетворень у металі, але і температуру плавлення. При високих швидкостях наступного охолодження на поверхні інструмента формується дрібнозерниста або навіть псевдоаморфна структура, що має підвищену (на 20...30%) твердість [99].

Електроіскрове легування є одним з перспективних способів зміцнення робочих поверхонь інструментів. Нанесення покриття не супроводжується розігріванням тіла інструменту через короткочасність імпульсів іскрового розряду, що дає можливість зміцнювати різальний інструмент практично з усіх інструментальних матеріалів [239].

Для підвищення зносостійкості інструментів різної форми на їх робочих поверхнях створюють ділянки з компактним розміщенням більш твердих матеріалів у м'якішій матриці з регулярним рельєфом, геометричні параметри якого можуть змінюватись у широких межах. Для інструментів, які працюють у важких умовах, як інструменти м'ясоподрібнювальних машин, можна застосовувати саме захисні покриття дискретного типу і створювати на їх основі композиційні структури з високою зносостійкістю. Навіть при експлуатації у важких умовах різальний інструмент з дискретними нітридтитановими покриттями забезпечує значно більше підвищення зносостійкості, ніж з суцільними [133]. Утворений мікрорельєф призведе до локалізації

продуктів зношування в заглибленнях та виключить їх попадання в перероблювальний м'ясопродукт.

Для роботи в таких умовах потрібні матеріали із складним комплексом фізико-механічних властивостей, які характерні для евтектичних покриттів на нікелевій основі системи Ni-Cr-B-Si [239]. Однак, ці сплави не вирізняються високою зносостійкістю, а наявність у їх структурі великої кількості нікелю унеможлиблює їх використання у контакті з м'ясною сировиною.

Значна кількість деталей м'ясоподрібнювального обладнання працюють у безпосередньому контакті з агресивними розчинами кухонної солі різної концентрації, що призводить до їх інтенсивного корозійно-механічного спрацювання. Перспективними для захисту деталей від КМЗ є безпечні евтектичні покриття на основі заліза [165, 216], нанесені газотермічним напиленням і наплавленням [239]. Разом з тим, поведінка цих покриттів в умовах зношування в соляних електролітах не вивчена, що унеможлиблює цілеспрямоване застосування їх для підвищення довговічності м'ясоподрібнювального обладнання.

Мета цього підрозділу – встановлення характеру взаємодії перспективних евтектичних покриттів на конструкційній сталі 45 з агресивним 3% розчином кухонної солі під час тертя в умовах одночасного впливу середовища і механічних навантажень.

Дослідженню піддавали покриття на залізній основі (табл. 5.3) [165].

Таблиця 5.3 – Вплив питомого навантаження на величину зміщення стаціонарних потенціалів при терті і зачищуванні покриттів

№ покриття	Фазовий склад покриттів	$\varphi_{ст}$ , В	Питоме навантаження, МПа	$\varphi_{ст-\varphi_{зач}}$ , В	$\varphi_{тр-\varphi_{зач}}$ , В
1	$\alpha\text{-Fe}+\text{Fe}_{0,4}\text{Mn}_{3,6}\text{C}+\text{Fe}_3\text{C}+\text{Fe}_2\text{B}$	-0,531	0,35	0,234	0,075
			0,70	0,268	0,099
			1,40	0,284	0,052
2	$\gamma\text{-(Fe,Ni)}+\text{Fe}_{0,4}\text{Mn}_{3,6}\text{C}+\text{Fe}_3\text{C}$	-0,313	0,35	0,404	0,119
			0,70	0,413	0,133
			1,40	0,417	0,150
3	$\gamma\text{-(Fe,Cr)}+\text{Fe}_{0,4}\text{Mn}_{3,6}\text{C}+\text{Fe}_3\text{C}$	-0,470	0,35	0,335	0,075
			0,70	0,356	0,103
			1,40	0,374	0,086
4	$\gamma\text{-(Fe,Ni,Mn)}+\alpha\text{-(Fe,Cr)}+\text{Fe}_{0,4}\text{Mn}_{3,6}\text{C}+\text{Fe}_3\text{C}$	-0,332	0,35	0,454	0,104
			0,70	0,491	0,116
			1,40	0,516	0,124

Мікроструктура покриттів, нанесених плазмовим струменем на конструкційну вуглецеву сталь 45, визначалась методом растрової електронної мікроскопії і мала шарувату будову з деякою кількістю мікропустот (рис. 5.16).

Експерименти проводили на установці торцевого тертя за схемою, реалізуючою зачищення поверхні металевого електроду в 3-відсотковому соляному розчині – електроліті, з використанням потенціостатичного методу, який застосовувався як для дослідження електрохімічних процесів, що відбуваються при терті на поверхні, так і для управління їх зношуванням [186,227,233]. В якості контртіла, що зношувало покриття, застосували шліфувальний круг марки 24A25НСМ16К5Б. Випробування проводили за швидкості ковзання 0,8 м/с (по центру зразка діаметром 6 мм) і питомого навантаження 0,35; 0,70; 1,40 МПа.

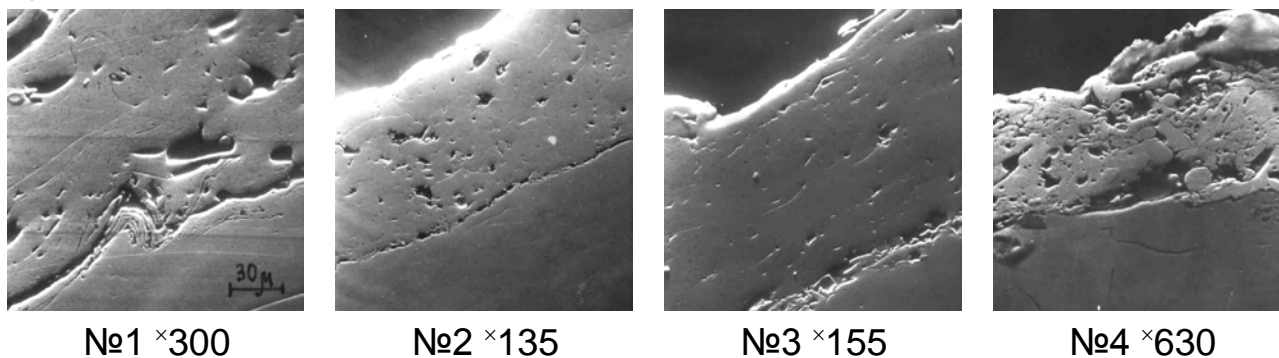


Рис. 5.16 – Мікроструктура евтектичних захисних покриттів (номерація покриттів відповідає табл. 5.3)

Стаціонарні електродні потенціали покриттів визначали за допомогою потенціостата П8527М в статичних умовах ( $\varphi_{ст}$ ), при терті ( $\varphi_{тр}$ ) і при зачищуванні поверхні ( $\varphi_{зач}$ ) – за максимального негативного значення  $\varphi_{тр}$  в початковий період зношування. Поляризаційні криві знімали при різному питомому навантаженні. В якості електрода порівняння використовували стандартний хлорсрібний електрод ЕВЛ-1М1. Поляризаційні криві отримували потенціостатичним методом із швидкістю розгортання потенціалу 0,5 мВ/с. Розгортання потенціалу включали через 30 хв після початку дослідження, коли наставала відносна стабілізація моменту тертя і потенціалу  $\varphi_{тр}$ . З метою підвищення відтворюваності результатів, поляризацію зразка здійснювали при розгортанні потенціалу з катодної області в анодну. Величина заздалегідь заданого потенціалу складала 0,9...1,1 В.

Зносостійкість покриттів оцінювали гравіметричним методом з похибкою 0,0002 г за величиною зносу за 30 хв. випробувань.

Стационарні потенціали  $\varphi_{ст}$  заздалегідь припрацьованих абразивним кругом при навантаженні 0,7 МПа евтектичних покриттів вимірювали через 5 хв. після занурення зразків в електроліт.

Характер зміни потенціалів в початковий період занурення («розблагорожування» внаслідок розчинення оксидної плівки, що утворилася на повітрі) і їх величина свідчать, що ці покриття в 3%-му розчині хлористого натрію знаходяться в активному стані (див. табл. 5.3). Потенціали  $\varphi_{ст}$  покриттів 2 і 4 набагато позитивніші за потенціал  $\varphi_{ст}$  покриття 1.

Зачищування поверхонь покриттів абразивним кругом призводить до різкого зміщення їх потенціалів  $\varphi_{ст}$  в область негативних значень, що викликане різким прискоренням анодних процесів внаслідок руйнування поверхневих плівок та інтенсивної пластичної деформації.

Збільшення навантаження до 1,4 МПа призводить до значного розблагорожування потенціалів тертя. Мабуть, з ростом навантаження, більшою мірою проявляється механохімічний ефект, що призводить до значного збільшення швидкостей проходження анодних процесів, про що свідчить істотне зміщення анодних поляризаційних кривих в область великої густини струму (рис. 5.17). Катодні процеси, якщо судити за поляризаційними кривими, прискорюються у меншій мірі.

Вплив навантаження на швидкість проходження корозійних процесів при терті оцінювали за струмами саморозчинення, знайденими екстраполяцією потенціодинамічних поляризаційних кривих [186], знятих при малій швидкості розгортання потенціалу. З підвищенням навантаження корозія всіх досліджених вивчених покриттів підсилюється (рис. 5.18).

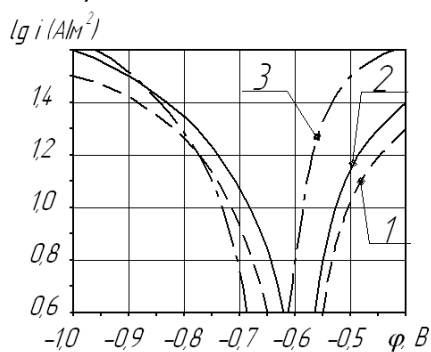


Рис. 5.17 – Поляризаційні криві для покриття 2, зняті при терті з різним питомим навантаженням: 1 – 0,35; 2 – 0,70; 3 – 1,4 МПа

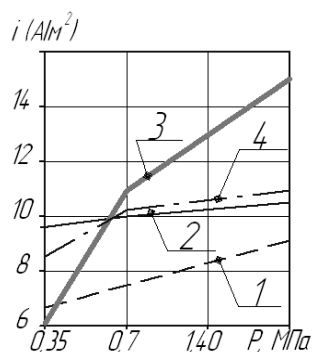


Рис. 5.18 – Вплив питомого навантаження на густину струму саморозчинення при терті покриттів (номери відповідають табл. 5.3).

Найбільшою зносостійкістю за відсутності зовнішньої поляризації (при  $\varphi_{тр}$ ) відрізняється покриття 3 (рис. 5.19). Порівняння зносу покриттів з їх струмами саморозчинення, визначеними екстраполяцією поляризаційних кривих, знятих при тому ж режимі тертя, показало, що у порядку збільшення струмів саморозчинення покриття розташовуються в ряд 1, 2, 4, 3, а за збільшенням зносу – в ряд 3, 1, 2, 4.

Поляризація фрикційного контакту, що полягає у зміщенні потенціалу тертя в катодну (до  $\varphi_k$ ) і в анодну (до  $\varphi_{a1}$ , і  $\varphi_{a2}$ ) області (рис. 5.19), істотно впливає на процес корозійно-механічного зношування евтектичних покриттів.

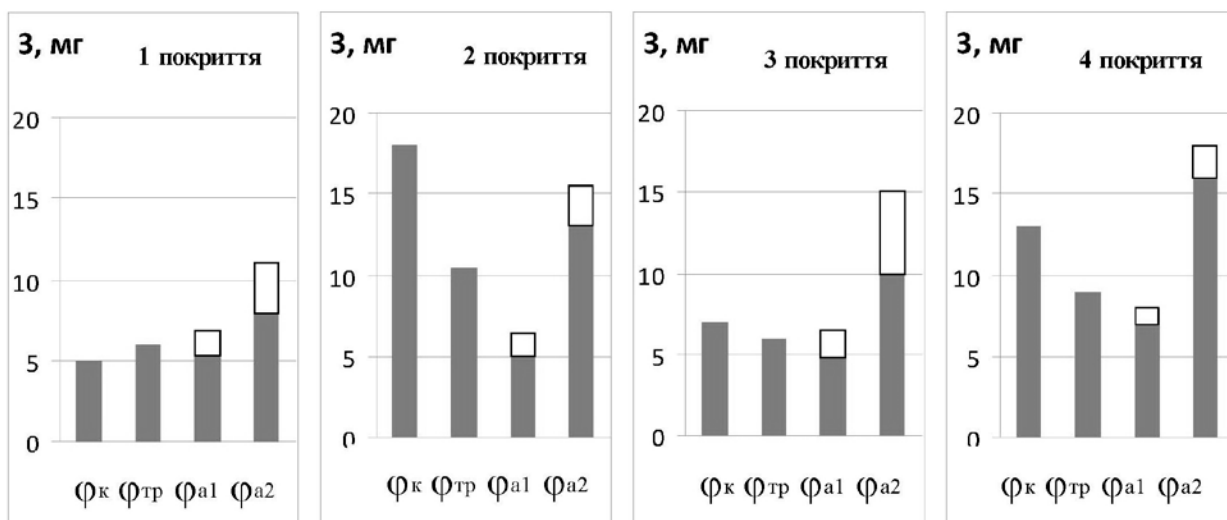


Рис. 5.19 – Залежність зносу покриттів 1, 2, 3 і 4 від електродного потенціалу при терті з питомим навантаженням 0,7 МПа. Виділені білим кольором ділянки – втрати маси внаслідок електрохімічного розчинення: для покриттів 1, 3, 4  $\varphi_k = -1,0$  В;  $\varphi_{a1} = -0,4$  В;  $\varphi_{a2} = -0,1$  В; для покриття 2  $\varphi_k = -0,9$  В;  $\varphi_{a2} = -0,4$  В;  $\varphi_{a2} = 0,0$  В.

Катодна поляризація неоднозначно впливає на зносостійкість. Для покриттів 2, 3, 4 спостерігається збільшення зносу відповідно в 2,3; 1,2; 1,4 рази з підвищенням густини струму поляризації від 30 до 38 А/м<sup>2</sup>. Зносостійкість покриття 1, на відміну від інших, за густини струму 35 А/м<sup>2</sup> збільшується на 20%.

Зміна зносостійкості за катодної поляризації пов'язана, імовірно, з депасивацією поверхонь покриттів в результаті електрохімічного відновлення утворених при терті оксидних та інших плівок. При цьому змінюється будова плівок, зменшуються їх товщина і змащувальна дія.

Поляризація анодним струмом при  $\varphi_{a1} = -0,4$  В знижує знос покриттів 2 і 4 в середньому на 20% за густини струму 30 і 38 А/м<sup>2</sup> і трохи (на 10%) збільшує знос покриттів 1 і 3 за густини струму, відповідно, 48 і 62 А/м<sup>2</sup>.

Анодна поляризація зони тертя підсилює процес адсорбції на поверхні тертя іонізованих молекул кисню і аніонів хлору, полегшує іонізацію металу і утворення фазових плівок.

Для наближеної оцінки вкладу чисто електрохімічного розчинення в спрацювання покриттів при корозійно-механічному зношуванні в умовах контрольованого анодного потенціалу втрати маси внаслідок проходження струму визначали за законом Фарадея:

$$\Delta m = (A \cdot Q) / z \cdot F, \quad (5.11)$$

де  $\Delta m$  – маса металу, що розчинився, г;  $A$  – атомна маса металу;  $Q$  – кількість пропущеної електрики, К;  $z$  – валентність іона металу;  $F = 965\,000$  К – число Фарадея. При цьому приймали наступні допущення. Оскільки основним компонентом покриттів є залізо, то враховували розчинення тільки атомів заліза ( $A=56$ ). Судячи з поляризаційних кривих (див. рис. 5.17), реакція плине в активній області, а в цьому випадку в розчин переходять двохвалентні іони заліза ( $z=2$ ) [57]. Вихід реакції за струмом приймали рівним 100%.

Доля електрохімічних втрат маси в загальній величині зносу при  $\varphi_{a1}$  для покриттів 1, 2 і 4 складає в середньому 10%, а для покриття 3 дорівнює 16%. Порівняно невелике збільшення зносу покриттів 1 і 3 при зміщенні потенціалу до  $\varphi_{a1}$  співрозмірне з втратами маси внаслідок електрохімічного розчинення (див. рис. 5.19).

Зменшення зносу покриттів 2 і 4 при  $\varphi_{a1}$  пов'язане з формуванням досить щільних поверхневих плівок, що краще чинять опір абразивній дії, ніж плівки, які утворюються при  $\varphi_{тр}$ . Відмітимо, що для підтримки заданого потенціалу  $\varphi_{a1}$  на покриттях 2 і 4 необхідна значно менша густина струму, ніж для покриттів 1 і 3.

Подальше зміщення потенціалу в анодну область до  $\varphi_{a2}$  (приблизно на 0,6 В у порівнянні з  $\varphi_{тр}$  покриттів) призводить до сильного підвищення зносу усіх покриттів – по порядку їх номерів на 65, 40, 165 і 100%. Доля електрохімічних втрат у загальній величині зносу для всіх покриттів збільшилася, але найбільше для покриттів 1, 3 і найменше для покриттів 2, 4 (у порядку зростання номерів покриттів вона склала 35, 16, 34 і 15 %).

Майже увесь приріст зносу покриття 1 і більше половини приросту зносу покриття 3 забезпечується електрохімічним розчиненням. Істотне збільшення зносу покриттів 2 і 4 при струмах поляризації, приблизно удвічі менших, ніж струми поляризації покриттів 1 і 3, ніяк не можна пояснити лише підвищенням долі чисто електрохімічного розчинення. Не виключено, що при значній анодній поляризації в умовах активації



поверхні покриттів пружньо-пластичними деформаціями проявляється хемомеханічний ефект [183]. Узагальнити отримані дослідні дані можна так:

- Результати випробувань на зношування в умовах контрольованого потенціалу дозволяють зробити висновок про можливість керування процесом корозійно-механічного зношування евтектичних покриттів шляхом регулювання потенціалу зони тертя поляризацією від зовнішнього джерела струму.

- Ефект зниження зносу покриттів 2 і 4 в результаті анодної поляризації фрикційного контакту (потенціал  $\varphi_{a1}$ ), що проявляється при порівняно малій густині струму, представляє практичний інтерес як варіант анодного захисту в умовах тертя деталей технологічного обладнання м'ясопереробної галузі.

- Посилення анодного розчинення металу, що знаходиться в активному стані, не обов'язково інтенсифікує корозійно-механічне зношування. У цьому випадку навіть може збільшуватись зносостійкість. Зміщення потенціалу тертя покриття в область, в якій проявляється такий позитивний ефект, можна здійснити не лише поляризацією від зовнішнього джерела струму, але також зміною складу і структури покриття, підбором матеріалу контртіла пари тертя, зміною режиму тертя і складу технологічного середовища.

- Досліджені ефекти можуть бути застосовані для підвищення надійності і довговічності технологічного обладнання м'ясопереробних підприємств.

#### **5.4. Модель корозійно-механічного спрацювання м'ясоподрібнювальних машин**

Аналіз матеріальних затрат на ремонт обладнання у харчовій і переробній промисловості АПК показує, що на ліквідацію наслідків його корозійно-механічного спрацювання витрачається близько 80% усіх коштів, а питома вага річних витрат перевищує 2% вартості основних фондів [238].

Робочі вузли машин і апаратів м'ясопереробної промисловості, перероблювані речовини й технологічні рідини утворюють складні фізико-хімічні і динамічні системи, в яких закономірності тертя, корозії та інтенсивність спрацювання залежать від багатьох чинників: умов переробки сировини, хімічних і реологічних характеристик робочих середовищ, застосованих конструкційних матеріалів і захисних покриттів, геометричних параметрів робочих органів тощо (див. розділ 2).

Механізм корозійно-механічного зношування матеріалів в агресивних середовищах-електролітах м'ясопереробної промисловості може бути описаний на основі аналізу термодинамічної системи, яка зв'язує макроскопічні параметри трибологічних об'єктів з електрохімічними характеристиками взаємодії і руйнування конструкційних матеріалів в конкретному технологічному середовищі.

При розгляданні сталого процесу корозійно-механічного зношування металів і сплавів в технологічних середовищах м'ясопереробних виробництв трибологічну термодинамічну систему можна окреслити сукупністю деформованих об'ємів металу і продуктів зносу, які знаходяться в контакті з агресивним середовищем. Ця система може бути поділена на дві частини: в першій протікають лише деформаційні процеси, а друга, крім цього, зв'язана з хімічними реакціями і зміною площі вільних поверхонь внаслідок руйнування.

При корозійно-механічному зношуванні величина розсіяної енергії визначається не лише пластичною деформацією, але й інтенсивністю електрохімічних процесів та величиною зміни площі вільних поверхонь. Сумісний кількісний аналіз різнорідних процесів можливий при введенні універсальних енергетичних критеріїв з використанням методів термодинаміки необоротних процесів. Такі процеси можна описати за допомогою дисипативної функції [153, 184, 200]:

$$\bar{\psi} = T \frac{diS}{dt} = \sum \frac{d\bar{W}_{ouc}^i}{dt} + \bar{I}_c A_c, \quad (5.12)$$

де  $\psi = \psi/S_K$  - дисипативна функція (швидкість розсіювання енергії в системі) віднесена до одиниці поверхні контакту  $S_K$ ;  $T$  - температура системи;  $di\bar{S}/dt = diS/S_K dt$  - зміни ентропії системи;  $d\bar{W}_{ouc}^i/dt$  - швидкість розсіювання енергії для  $i$  - процесу, який реалізується в системі;  $\bar{I}_c A_c = \frac{I_c}{S_K} A_c$  - потужність хімічної реакції;  $\bar{I}_c$  - швидкість хімічної реакції;  $A_c$  - хімічна спорідненість реакції.

Швидкість розсіювання енергії, пов'язана з пластичним деформуванням і утворенням нових поверхонь, складає:

$$\sum_i \frac{dW}{dt} = \frac{d\bar{W}_{ni}}{dt} + \sum_j \frac{d\bar{W}_s^j}{dt} \quad (5.13)$$

Дисипативна функція процесу пластифікації має вигляд [253]:

$$\bar{\psi}_{ni} = \frac{dW_{ni}}{dt} = \bar{I}_\alpha A_\alpha, \quad (5.14)$$

де  $\bar{I}_\alpha = I_\alpha/S_K$  - густина потоку дислокацій;  $A_\alpha = \Delta\tau/\alpha$  - хімічна

спорідненість процесу утворення і переміщення дислокацій;  $\Delta\tau$  – знеміцнення матеріалу;  $\alpha$  - кількість дислокацій в одиниці деформованого матеріалу.

Уявляючи процес зношування поверхні як відколювання частинок матеріалу по дислокаційних межах, дисипативну потужність процесу можна виразити таким чином:

$$\sum_j \frac{d\bar{W}_s^j}{dt} = I_{s0}\Delta\sigma_0 + \bar{I}_{sm}\Delta\sigma_m, \quad (5.15)$$

де  $I_{s0}=dS_o/S_k \cdot dt$  і  $I_{sm}=dS_m/S_k \cdot dt$  – швидкості зміни площі вільної поверхні оксидів і неокисленого матеріалу;  $\Delta\sigma_0$  і  $\Delta\sigma_m$  - відповідно, робота утворення одиниці нової вільної поверхні оксидів і вихідного матеріалу.

З урахуванням виразів (5.13 - 5.15), вираз (5.12) можна записати у вигляді:

$$\bar{\psi} = \bar{I}_\alpha \frac{\Delta\tau}{\alpha} + \bar{I}_{s0}\Delta\sigma_0 + I_{sm}\Delta m + \bar{I}_c A_c \quad (5.16)$$

На основі лінійного закону і співвідношень взаємності Онзагера [184] з рівняння (5.16) отримуємо систему лінійних феноменологічних рівнянь:

$$\bar{I}_\alpha = C_1 \frac{\Delta\tau}{\alpha} + C_2 A_c + C_3 \Delta\sigma_0 + C_4 \Delta\sigma_m, \quad (5.17)$$

$$\bar{I}_c = C_2 \frac{\Delta\tau}{\alpha} + C_5 A_c + C_6 \Delta\sigma_0 + C_7 \Delta\sigma_m, \quad (5.18)$$

$$\bar{I}_{s0} = C_3 \frac{\Delta\tau}{\alpha} + C_6 A_c + C_8 \Delta\sigma_0 + C_9 \Delta\sigma_m, \quad (5.19)$$

$$\bar{I}_{sm} = C_4 \frac{\Delta\tau}{\alpha} + C_7 A_c + C_9 \Delta\sigma_0 + C_{10} \Delta\sigma_m, \quad (5.20)$$

де  $C_1 \dots C_{10}$  - феноменологічні коефіцієнти.

Приведена швидкість зношування  $\bar{I}$  повинна визначитися сумою густини потоків маси окислених  $\bar{I}_0$  та неокислених  $I_m$  продуктів зносу:

$$\bar{I} = \bar{I}_0 + \bar{I}_m \quad (5.21)$$

Потоки  $I_0$  та  $I_m$  можна отримати, виходячи з рівнянь (5.16 - 5.21). Враховуючи, що  $\bar{I}_0 = \bar{I}_c \nu_0$  з рівняння (5.18) можна визначити величину потоку окисленого металу:

$$\bar{I}_0 = I_c \nu_0 = \nu_0 (C_2 A_c + C_5 A_c + C_6 \Delta\sigma_0 + C_7 \Delta\sigma_m), \quad (5.22)$$

де  $\nu_0$  - стехіометричний коефіцієнт окислу в рівнянні хімічної реакції.

Підставляючи рівняння (5.22) і (5.18) у (5.16) і враховуючи, що  $I_m = \bar{I}_{sm}/C_{11}$  (де  $C_{11}$  - коефіцієнт, який залежить від властивостей

зношеного матеріалу) [200], отримаємо :

$$\bar{I}_m = \frac{1}{C_{11}\Delta\sigma_m} \left[ \bar{\psi} - C_1 \left( \frac{\Delta\tau}{\alpha} \right)^2 - (2C_3\Delta\sigma_0 + 2C_2A_c + C_4\Delta\sigma_m) \frac{\Delta\tau}{\alpha} - (C_5A_c + C_8\Delta\sigma_0^2 + 2C_6\Delta\sigma_0A_c + C_7\Delta\sigma_mA_c + C_9\Delta\sigma_0\Delta\sigma_m) \right] \quad (5.23)$$

Вся зовнішня робота, виконана над системою тертя, дорівнює:

$$W = P \cdot f_{mp} \cdot L, \quad (5.24)$$

де  $P$  - питоме навантаження;  $f_{mp}$  - коефіцієнт тертя ковзання;  $L$  - шлях тертя.

Тоді розсіяна енергія (дисипативна функція) визначиться так:

$$\psi = K \cdot P \cdot f_{mp} \cdot V, \quad (5.25)$$

де  $K$  - постійна, яка характеризує долю розсіяної енергії при зношуванні;  $V$  - швидкість відносного ковзання частинок зношуючого середовища по поверхні тертя.

З виразів (5.21), (5.22) і (5.24) можна отримати швидкість зношування, приведену до одиниці поверхні :

$$\bar{I} = \bar{I}_0 + \bar{I}_m = K_1 \cdot P \cdot V + K_2 \Delta\tau + K_3 (-\Delta\tau)^2, \quad (5.26)$$

де  $K_1, K_2, K_3$  - постійні, які включають в себе величини  $C_i, f_{tp}, v_0, \Delta\sigma_0, \Delta\sigma_m, \alpha$ .

З рівняння (5.25) видно, що швидкість корозійно-механічного зношування лінійно залежить від навантаження і швидкості ковзання і параболічно від знеміцнення матеріалу корозійно-активним середовищем.

З електрохімії відомо [185], що

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\varphi_0 \cdot n \cdot F}{V_M}, \quad (5.27)$$

де  $\Delta\varphi_0$  - зміна рівноважного електродного потенціалу при зношуванні;  $n$  - валентність металу;  $F$  - постійна Фарадея;  $V_M$  - мольний об'єм речовини.

Підставляючи вираз (5.26) в (5.25) отримаємо:

$$\bar{I} = K_1 \cdot P \cdot V - K_2 \frac{\Delta\varphi_0 \cdot n \cdot F}{V_M} + K_3 \left( \frac{\Delta\varphi_0 \cdot n \cdot F}{V_M} \right)^2 \quad (5.28)$$

У формулі (5.28) величини  $P$  і  $V$  характеризують зовнішню дію на поверхню, що зношується, а зміна потенціалу залежить від властивостей матеріалів пари тертя та характеристик корозійного середовища. Якщо пара тертя буде складатися з різнорідних металів або покриттів, то кожен з них має свій електродний потенціал. В цьому випадку пара буде

мати сумарний змішаний електродний потенціал [183, 186].

Зміщуючи потенціал тертя пари з використанням зовнішнього джерела струму в катодну або анодну область, можна управляти процесом корозійно-механічного зношування в деяких межах, не змінюючи при цьому умов навантаження вузла тертя. Це зміщення також можна здійснити зміною складу матеріалів, що труться, шляхом нанесення захисних покриттів, зміною режимів тертя та інгібуванням технологічного середовища, що підтверджено багатьма дослідженнями [230, 238, 183].

Для перевірки правильності вибору термодинамічної моделі корозійно-механічного зношування провели розрахунок коефіцієнтів в формулі (5.27) з використанням методу найменших квадратів. При розрахунках були вибрані довірчі інтервали для рівня імовірності 0,95. Паралельно були проведені випробування на зношування бронзових зразків (БрОЦС 5-5-5) по схемі "втулка-втулка" на установці торцевого тертя з вимірюванням потенціалів поверхні тертя при занурюванні у середовище та в процесі тертя [223, 238] за допомогою потенціостата П-5827. Досліди проводили в середовищах м'ясопереробного виробництва (табл. 5.4). Швидкість ковзання складала 0,2 м/с, питома навантаження 0,92 МПа. Швидкість розгортання потенціалу при зніманні поляризаційних кривих дорівнювала 2 мВ/с.

Для перевірки адекватності моделі (5.28) для м'ясного соку з рН 5,5 і вмістом 3% NaCl було проведено 3 досліди (табл. 5.4). Середньоквадратична похибка буде такою:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / (n-1)} = 0,25. \quad (5.29)$$

Враховуючи малу величину виборки помножимо S на коефіцієнт Ст'юдента t. Для  $\alpha=0,05$  і  $f=2$  його табличне значення дорівнює  $t=4,3$ . Тоді відкорегована S буде:  $S = 0,25 \cdot 4,3 = 1,08$ . Тобто за результатами вимірювань  $S = 10,95 \pm 1,08$ . Верхня межа зносу дорівнює 12,03 мг. Таким чином, теоретично визначений результат зносу 11,80 мг попадає в довірчий інтервал з імовірністю 0,95. Аналогічний хід перевірки адекватності моделі для зношування в жировій емульсії:  $S=0,2$ , а, з врахуванням критерію Ст'юдента,  $S = 0,02 \cdot 4,3 = 0,086 \approx 0,09$ . Отже, з імовірністю 0,95 теоретичний результат розрахунку зносу у 0,24 мг попадає в довірчий інтервал, тому що його нижня межа дорівнює 0,21 мг.

Таблиця 5.4 – Триботехнічні та електрохімічні параметри експериментальних зразків, отримані розрахунками та вимірюванням

Технологічне середовище	Зміна потенціалу при зношуванні, мВ	Знос зразків в мг на 10 км шляху тертя				
		верхнього	нижнього	середній	середній по всіх експериментах	розрахований
М'ясний сік	135	11,20	10,70	10,95	10,95	11,80
		11,22	10,72	10,97		
		11,18	10,68	10,93		
Жирова емульсія	25,0	0,33	0,29	0,31	0,30	0,24
		0,32	0,27	0,29		
		0,32	0,28	0,30		

Результати аналітичних і експериментальних досліджень підтверджують адекватність отриманої математичної моделі. Вони також свідчать, що технологічне середовище може в десятки разів змінювати інтенсивність зношування матеріалів. Корозійно-механічне зношування поверхонь в агресивних технологічних середовищах м'ясопереробних виробництв не може розглядатися як просте сумування механічного і електрохімічного факторів. Це більш складний процес, в якому електрохімічне розчинення служить каталізатором втомного руйнування. Тертя ж, в свою чергу, сприяє розвитку електрохімічної корозії. У всіх цих процесах суттєву роль відіграє потенціал системи [223, 89] та його зміщення під впливом технологічного середовища в трибологічних системах [230, 183, 186].

### 5.5. Керування зносостійкістю м'ясоподрібнювальних інструментів

Виготовлення фаршу для багатьох видів ковбас здійснюють за допомогою вовчків, які мають низьку довговічність через інтенсивне зношування різальних інструментів [245]. А тому доцільно дослідити і застосувати конструктивно-технологічні заходи для підвищення зносостійкості ножів і граток цих машин.

Найчастіше для середнього подрібнення сировини вітчизняні переробними застосовують вовчки виробництва Полтавського машинобудівного заводу, завдяки їх невисокій вартості і наявності достатньої кількості запасних частин [245]. Разом з тим, стійкість до спрацювання ножів обмежується 7...8 годинами експлуатації. Якість подрібнення м'яса прямо залежить від гостроти інструментів вовчка.

Тому за об'єкт досліджень був вибраний різальний комплект вовчка МП-160.

Підвищення зносостійкості різального комплекту вовчків типу МП-160 можливе завдяки використанню ефекту вибіркового переносу при терті ножів по гратках та конструкційному удосконаленню інструментів.

### **5.5.1. Конструктивно-технологічні способи підвищення зносостійкості**

Якість фаршу визначається ступенем його подрібнення, вологомісткістю та якістю вихідної сировини. Ці показники прямо залежать від геометричних параметрів ножів і ґраток вовчків та від гостроти різальних лез [89, 184, 185]. Швидкість спрацювання ножів і ґраток визначає надійність вовчків у цілому [238].

Довговічність різальних комплектів можна збільшити завдяки оптимізації їх конструкції, застосуванню прогресивних технологічних процесів виготовлення інструментів та забезпеченню умов для їх раціональної експлуатації [184, 185, 238].

До конструктивних методів підвищення довговічності належать: використання ножів з криволінійним і зміщеним різальним лезом, вибір оптимальних кутів загострення ножів, використання збірних конструкцій інструментів для зменшення витрат легованих інструментальних сталей або твердих сплавів.

До технологічних методів підвищення довговічності ножів належать: використання зносостійких матеріалів і прогресивних способів виготовлення заготовок, вибір оптимальних режимів термообробки і загострення та способів захисту від спрацювання [123].

Експлуатаційна довговічність вовчків залежить від умов роботи різального комплекту і його правильної експлуатації. Наприклад, не можна допускати великого спрацювання інструменту, надто затягувати притискну гайку під час зближення ножів, тому що це призводить до перегрівання фаршу та інтенсивного спрацювання різального комплекту [185]. Тому багато авторів та фірм пропонують пристрої, що регулюють зусилля притискування ножів до ґратки. Але вони складні і не використовуються у вовчках вітчизняного виробництва [239].

Різальний комплект вовчків складається із швидкозношуваних деталей, а витрати на їх виготовлення для поновлення працездатності співмірні з вартістю самих машин. У процесі експлуатації зношуються лише різальні леза, тому захист їх від спрацювання та відновлення

роботоздатності коштує дешевше, ніж виробництво нових інструментів [239].

За даними різних авторів лінійне спрацювання лез серійних ножів вовчків до наступного загострення становить всього 0,25...1,0 мм, причому спрацювання по довжині леза нерівномірне. Під час повторних загострень знімається шар матеріалу ножів завтовшки 0,5...0,7 мм і вони повністю виходять з ладу вже через 15...20 робочих змін. А тому зменшення кількості загострень може значно підвищити їх довговічність [89, 185].

Вважається, що на сучасному рівні розвитку машинобудування для переробної і харчової промисловості в Україні перспективними, з огляду на ефективність і простоту реалізації, є такі методи підвищення довговічності ножів: застосування збірних конструкцій; використання для виготовлення різальних пластин легованих зносостійких сталей; вибір раціональних геометричних параметрів інструментів; застосування для загострення ельборових кругів; забезпечення вчасного і якісного обслуговування м'ясоподрібнюючих вовчків [28, 238].

Одним з головних чинників, що визначають працездатність ножів м'ясорізальних вовчків, є радіус заокруглення різального леза (рис. 5.20). Від його величини залежить вологомісткість м'ясного фаршу. Зі зменшенням гостроти інструменту цей показник якості зменшується по експоненті (рис. 5.21) [238, 239]. Дослідження показали, що радіус заокруглення різального леза ножа значною мірою визначається величиною спрацювання, що залежить від кількості повторних загострень, та переднім кутом ножа  $\gamma$  (рис. 5.22). Зі збільшенням переднього кута зменшується величина спрацювання ножа і радіус заокруглення його різального леза та покращується якість подрібнення сировини.

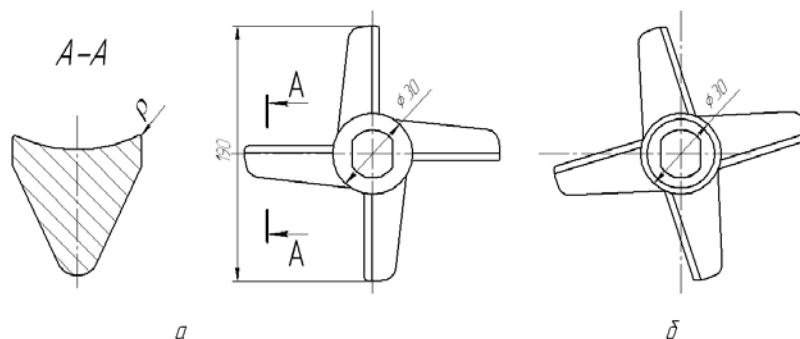


Рис. 5.20 – Нож м'ясорізального вовчка МП-160: а – серійний; б – із зміщеним різальними лезом



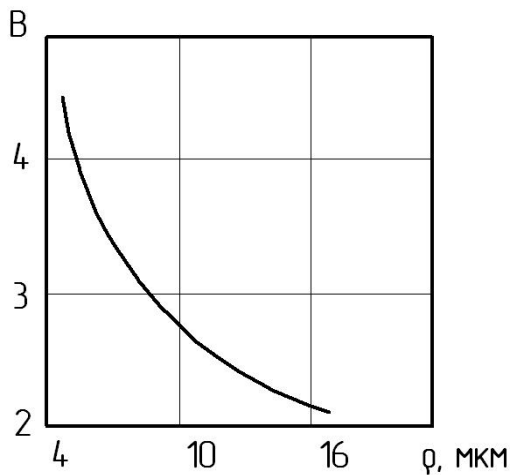


Рис. 5.21 – Залежність відносної вологомiсткостi фаршу В вiд радиуса заокруглення рiзального леза ножа ρ

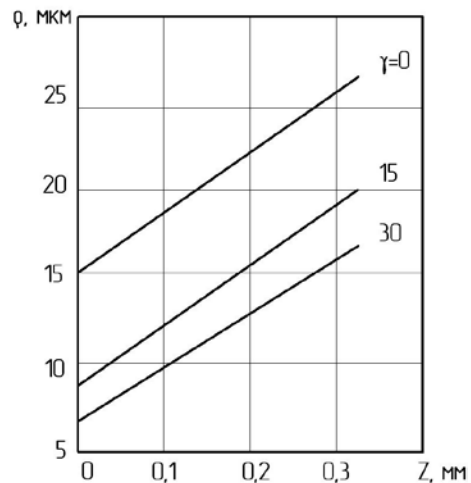


Рис. 5.22 – Залежність радиуса заокруглення рiзального леза ρ вiд величини спрацювання Z i переднього кута ножа γ

Недоліком серійних м'ясорiзальних ножiв є той, що лiнiя рiзального леза ножа спiвпадає з радiальним напрямком вiдносно осi обертання (рис. 5.20,а) i процес рiзання сировини наближається до процесу рубання. Внаслiдок цього вiдбувається iнтенсивне спрацювання леза та погiршується якість фаршу.

Нова конструкцiя ножа вовчка зi змiщеним рiзальним лезом [239] передбачає розмiщення леза по дотичнiй до кола деякого дiаметра, описаного з центра обертання. У цьому випадку з'являється повздовжня (вiдносно леза ножа) складова зусилля рiзання, що забезпечує поступове розтинання сировини (ковзне рiзання) i покращує якість кiнцевого продукту (рис. 5.20,б) [238].

Запропонованi конструкцiї ножiв з переднiми кутами  $\gamma > 0^\circ$  та змiщеним рiзальним лезом не потребують суттєвої перебудови технологiчного процесу їх виготовлення i забезпечують значне (на 50...100%) пiдвищення довговiчностi.

Вiдмови деталей рiзального комплекту переважно обумовленi їх спрацюванням в умовах тертя зi змащуванням специфiчним середовищем (фаршем i м'ясним соком). За даними виробничих спостережень, лiнiйне спрацювання серійних ножiв вовчкiв, виготовлених зi сталi У8А, до вiдмови становить близько 0,2...0,3 мм. При переточуванні лез зiмається шар завтовшки 0,5...0,7 мм. За таких умов довговiчностi ножiв не перевищує 7...15 робочих змiн. Традицiйнi методи пiдвищення зносостiйкостi шляхом вибору зносостiйких матерiалiв i покриттiв ґрунтовно дослiдженi i їх можливостi обмеженi [239, 173].

### 5.5.2. Застосування вибіркового переносу у вузлах подрібнення м'яса

У пошуках нових шляхів підвищення зносостійкості деталей м'ясоподрібнювальних машин доцільно звернутися до живої природи. Аналіз навантажених рухливих з'єднань показує, що є всього два типи вузлів тертя — відкриті і закриті. У відкритих вузлах тертя працює твердий матеріал по твердому - це зуби тварин. Закриті вузли тертя – суглоби живих організмів, «сконструйовані» на принципах, які у машинобудуванні не застосовують. Тут на твердій кістці розташовується м'який хрящ, на поверхні якого є тонка рухлива біополімерна плівка. Сполучена поверхня має таку ж структуру. У суглобі в парі тертя працюють два однакових матеріали, причому м'який по м'якому (що не прийнято у парах тертя). Відзначимо, що подібні пари тертя (у миші, слона, риби, птахів) є універсальними вузлами, які володіють «беззношуванням». Відомо, що біологічні системи мають здатність до самовідновлення і можуть працювати десятки років без зношування.

Зараз встановлено, що у відкритих системах, які постійно одержують із зовнішнього середовища негативну ентропію і речовину, можуть виникати стаціонарні нерівноважні стани з високим ступенем упорядкованості [225].

Відповідно до термодинаміки нерівноважних процесів нові структури можуть виникати в природі у тих випадках, коли виконуються наступні чотири необхідних умови: 1) система є термодинамічно відкритою, тобто може обмінюватися речовиною  $m$  і (або) енергією  $E$  із середовищем; 2) динамічні рівняння системи нелінійні; 3) відхилення від рівноваги перевищує критичне значення; 4) мікроскопічні процеси відбуваються кооперовано (узгоджено) [225].

Вузол тертя, наприклад, м'ясоподрібнювальний комплект вовчка в неживій природі задовольняє вимогам самоорганізації. Він є відкритою системою. До нього підводиться енергія від електродвигуна, яка обертає ножі. Такі вузли тертя змащуються. Мазильний матеріал – це м'ясний сік, що складається з безлічі однакових елементів, у даному випадку — молекул. У ньому можуть бути міцели, іони металів. Усе це створює умови для самоорганізації нових структур [225].

До останнього часу вважалося, що тертя є руйнівним процесом. Зворотне твердження було абсурдом, як і те, що можна створити вузол тертя, який би не зношувався. Однак природа подбала і про машини.

Враховуючи, що в перероблюваному м'ясному середовищі містяться різноманітні хімічно- і поверхнево-активні сполуки, ефективним може

бути використання ефекту вибіркового переносу (ВП) [99, 245]. Вибірковий перенос забезпечує зменшення інтенсивності зношування певних пар тертя в присутності мастил і поверхнево-активних речовин. При наявності в зоні тертя міді на поверхні сталевих деталей утворюються збагачені міддю шари, деформація яких під дією зсувних напружень відбувається без зміцнення і розвитку втомлювальних тріщин. Але суттєве зменшення інтенсивності зношування і коефіцієнту тертя, внаслідок проявлення ефекту вибіркового переносу, можливе лише за певних умов роботи вузлів тертя і лише для конкретних матеріалів.

Тому, для виявлення раціональних режимів роботи різальних пар ножів і граток, були проведені триботехнічні випробування матеріалів в умовах, які відповідають параметрам навантаження деталей різального комплексу вовчків [239]. Досліди проводили на спеціальній установці, побудованій на базі вертикально-свердлильного верстата, яка моделює роботу пари ніж-гратка вовчка. Досліджувані зразки інструментів виготовляли із сталей 65Г і У8А, які широко використовуються для виготовлення ножів і граток. Зразок, який обертався, був виготовлений у вигляді складеного ножа вовчка з робочими різальними пластинами із сталі 65Г (HRC<sub>e</sub> 56), завтовшки 5мм, за якими закріплювались різної товщини вставки з бронзи БрАЖ 9-4. Ця бронза була вибрана тому, що вона, згідно санітарно-гігієнічних вимог, допущена до використання в машинах і агрегатах переробної і харчової промисловості при контактуванні з м'ясом. За нерухомий зразок була використана серійна гратка вовчка (сталь У8А, HRC<sub>e</sub> 60) з отворами діаметром 3 мм.

Досліди проводили в середовищі м'ясного соку (рН 5,5-5,7) при питомому навантаженні 4,0 МПа і колій швидкості 1,4 м/с, що відповідає умовам роботи різального комплексу. Лінійне спрацювання зразків  $\Delta$  оцінювали вимірюванням зміни ширини пластини через рівні проміжки часу протягом 2-х годин випробувань з використанням методу штучних баз [99, 244].

Проведені дослідження показали, що спрацювання рухомого зразка і коефіцієнт тертя залежать від співвідношення товщини G сталевих і бронзових пластин (табл. 5.5). Найменше спрацювання відбулося при  $G=0,6$ , а мінімальний коефіцієнт тертя  $\mu$  був при  $G=0,8$ .

Для перевірки проявлення ефекту вибіркового переносу і результатів триботехнічних досліджень були проведені дослідження у виробничих умовах на м'ясорізальних вовчках МП-160. На спеціально сконструйованих ножах вовчків встановлювались різальні пластини з

сталі 65Г (HRC<sub>e</sub>55) завтовшки 4,5 мм, за якими закріплювались бронзові пластини завтовшки 3,5 мм (G=0,77).

Таблиця 5.5 – Залежність спрацювання зразків з сталі 65Г(Δ) і коефіцієнта тертя (μ) від співвідношення товщини бронзової і сталеві пластин (G)

G	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
Δ, мкм	18	13	9	6	10	15	25	28	30
μ	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,06	0,08	0,09	0,10

Випробування, під час яких проводили заміри лінійного спрацювання ножів Δ по ширині різальних пластин, здійснювали при переробленні яловичини I і II категорії. Температура вихідної сировини становила 2...4 °С. До складу різального комплекту вовчка, крім двох експериментальних ножів, входили серійні вхідна, проміжна і вихідна ґратки. Діаметр отворів вихідної ґратки дорівнював 3 мм. Для порівняння випробовувались також складені ножі без бронзових антифрикційних пластин.

Характер зношування різальних елементів ножів при використанні бронзових пластин не змінювався і найбільш інтенсивне спрацювання спостерігалось на периферії ножа. Встановлення бронзових пластин, завдяки прояву ефекту вибіркового переносу, забезпечувало (табл. 5.6), понад двохразове підвищення наробітку вовчків до допустимого зносу ножів (0,2...0,25 мм).

Таблиця 5.6 – Залежність зносу ножів (Δ) від об'єму переробленої сировини (Q)

Q, м <sup>3</sup>	Зношування ножів Δ, мм			
	Серійні ножі		Експериментальні ножі	
	на периферії леза	на середині леза	на периферії леза	на середині леза
6	0,12	0,06	0,06	0,02
12	0,17	0,09	0,09	0,03
18	0,21	0,16	0,13	0,06
24	0,23	0,18	0,15	0,09
30	-	-	0,17	0,12
36	-	-	0,19	0,14

Таким чином, проведені дослідження ножів з антифрикційними вставками підтвердили реальну перспективу значного підвищення

довговічності деталей різального комплексу м'ясорізальних вовчків завдяки використанню ефекту вибіркового переносу.

### **5.5.3. Формування сервовитних захисних плівок з використанням плазмового струменя**

Способи зниження спрацювання деталей і втрат потужності на тертя при використанні антифрикційних матеріалів у м'ясопереробленні не набули значного поширення. Відомо про використання антифрикційної пластмаси з підкладкою у вигляді металевого диска для виготовлення перфорованої ґратки [68, 241, 2]. Раціональне також використання м'ясорізальних ґраток з бронзовими вставками або ножів, на яких позаду різальних лез розміщені вставки з мідних сплавів [99, 241]. Але такі засоби підвищення зносостійкості або не технологічні, або мають ряд інших вад. Так, випробування нами хрестоподібних ножів вовчків з бронзовими вставками показало, що леза ножів у процесі роботи можуть піддаватися руйнуванню від утомленості, а в ґратках з бронзовими вставками виникають тріщини і, під тиском фаршу, вони руйнуються. Всі ці негаразди проявляються при одночасному зменшенні коефіцієнта тертя та підвищенні зносостійкості. Тому було прийнято рішення формувати бронзові антифрикційні вставки плазмовим напиленням [238, 239].

Перед напиленням у ґратці (рис. 5.23) свердлилися сфероподібні заглиблення, а потім, за допомогою плазми і спеціального екрана, вони заповнювалися бронзою, яка допущена санітарними службами до контакту з м'ясом (БрАЖ-9-4). Технологічний процес плазмового напилення включав такі основні операції: підготовку порошоків, налагодження обладнання, механічне оброблення та знежирювання деталей, напилення бронзового порошку на плазмовому напівавтоматі 15ВБ02 [239].

Отвори в ґратці можуть мати різний діаметр, в залежності від потрібного технологічного призначення м'ясного фаршу. А заглиблення в решітці (допоміжні отвори), які заповнюються бронзою, мають розміщуватися між основними отворами на концентричних колах так, щоб радіус кожного наступного кола перевищував радіус попереднього на величину радіуса допоміжного отвору (рис. 5.24).

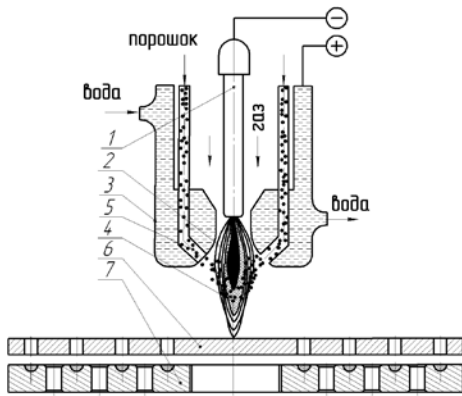


Рис. 5.23 – Схема плазмового наплення м'ясоподрібнювальної гратки: 1 – електрод; 2 – електрична дуга; 3 – сопло; 4 – плазмовий струмінь; 5 – транспортер бронзи; 6 – екран; 7 – гратка

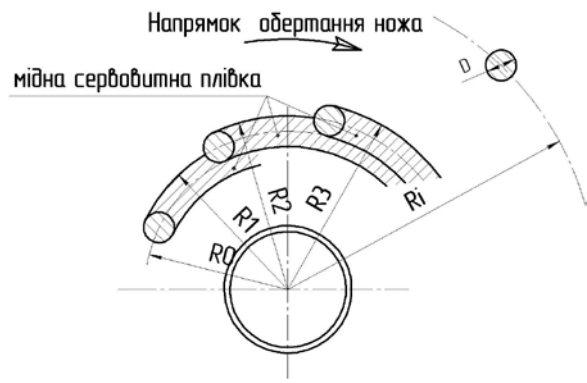


Рис. 5.24 – Схема розміщення напилених плазмою вставок на гратці вовчка утвореної сервовитної мідної плівки ( $n \geq 1$ ) і залежить від умов роботи різального комплексу та характеристик технологічного середовища.

Кількість і діаметр напилених плазмою антифрикційних вставок можуть бути різними, але на концентричному колі  $i$ -го радіуса має бути хоча б одна вставка для збереження безперервності утвореної мідної сервовитної плівки на поверхні гратки.

Радіус кожного концентричного кола може вибиратися із співвідношення

$$R_i = R_{i-1} + D_B/n, \quad (5.30)$$

де  $R_i$  – радіус першого кола, на якому розміщена  $i$ -а вставка;  $R_{i-1}$  – радіус найближчого меншого кола, на якому розміщена вставка  $i - 1$ ;  $D_B$  – діаметр антифрикційної мідної вставки;  $n$  – коефіцієнт, що враховує нерозривність

Максимальна кількість вставок на  $i$ -у колі обмежена межею міцності матеріалу гратки.

Запропонований спосіб дає можливість підвищити ресурс гратки до перезагострення з 7...8 до 15...20 год, а зносостійкість ножів із сталі 65Г у разі роботи з напиленими гратками зростає на 70% порівняно з ножами, що працюють у парі з серійними гратками із сталі У8, і на 30%, порівняно з ножами з бронзовими вставками (табл. 5.7).

Ефективність застосування сучасних технологій конструювання, виготовлення, загострення інструментів та використання граток, напилених плазмою, визначається скороченням потреб м'ясопереробного підприємства в запасних ножах і гратках, завдяки

підвищенню довговічності різального комплексу, зменшенню енергетичних затрат на перероблення м'ясопродуктів внаслідок зниження коефіцієнта тертя і покращення різальної здатності м'ясоподрібнювального комплексу, що радикально впливає на якість м'ясопродуктів.

Таблиця 5.7 – Середнє лінійне спрацювання різальних лез м'ясоподрібнювальних ножів вовчків

Маса переробленої яловичини 1-ї та 2-ї категорій, т	Знос ножів із сталі 65Г, мм		
	без напилення	з антифрикційною пластиною	в умовах контакту з напиленою плазмою решіткою
10	0,110	0,025	0,010
20	0,175	0,065	0,040
30	0,210	0,085	0,065
40	0,270	0,125	0,095

#### 5.5.4. Механізм утворення і захисної дії сервовитних плівок

М'ясний сік діє при терті як слабка кислота. Атоми легуючих елементів бронзи (залізо, алюміній і ін.) переходять у мастильний матеріал, у результаті поверхня бронзи збагачується атомами міді. Після відходу атомів легуючих елементів з поверхні бронзи деформація при терті викликає дифузійний приплив нових атомів легуючих елементів до поверхні, які потім переміщуються у сік. Таким чином, шар бронзи, який деформується при терті, звільняється від легуючих елементів і стає в основному мідним. У ньому утворюється велика кількість вакансій, частина з них нігілює, утворюючи пори, які заповнюються молекулами соку.

Сік є відновником окису і закису міді, тому поверхня тертя мідної плівки вільна від оксидних плівок, вона дуже активна і здатна до схоплювання зі сталеву поверхню, тому що має вільні зв'язки. В результаті сталева поверхня поступово покривається тонким шаром міді. Оскільки шар міді, який утвориться на бронзовій поверхні, тоншає внаслідок його переносу на сталеву поверхню, то відбувається подальше розчинення бронзової поверхні. Цей процес продовжується доти, поки на обох поверхнях, сталевій і бронзовій, не утвориться шар міді товщиною 1...2 мкм (див. рис. 5.24).

Після того як мідна плівка покриє бронзову і сталеву поверхні, молекули соку вже не зможуть взаємодіяти з бронзою і «витягати» атоми

легуючих елементів, процес розчинення бронзи припиняється, і настає сталий режим ВП.

Сік при терті руйнує оксидну плівку на сталевій поверхні (є відновником, як і для міді), це забезпечує високу міцність зчеплення мідної плівки зі сталеву поверхню. В результаті остання покривається мідною плівкою, і пара тертя сталь - бронза стає парою мідь - мідь.

Структуру плівки досліджували різними методами [225] (додаток Ю.2). Застосовували електронну мікроскопію, яка дозволила виявити мікропористість плівки. Визначали параметр ґратки плівки, робили радіоізотопний аналіз та застосовували метод оже-спектроскопії. Вивчали структуру плівки методом «ковзаю чого пучка» рентгенівських променів.

Дослідження показали, що при ВП у верхньому шарі немає скупчення дислокацій, які призводять до руйнування поверхні. Сам матеріал плівки знаходиться в стані, подібному розплавленому. Тертя бронзи по сталі в умовах ВП можна уподібнити ковзанню тіла по льоду, при якому низький коефіцієнт тертя замість води забезпечує плівка «розплавленого» металу.

Водневе зношування за масштабами прояву займає одне з перших місць серед усіх видів зношування. Водень при подрібнюванні м'яса утворюється у процесі тертя як продукт розкладання водяних парів, насичених і ненасичених жирних кислот, з'єднувальних та інших тканин м'ясної сировини. Водень легко дифундує в глибину металу, сприяє утворенню зародків тріщин в результаті молізації в дефектах ґратки, і в кінцевому рахунку, викликає руйнування поверхневого шару деталей. Водневе зношування, як правило, супроводжує корозійно-механічне й абразивне зношування робочих органів м'ясоподрібнювальних машин.

Оскільки вивчення водневого зношування тільки почалося, методи захисту від нього для багатьох деталей ще не розроблені, і поки найбільш ефективним захистом є ВП. Утворена при ВП мідна плівка знижує навантаження до рівнів, при яких утворення водню практично не відбувається; крім того, мідна плівка є добрим захистом від проникнення водню в сталь.

Необхідно відмітити, що крім розглянутих факторів особлива будова і специфічні властивості сервовитної плівки (мала густина дислокацій, велика кількість вакансій) також забезпечують у сукупності зменшення сил тертя та інтенсивність зношування.



## **5.6. Обґрунтування вибору зносостійких сталей для різальних вузлів шнекових м'ясоподрібнювальних машин (вовчків)**

В роботі [217] нами було встановлено відсутність єдиної концепції, обґрунтовуючої використання тих чи інших марок сталей для виготовлення м'ясоподрібнювальних ножів. Тільки на м'ясопереробних підприємствах м. Києва застосовують різальний інструмент з 11-ти марок сталей. За класами ці сталі можна розділити на групи: вуглецеві, низьколеговані, хромисті і швидкоріжучі. Тому для дослідження зносостійкості були вибрані зразки із сталей У10А, 9ХС, ХВГ, Х6ВФ, Х12Ф1, 55Х6В3СМФ, Х12М, Р6М5, Р18Ф2, які є представниками основних груп інструментальних сталей.

Важливо правильно вибрати сталі для виготовлення інструменту, яким притаманна висока зносостійкість. Вона може бути різною не лише для різних сталей, але і для їх поєднання у парах «рухомий ніж – гратка» при роботі у м'ясному середовищі, яке сприяє встановленню відповідних електродних потенціалів поверхонь тертя та провокує корозійно-механічне зношування інструментів [218].

В сучасних умовах стійкість різальних інструментів для подрібнення м'яса підвищують хіміко-термічною обробкою [241], електроіскровим легуванням [261], імпульсно-плазмовим азотуванням [242], обробкою лазером [243] та іншими методами. Важливими є також конструктивна досконалість і технологія виготовлення різальних інструментів – термообробка, шліфування і заточка, від яких прямо залежить зносостійкість [244, 245].

Разом з тим, застосовувати раціональні конструкції різальних інструментів, сучасні методи зміцнення і технології виготовлення доцільно лише тоді, коли достеменно відомі триботехнічні характеристики, притаманні тим чи іншим сталям в процесі зношування у м'ясних середовищах.

Мета цього підрозділу – дослідити зносостійкість інструментальних сталей з різним ступеням легування і вибрати найбільш придатні для застосування в різальних вузлах шнекових м'ясоподрібнювальних машин.

Випробовувались на зношування зразки із вуглецевої (У10А), низьколегованих (ХВГ, 9ХС), середньо- і високохромистих (Х6ВФ, 55Х6В3СМФ, Х12М, Х12Ф1) та швидкоріжучих (Р6М5, Р18Ф2) сталей у модельному розчині, що складався з м'ясного соку, відпресованого з одного зразка м'язової тканини телятини 2-ї категорії після завершення

автолізу (рН5,5), жиру і води у співвідношенні 4:1:5 з додаванням 1% кісткової фракції [245].

Тестування на зношування зразків з інструментальних сталей розміром 30x15x5 мм (рис. 5.25) проводилось в лабораторних умовах за схемою «клин-диск» (рис. 5.26) на машині тертя М-22П конструкції ІПМ НАН України [246].

Зразки кріпили в утримувачі таким чином, щоб робоча площа була нахилена до дотичної циліндричного диска під кутом  $2,5^\circ$ . Випробовування проводили при швидкості ковзання 2 м/с і навантаженні  $P=0,7$  кН. Такий режим наближено відтворює умови тертя інструментів у шнекових м'ясоподрібнювальних машинах (вовчках).

Перед випробовуванням зразки загострювали (шліфували) абразивними кругами. В лабораторії досліджували робочі поверхні лез на наявність зазублин на ріжучій крайці, припалень і вм'ятин (інструментальний мікроскоп МИМ-8), визначали радіус округлення леза (мікроскоп МИС-11 з приставкою РА-4). На мікротвердомірі ПМТ-3 оцінювали мікротвердість структурних складових сталей, а з використанням електронного мікроскопа УЕМВ-100 досліджували їх субмікроструктуру.

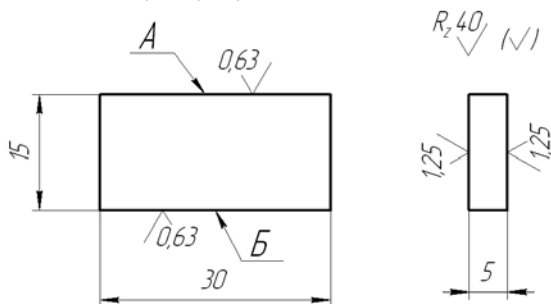


Рис. 5.25 – Зразок для випробування на зносостійкість за схемою «клин-диск»

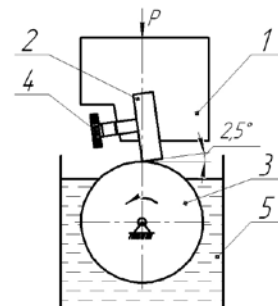


Рис. 5.26 – Схема установки пари тертя «клин-диск»: 1 – змінний утримувач; 2 – зразок; 3 – контртіло; 4 – гвинт; 5 – камера з модельним розчином

Для фінішної обробки тонких ножів і лез сталевих різців найчастіше використовують білий електрокорунд. В останні десятиліття стали більш широко використовувати круги з ельбору, який за твердістю близький до алмазу, але більш теплостійкий. Не конкуруючи з алмазом при обробці твердих сплавів і крихких матеріалів, ельбор показав високу продуктивність при обробці вуглецевих та швидкоріжучих сталей [247, 248].

Для заточки ріжучих інструментів, яка забезпечує отримання шорсткості граней  $Ra = 0,16 - 0,32$  мкм, найбільш часто використовуються круги з зернистістю: для електрокорундових кругів -40; для алмазних - 60/63 і для ельборових -10 [248]. Такі круги і були прийняті нами в експериментах.

Заточувались загартовані і шліфовані зразки перетином  $30 \times 15 \times 5$  мм з метою раціонального вибору характеристик круга, оптимальних режимів заточки. В лабораторних дослідженнях зразків установлювались шорсткість граней, ріжучих лез, наявність зазублин, ум'ятин, заокруглення різального леза, наявність припалень і тріщин на гранях.

Встановлено, що мінімальний радіус заокруглення утворюється при заточці алмазним кругом, максимальний - при заточці кругом із ельбору, а проміжне його значення - при заточці кругом з електрокорунду білого. Радіус скруглення різального леза залежить від кута загострення зразків. При куті загострення  $50^\circ$  він знаходиться в межах 1,5-3 мкм. Зі збільшенням кута загострення від  $50$  до  $90^\circ$  при заточці кругом з ельбору радіус заокруглення зростає в 2-3 рази. Збільшення глибини шліфування також призводить до його збільшення. При заточці периферією круга (верстат ЗГ711) радіус заокруглення більший, ніж при заточці торцем круга (верстат 3672). При збільшенні глибини шліфування від 0,01 до 0,03 мм /подв.хід радіус заокруглення зростає всього на 9...15%. Для ножів з вуглецевих, низьколегованих і швидкоріжучих сталей він менший, ніж для ножів з середньохромистих і високохромистих сталей.

Відхилення від прямолінійності ріжучих лез в усіх випадках не перевищувало 0,005 мм. Найменші відхилення були отримані при заточці алмазними кругами через їх високу різальну здатність [248].

Аналіз впливу схеми шліфування і характеристик шліфувальних кругів на утворення ум'ятин і зазублин на лезах показав більшу імовірність їх утворення при обробці торцем круга і у випадку використання ельборових кругів і кругів з електрокорунду білого [247, 248].

Таким чином, використовуючи круги із синтетичного алмазу, непрямолінійність, шорсткість і радіус заокруглення різального леза можна отримати мінімальними, але, досліді показали, що зразки, оброблені синтетичним алмазом і електрокорундом, мають на задній грані значні тріщини і припалення (рис. 5.27).

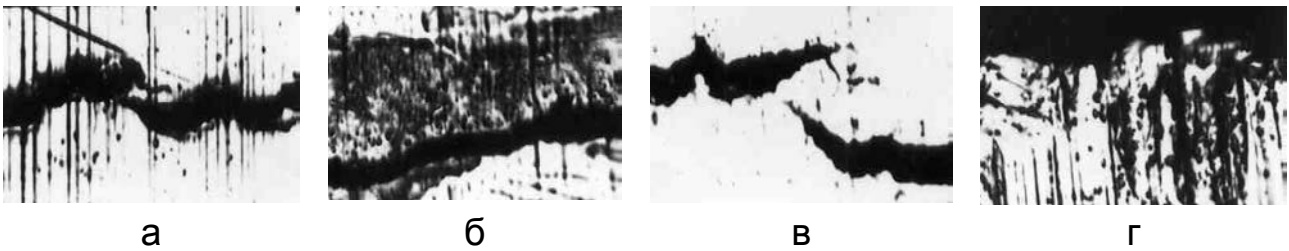


Рис. 5.27 – Тріщини і припалення робочих граней при шліфуванні кругом АСР80/63 Б1 ·100% АПП 200×10×3×32 зразків із сталей: а – У10А, б – 9ХС, в – Х12Ф1, г – Р6М5, ×500

В результаті дослідження мікротвердості прилезових ділянок зразків за методикою, викладеною в [247], при обробці сталей електрокорундовим і алмазним кругами на режимах  $V_{кр} = 35$  м/с;  $S_n = 12$  м/хв,  $t = 0,02$  мм/подв.хід встановлено, що в досліджених зразках можуть бути виділені такі зони: зовнішня - шар вторинного загартування з підвищеною мікротвердістю, прилегла до неї - шар вторинного відпуску з пониженою мікротвердістю і, потім, основний метал.

Поблизу різального леза мікротвердість нестабільна через взаємовплив процесів вторинного загартування і відпуску. У ножів з вуглецевих і середньохромистих сталей зона зміненого ("зіпсованого") матеріалу при заточці електродкорундовим і алмазним кругом поширюється на глибину 30-40 мкм, а при заточці ельборовим кругом - на глибину 20-30 мкм від різальної крайки. У ножів з середньохромистих, високохромистих і швидкоріжучих сталей зона вихідного матеріалу знаходиться на відстані 20-30 мкм від різальної крайки при їх заточці алмазними і електрокорундовими кругами і 5-15 мкм – при заточці кругами з ельбору (рис. 5.28). Таким чином заточка ельбором є більш перспективною.

Електронні мікрофотографії, виконані на мікроскопі УЕМВ-100 (рис. 5.29), дозволяють стверджувати, що в зоні вихідного матеріалу ножів із сталі ХВГ більша густина карбідів типу  $Fe_3C$  з твердістю 860...1250 HV, а також карбідів типу  $FeW_3C$  і  $Cr_{23}C_6$  з твердістю 1000-1100 HV. В зоні вторинного загартування, через перехід карбідів у твердий розчин, їх щільність дещо зменшується, а твердість зростає. Підвищена щільність карбідів і недостатня їх твердість може призвести до низької стійкості ножів із сталі ХВГ. Менша щільність і величина карбідів у середньохромистих сталях (Х6ВФ і 55Х6В3СМФ), а також більш висока їх твердість можуть забезпечити вищу стійкість різальних інструментів.

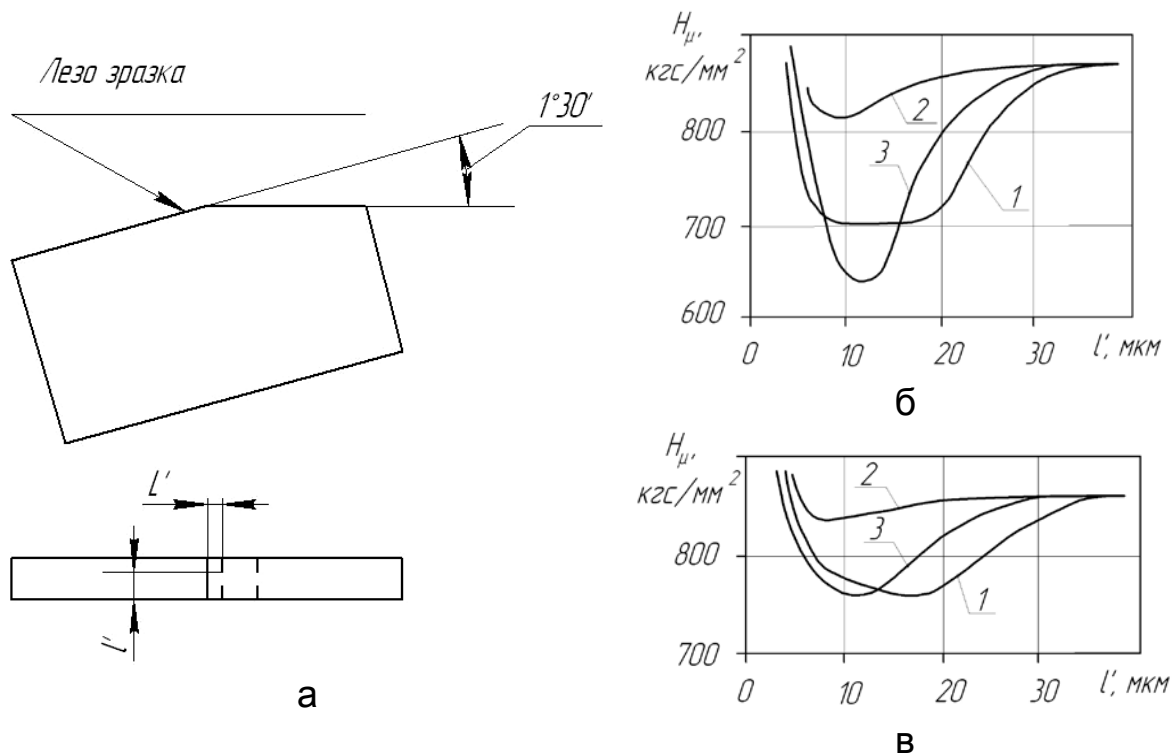


Рис. 5.28 – Розташування площини шліфа і відбитків індентора (а) при вимірюванні мікротвердості ножів із сталі Р6М5 та характер зміни останньої при віддаленні від передньої грані ножа  $l$  і постійній відстані від задньої грані  $L=10$  мкм (б) та  $L=20$  мкм (в) при загостренні кругами: 1 – електрокорундовим, 2 – ельборовим, 3 – алмазним

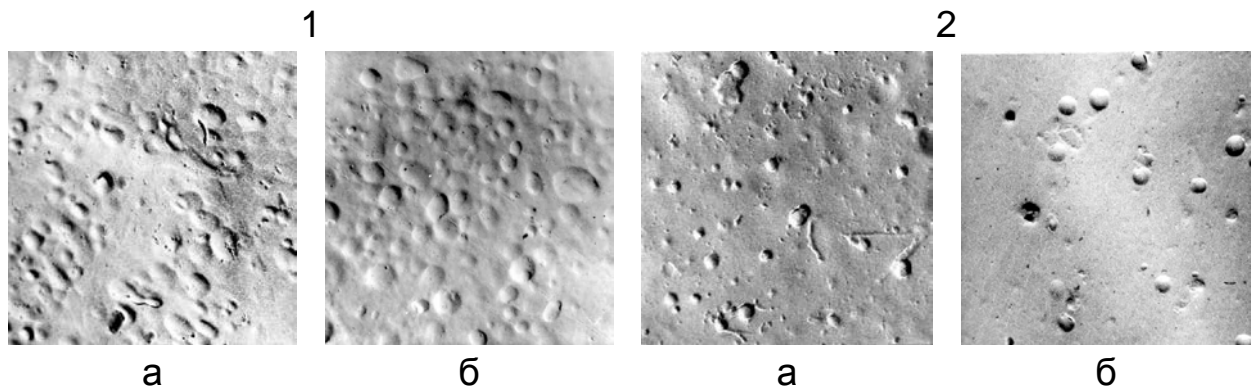


Рис. 5.29 – Зона вихідного металу (а) і вторинного загартування (б) зразків із сталей ХВГ (1) і 55Х6В3СМФ (2) після шліфування кругом Л10Б156 100% ЛЧК 125×10×3×32, ×5000

З наведеного аналізу способів фінішної обробки ріжучих інструментів і використавши експериментальний матеріал можна зробити наступні висновки: 1) найбільш якісна заточка забезпечується периферією круга при застосуванні ельбору; 2) для заточки ножів із сталей У10А;ХВГ; 9ХС; Х6ВФ; 55Х6В3СМФ; Х12М; Х12Ф1; Р6М5; Р18Ф2

треба використовувати режими  $V_{кр} = 35$  м/с;  $S_{позд} = 12-16$  м/хв ;  $t = 0,01$  мм/подв.хід з наступним 2-3 – кратним виходжуванням і охолодженням 1,5 -2% емульсією з витратою 22-40 л/хв [248, 235].

Заточені ельбором на вибраних режимах зразки піддалися випробуванню на зношування у модельному м'ясному середовищі за схемою «клин-диск» (див. рис. 5.26). Раніше нами було доведено [235], що м'ясорізальні ножі виходять з ладу при їх спрацюванні до утворення фаски зносу 0,3 мм. З урахуванням того, що кут загострення зразків був  $\delta = 90^\circ$ , то така фаска виникала при лінійному зносі зразка у напрямку бісектриси кута загострення близько  $A_{\mu} = 0,15$  мм. Тому, при такому лінійному спрацюванні випробування зразків на зносостійкість припинялись.

На гістограмі (рис. 5.30) показана стійкість зразків при терті з контртілами з різних сталей з номенклатури тих, що були вибрані для досліджень (пройдений шлях тертя до досягнення зносу  $A_{\mu} = 0,15$  мм).

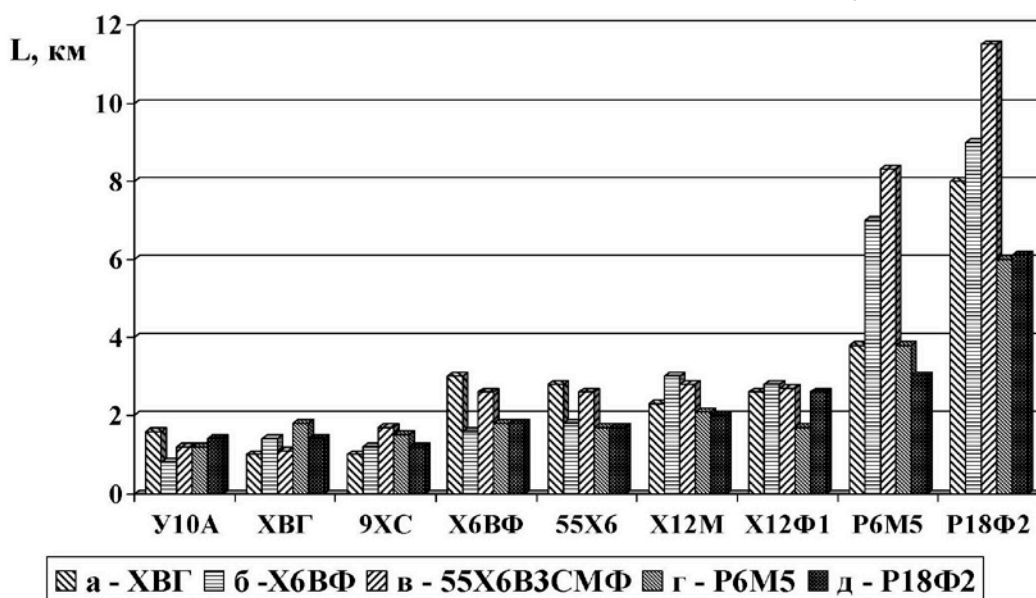


Рис. 5.30 – Шлях, пройдений різальними крайками зразків з випробуваних сталей, до утворення фаски зносу  $f = 0,3$  мм при терті в парі з контртілами із сталей: а – ХВГ, б – Х6ВФ, в – 55Х6В3СМФ, г – Р6М5, д – Р18Ф2

Випробовувані сталі для м'ясорізальних інструментів у порядку зростання зносостійкості можна поділити на три групи: 1) низької зносостійкості – вуглецеві та малолеговані; 2) середньої зносостійкості – середньо- та високохромисті, зносостійкість яких в 1,5-2 рази вища від зносостійкості сталей першої групи; 3) високої зносостійкості – швидкоріжучі, зносостійкість яких в 5-10 разів вища за зносостійкість сталей першої групи.

Результати лабораторних випробувань були перевірені у виробничих умовах Київського експериментального м'ясопереробного заводу «Дарницький» на вихідних різальних інструментах шнекових м'ясоподрібнювальних машин (вовчків) типу МП-160 (рис. 5.31).

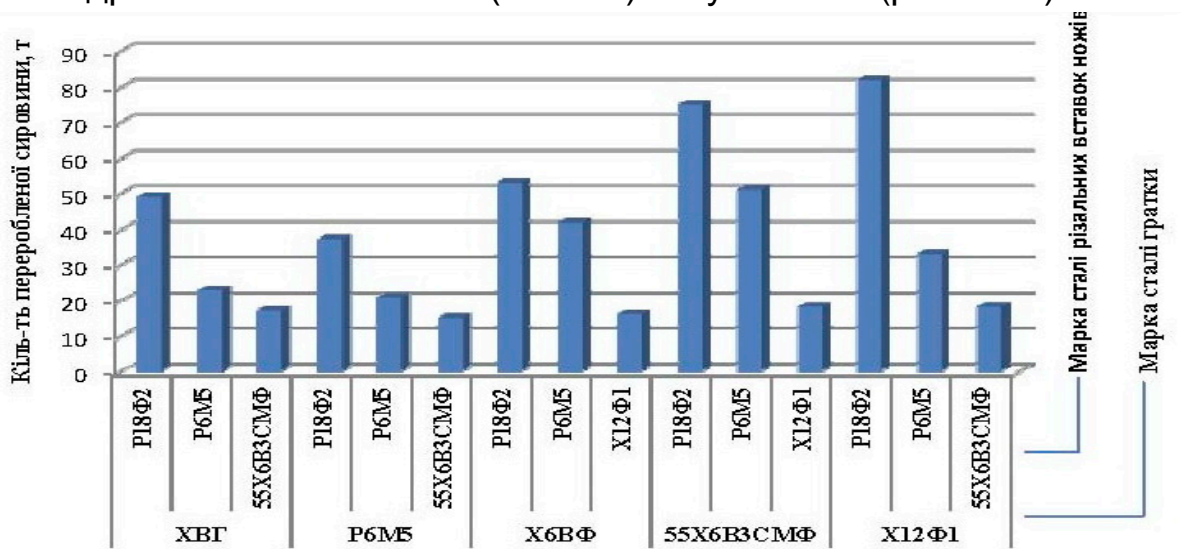


Рис. 5.31 – Результати випробувань на зношування різальних комплектів шнекових м'ясоподрібнювальних машин (вовчків) при подрібненні дефростованої яловичини першої і другої категорії

Випробовування показали досить задовільну кореляцію з результатами лабораторного тестування сталей. Очевидно, що найбільшу зносостійкість мають рухомі ножі з швидкоріжучих сталей при їх застосуванні у парі з гратками з сталей 55Х6В3СМФ та Х12Ф1, які можуть подрібнювати від 50 до 80 т яловичини.

### Висновки до розділу 5

1. Механізм взаємодії ножів шнекових подрібнювальних машин з м'ясною сировиною характеризується специфічною дією сил зі сторони продукту на передні і задні поверхні інструментів та їх різальні крайки. Зі збільшенням кута заточки сила стискання леза зростає, а обтискування зменшується.

2. Знос ножів вовчків супроводжується збільшенням товщини різального крайка і утворенням зношеної площадки  $l_n$  на передній поверхні, а тому збільшення їх довговічності можливе лише завдяки застосуванню зміцнюючих покриттів для передніх поверхонь лез.

3. Застосування запропонованої схеми затуплення і відновлення лез ножів вовчків дозволяє визначити потребу виробництв у різальних інструментах.

4. В кислому м'ясному соку висока локальна концентрація дислокацій призводить до крихкого руйнування м'ясоподрібнювальних

інструментів. М'ясний сік з лужною реакцією викликає адсорбційне пластифікування, а при деформуванні – диспергування їх робочих поверхонь. У кислих м'ясних середовищах можуть добре працювати деталі, зокрема, подрібнювальні інструменти з достатнім рівнем пластичності, а у лужних – з достатнім рівнем твердості.

5. В кислому середовищі перехід від плоского до об'ємно-напруженого стану та збільшення рівня стискаючих напружень інтенсифікує крихке руйнування поверхонь тертя і тріщиноутворення на них. У лужному середовищі м'ясного соку на субмікроструктуру поверхонь твердих тіл впливає не характер, а величина стискаючих напружень.

6. Перспективними та ефективними для зміцнення м'ясоподрібнювальних інструментів можуть бути зносостійкі евтектичні покриття та покриття дискретного типу, які дозволяють забезпечити поєднання необхідної твердості і пластичності, що дозволяє отримати задовільну зносостійкість інструментів при переробці м'ясної сировини з різним терміном автолізу.

7. Анодна поляризація у кислому м'ясному соку знижує пластичні властивості твердих тіл, а в лужному соку зменшує вірогідність крихкого руйнування. Катодна поляризація в обох соках знижує поверхневу енергію тіл, викликаючи пластифікування поверхонь тертя.

8. Регулювати службові характеристики деталей м'ясоподрібнювальних машин і різальних інструментів для подрібнення м'ясної сировини з різною глибиною автолізу можна за рахунок їх електричного зарядження, або підбором захисних покриттів, що мають необхідний рівень твердості і пластичності та відповідні електрохімічні характеристики.

9. Доцільним для підвищення зносостійкості вузлів тертя м'ясоподрібнювальних машин є застосування ефекту вибіркового переносу.

10. Найбільш перспективними для виготовлення інструментів шнекових подрібнювальних машин є швидкоріжучі, а також середньо- і високохромисті сталі.

11. Найвищої зносостійкості подрібнювальних інструментів можна досягти поєднуючи середнє і високе легування сталей з раціональними режимами загострювання ножів кругами з кубічного нітриду бору.



## **РОЗДІЛ 6. СИНТЕЗ ЕФЕКТИВНИХ КОНСТРУКЦІЙ, ПРОГНОЗУВАННЯ І ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ М'ЯСОПОДРІБНЮВАЛЬНИХ МАШИН**

### **6.1. Удосконалення конструкцій шнекових подрібнювачів**

Основною машиною в технологічних лініях з виробництва ковбас та напівфабрикатів є м'ясорубка або її більш потужна модифікація - вовчок.

Якість одержуваної продукції безпосередньо залежить від того, наскільки дрібно і акуратно вовчок наріже кускове м'ясо, причому незадовільну роботу вовчка (розчавлене м'ясо, погано подрібнені жилки) не вдається виправити ні на кутері, ні на інших інших подрібнювачах. Такий брак, як “жуване” м'ясо та “волокнистість” на розрізі, обумовлений саме поганою роботою вовчка.

Принцип подрібнення кускового м'яса, який використовується у вовчках, незмінний вже протягом багатьох років: м'ясо в приймальному бункері захоплюється шнеком або шнеками і, через корпус з внутрішніми ребрами, подається до різального інструменту, який представляє собою комплект нерухомих ґраток, переважно з трьох штук, і двох рухомих ножів, що контактують з ґратками. Якість подрібнення у різних вовчках, незважаючи на однаковий спосіб подрібнення і уявну простоту конструкції, зовсім різна. На неї впливають незначні конструктивні особливості, притаманні кожній з конструкцій, а також ступінь зносу різальних інструментів і корпуса зі шнеком.

Для початку проведемо аналіз робочого шнека. По довжині будь-який робочий шнек можна умовно розділити на три зони: перша - захоплення шматків м'яса з бункера; друга - транспортування з одночасним підпресовуванням м'яса в робочому корпусі; третя - контакту кінця шнека з приймальною ґраткою, що включає опорний палець для підтримки шнека і, як правило, передачі крутного моменту ножем.

У правильно сконструйованих вовчках у першій зоні (200-500 мм) - всього один або півтора витка шнека - здійснюється захоплення шматків м'яса в нижній частині бункера і передача їх в другу зону. На такому принципі виконані шнеки вовчків фірм: «УралМясоМаш», «Zeydelmann», «KG», «KS» та ряду інших провідних виробників. У деяких моделей вовчків фірми «Zeydelmann» ця частина шнека виконує ще й функцію відламування (відривання) частини від заморожених м'ясних блоків. Неправильне конструювання цієї частини шнека призводить до необхідності встановлювати для подавання сировини ще й другий шнек (паралельно основному – наприклад, у вовчків МП -160; або перпендикулярно до основного - такі вовчки називаються «кутовими»).

Шнек вовчків «УралМясоМаш» має ще одну додаткову зону (яка розташована перед першою) - вакуумування. Роль шнека в даному випадку - відігнати шматочки м'яса від зони відбору вакууму і передати їх у першу зону.

У другій зоні у раціонально сконструйованих вовчках розташовані 3,5-5 витків шнека з перемінним кроком, що поступово зменшується у бік вивантаження. Ця частина шнека повністю розташована в робочому корпусі. Роль цієї частини шнека - передати шматки м'яса з першої зони в третю, поступово їх підпресовуючи до заданого тиску. Одночасно ця частина шнека повинна мінімально впливати на шматки м'яса - не «жувати» і не «перетирати» їх. Крок кожного з витків, розташованих у другій зоні, має бути ретельно розрахованим з урахуванням кроку спіральної нарізки всередині корпусу.

Третя зона шнека є тільки у деяких конструкцій вовчків (наприклад у вовчків СПКБ «УралМясоМаш»). Ця зона представляє собою круто відігнуту частину останнього витка з кутом приблизно 100-110°С. Ця частина шнека виконує функцію ножа, відрізаючи шматки м'яса, що потрапляють в отвори приймальної ґратки.

Наступним основним вузлом вовчка є його корпус. Завантажувальне вікно корпусу повинно бути зміщеним відносно вертикальної вісі у бік обертання шнека таким чином, щоб опорна стінка бункера була розташована по дотичній до отвору корпусу. Довжина вікна корпусу повинна дорівнювати довжині першої зони шнека. Внутрішня поверхня корпусу повинна бути виконана з 5-10-заходною трапецеїдальною чи прямокутною нарізкою, а крок різьби точно розраховується у відповідності з кроком шнека. Глибина витків різьби повинна бути не меншою 3 і не більшою 8 мм, що забезпечує надійну подачу сировини до різального інструменту без її провертання. Робочий зазор між шнеком і корпусом в будь-якому місці не повинен перевищувати 2 мм, тому що в іншому випадку спостерігається «жування» м'яса і падіння продуктивності вовчка. Корпус конструктивно може бути виконаний роз'ємним або суцільним. Провідні виробники віддають перевагу суцільним корпусам, які забезпечують більш точне складання механізму подачі сировини.

Тепер зупинимося на головних деталях будь-якого вовчка - різальних інструментах. Розглянемо різальний інструмент, призначений для подрібнення дефростованого м'яса без включень кісток і великих сухожиль. Як правило, комплект різального інструменту складається з

трьох граток і двох ножів або з двох граток і одного ножа (комплектність залежить від необхідного ступеня подрібнення).

Бувають і інші конструкції вовчків, запропоновані винахідниками, наприклад, застосовують чотири односторонніх ножі і три гратки. Зазвичай ножі притискаються до граток гайкою, причому зусилля затягування як було показано вище, кардинально впливає на якість подрібнення. На наш погляд, раціональне рішення знайдено і застосовано в конструкціях вовчків СПКБ «УралМясоМаш», у яких зусилля притискання ножів до до граток забезпечується точно розрахованим тиском м'яса, який створюється робочим шнеком. Якщо гратки, як правило, у всіх вовчків однакові (виняток становлять жилувальні) і розрізняються лише кількістю і діаметром отворів, то ножі бувають різних конструкцій. Найбільш часто встановлюють ножі з двохстороннім заточуванням, що утворює чотири радіальних леза. Бувають також ножі з трьома лезами, а у деяких леза виконані у вигляді гвинтових ліній або у вигляді ялинки. Установка тих чи інших видів ножів визначається технологіями і залежить від виду та якості м'яса.

Машини для подрібнення замороженого м'яса (з температурою до - 18 °С) , хоча конструктивно і схожі на звичайні вовчки і мають з ними одну назву, але фактично є різновидом дробарок заморожених м'ясних блоків. У них, на відміну від звичайних вовчків, більш потужний привід, зовсім інший шнек, більш міцні корпус і різальні інструменти, а діаметр отворів в останній гратці не буває меншим 8 мм. Відведення жилок із замороженого м'яса неможливе. З урахуванням розглянутих можливих напрямків удосконалення шнекових подрібнювачів розроблені нові конструкції машин, які подані нижче.

## **6.2. Вовчок-кутер для подрібнення м'яса**

На розроблений новий вовчок отриманий патент на корисну модель № 69577 від 10.05.2012, бюл. № 9. Найбільш близьким до запропонованого шнекового подрібнювача (патент України №32743 У, опубл. 26.05.2008, бюл.№10) є вовчок, що містить циліндричний горизонтально встановлений корпус, на одному кінці якого встановлений приймальний бункер, а всередині - подавальний шнек, основний подрібнювальний механізм у вигляді нерухомої гратки і ножа, а також додатковий подрібнювальний механізм, з'єднаний з другим приводним валом, між якими на внутрішньому приводному валу закріплений додатковий шнек.

Недолік прототипу у тому, що при його експлуатації неможливо досягти тонкого подрібнення сировини, одночасного змішування та, при багаторазовій взаємодії подрібнювального механізму і м'яса, відбувається недопустиме перегрівання фаршу.

У запропонованій корисній моделі завдяки новій конструкції подрібнювального механізму досягається тонке подрібнення сировини, одночасне змішування, підвищується продуктивність машини і регулюється температура нагрівання м'яса. Названі удосконалення досягнуті завдяки тому, що на внутрішньому швидкісному приводному валу вовчка закріплені подрібнювальні ножі більшого діаметра, що встановлені в робочій камері з тангенційним патрубком і вихідною заслінкою для регулювання ступеня подрібнення.

На рис. 6.1 зображено вовчок для подрібнення м'яса, який працює так.

М'ясо із бункера 2, який знаходиться на корпусі вовчка 1, живильним шнеком 3, привареним до пустотілого вала 4, просувається до приймальної ґратки 5 де подрібнюється ножем 6. Після цього м'ясо подається додатковим шнеком 7 у подрібнювальну камеру 8, де додатково подрібнюється ножами 10, що закріплені на внутрішньому привідному валу 9, який обертається в протилежну сторону і має більшу частоту обертання. Подрібнювальні ножі 10 закріплені на ножовій головці в робочій камері 8 для тонкого подрібнення фаршу. Ступінь подрібнення фаршу, який виводиться через патрубок 11, регулюється заслінкою 12.

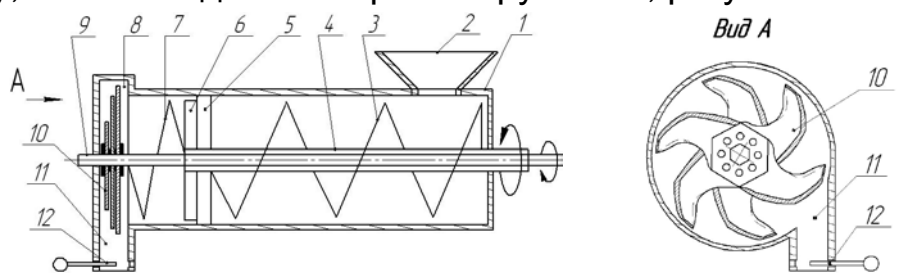


Рис. 6.1 – Конструктивна схема вовчка-кутера (на виді А бокова стінка і бункер умовно зняті)

Виконання подрібнювальних ножів більшого діаметра підвищує продуктивність вовчка, покращує рівномірність та збільшує ступінь подрібнення м'яса.

У конструкції машини застосовані кутерні ножі. Від їх правильного профілювання залежить якість фаршу і готових ковбасних виробів. Основною вимогою до будь-яких різальних інструментів є збереження гостроти різальної крайки і геометричних форм робочого органу

протягом найбільш тривалого часу, тобто інструмент повинен володіти достатньою жорсткістю і високою зносостійкістю.

Конструктивні параметри різальних робочих органів вибираються з урахуванням умов роботи, характеристик сировини, яка подрібнюється, кінематики різання, СМХ подрібнювального продукту, міцності і жорсткості ножів та ін. [42, 80]. Ці обставини зумовлюють необхідність точного розрахунку і контролю різальних інструментів для надання їм оптимальних геометричних і механічних характеристик. З урахуванням того, що процес фінішної обробки м'яса у запропонованому шнековому подрібнювачі виконується кутерними ножами, обґрунтуємо їх раціональні геометричні параметри. Процес різання здійснюється серпоподібними ножами, різальна крайка яких виконана у вигляді кривої, побудованої за певною закономірністю.

Для довільної кривої леза, описаної в полярній системі координат рівнянням  $R = R(\varphi)$ , і ножа, що обертається навколо її полюса, загальний вираз для визначення коефіцієнта ковзання буде мати вигляд:

$$K_{\beta} = R \cdot \frac{d\varphi}{dR} \quad (6.1)$$

де  $\varphi$  - полярний кут;  $R$  - радіус-вектор точки леза.

Щоб коефіцієнт ковзання не зменшувався при обертанні леза похідна  $d\varphi/dR$  повинна зменшуватися не швидше, ніж зростає радіус-вектор. Опукле лезо ножа, виконане за архімедовою спіраллю з рівнянням  $R = a \cdot \varphi$ , не забезпечує цієї вимоги. Аналізуючи спіралі Архімеда і логарифмічну [70] було виявлено, що сталого значення коефіцієнта ковзання  $K_{\beta}$  можна досягти, окресливши лезо за логарифмічною спіраллю з рівнянням

$$R = a^{\varphi}, \quad (6.2)$$

де  $R$  - радіус-вектор спіралі;  $a$  - постійний коефіцієнт;  $\varphi$  - полярний кут.

Основним недоліком ножів з лезами, виконаними за логарифмічною спіраллю, є трудність у виконанні їх заточування. Ця проблема вирішується завдяки виготовленню різальної крайки ножа у вигляді ламаної лінії з  $i$ -тою кількістю прямолінійних ділянок, але розташованих за закономірністю логарифмічної спіралі (рис. 6.2). Це дає можливість отримати постійний кут різання всередині кожної різальної крайки, що забезпечує рівномірність подрібнення продукту по всій довжині леза, підвищує якість готового продукту і ефективність роботи ножа. При

цьому доцільно, щоб довжина  $L_i$  кожної різальної крайки визначалася з виразу

$$L_i = L_{i-1} \cdot \frac{R_{i-1}}{R_i}, \quad (6.3)$$

де  $R_{i-1}$  - відстань від осі обертання ножа до середини  $i$ -ої різальної крайки;  $R_i$  - відстань від осі обертання ножа до середини наступної різальної крайки.

Використання формули (6.3) дозволяє упорядкувати геометричні розміри ножа і, тим самим, зменшити довжину кожної наступної прямолінійної ділянки різальної крайки, що знижує гідравлічний опір, а також витрати енергії на процес подрібнення. Такий захід додатково покращує якість готового продукту і підвищує ефективність роботи машини.

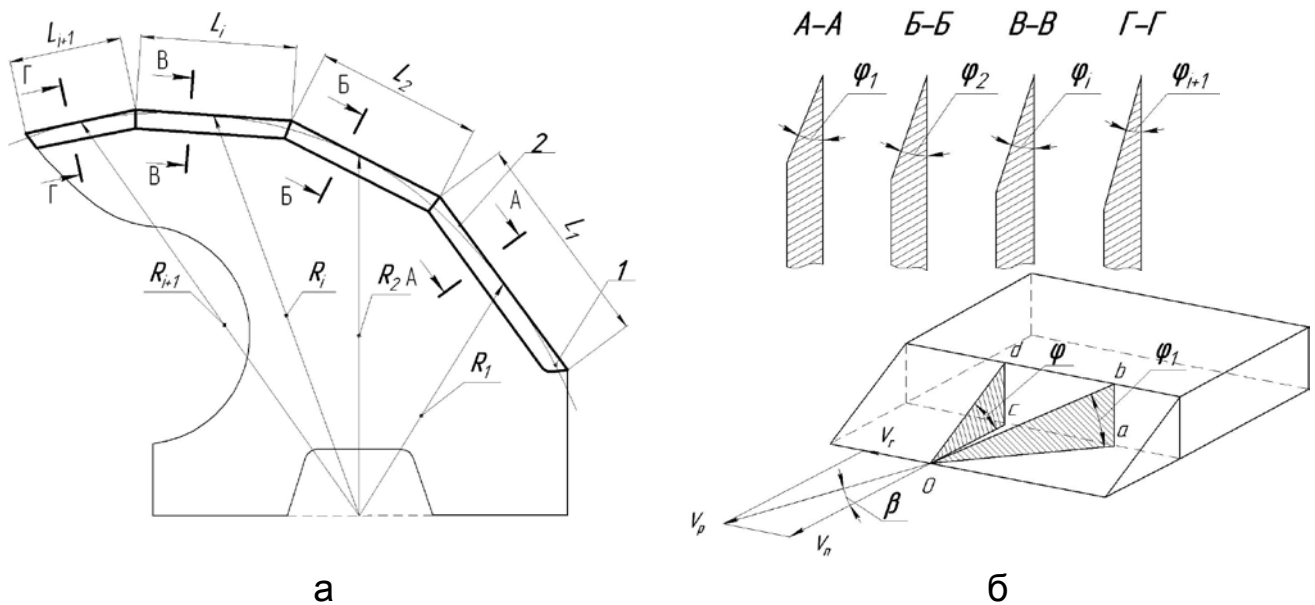


Рис. 6.2 – Схема ножа з різальною крайкою у вигляді ламаної лінії (а) та трансформація кута заточки при різанні (б): 1 – логарифмічна спіраль; 2 – різальна крайка; б – схема для визначення трансформації кута заточки

Крім того, при різанні волокнистих матеріалів необхідно, щоб тиск у зоні контакту різальної крайки і продукту не зменшувався при зростанні відстані від осі обертання, а навпаки, збільшувався. Цього можна досягнути за рахунок зменшення кута заточки леза при збільшенні відстані від осі обертання до різальної крайки, або завдяки збільшенню кута зустрічі різальної крайки з продуктом. При використанні ножа з серповидною різальною крайкою другий шлях більш практичний і забезпечується збільшенням кута зустрічі по мірі зростанні відстані від осі обертання до різальної крайки. Разом з тим, це призводить до

збільшення бічної поверхні ножа та інтенсивного підвищення температури фаршу. У той же час, використання ножів з ламаною різальною крайкою дозволяє зменшувати кут заточки леза по мірі збільшення відстані від осі обертання до різальної крайки. Легко переконатися, що в процесі різання з ковзанням кут заточки у напрямку різання змінює своє значення - зменшується залежно від кута ковзання  $\beta$ . Іншими словами, переходячи від уявлення про статичні геометричні параметри леза до уявлення про його кінематичні геометричні параметри, ми стикаємося з явищем трансформації кута заточування.

На рис. 6.2,б подано схему леза з кутом заточки  $\varphi$ , рівним  $\varphi$ . При проникненні леза в матеріал по нормалі, тобто за напрямом  $V_n$ , вказаний кут дорівнюватиме заміряному статично. У разі, коли лезо стане проникати в матеріал під деяким кутом  $\beta$  до нормалі, тобто в напрямку  $V_p$ , кут заточки повинен бути заміряним у площині, що проходить через цей напрямок  $V_p$ , тобто буде дорівнює куту  $\varphi_1$ , рівному  $\varphi_1$ . Закономірність зміни кута заточки  $\varphi_1$  в залежності від зміни кута  $\beta$  може бути визначена, виходячи з геометричних співвідношень, таким чином:

$$\operatorname{tg}\varphi_1 = \frac{ab}{ao}; \operatorname{tg}\varphi = \frac{dc}{do} = \frac{ab}{do}; \operatorname{tg}\varphi_1 \cdot ao = \operatorname{tg}\varphi \cdot do; \frac{do}{ao} = \cos\beta$$

$$\text{Виразимо } \operatorname{tg}\varphi_1 \text{ через кути } \varphi \text{ та } \beta: \operatorname{tg}\varphi_1 = \operatorname{tg}\varphi \cdot \cos\beta \quad (6.4)$$

Тому, з огляду на (6.4), для зменшення лобового опору впровадженню леза ножа в продукт, необхідно виготовляти лезо з кутом заточки, який проходять через площину  $ao$ . У результаті досліджень впливу геометричних параметрів ножа на процес різання була розроблена нова конструкція куттерного ножа (рис. 6.3), що має ряд переваг у порівнянні з ножами, що серійно випускаються:



Рис. 6.3 – Ножі з ламаною різальною крайкою у вигляді логарифмічної спіралі

забезпечується рівномірність подрібнення продукту по довжині різальної крайки; за рахунок трансформації кута заточки знижується лобовий опір впровадженню леза ножа в продукт; зменшення кута заточки леза по мірі збільшення відстані від осі обертання ножа до прямолінійної ділянки різальної крайки дозволяє зменшити її довжину, що призводить до зменшення бічної поверхні ножа і зниження темпів наростання температури подрібнюваної сировини.

### **6.3. Пристрій для подрібнення з негайним видаленням фаршу**

Вище (розділ 4) було доведено, що одними з найбільш енергетично вигідних є подрібнювальні пристрої у яких подрібнений матеріал відразу виводиться із зони різання. З огляду на це нами була запропонована корисна модель (патент КМ № 86187 від 25.12.13 р. бюл. №24) для подрібнення м'яса.

Найбільш близьким до запропонованого (А.с.СРСР SU №1609489А1, опубл. 30.11.1990, бюл. №44) є пристрій для подрібнення, що містить корпус, в якому розміщений пустотілий шнек із валом, розміщеним всередині, на якому встановлений ніж у вигляді пустотілого зрізаного конуса.

Недоліком прототипу є той, що при недостатньому тиску подрібнюваної маси всередині корпуса не забезпечується тонке подрібнювання сировини, а при багаторазовій взаємодії подрібнювального механізму і матеріалу відбувається значне нагрівання сировини і, як наслідок, її деструкція та значні витрати енергії. Завдяки запропонованій новій конструкції подрібнювального механізму досягається якісне подрібнення, змішування і зниження температури нагрівання сировини.

Пристрій для подрібнення включає горизонтально встановлений корпус, на одному кінці якого закріплений приймальний бункер, а всередині розміщений пустотілий шнек, що має конічну частину, всередині якої закріплений вал, на якому закріплений ніж у вигляді пустотілого зрізаного конуса. Згідно запропонованого рішення на кінці шнека закріплений ніж циліндричної форми, який притиснутий до внутрішньої поверхні, а на кінці вала шнека встановлений опорний конус на виході ґратки, що забезпечує якісне подрібнення сировини, зниження тиску в подрібнювальному механізмі, перемішування і зниження нагрівання подрібнюваної сировини.

На рис. 6.4 подане схематичне зображення пристрою для подрібнення, а на рис. 6.5 показаний циліндричний ніж і ґратка.



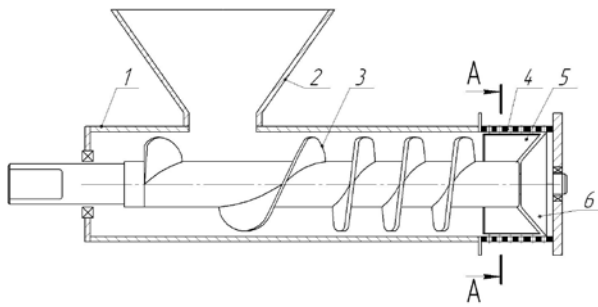


Рис. 6.4 – Пристрій для подрібнення

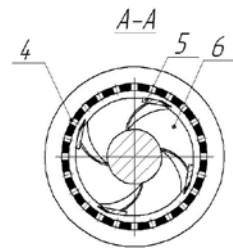


Рис. 6.5 – Циліндричний ніж і гратка

Пристрій для подрібнення включає корпус 1, бункер 2, подавальний шнек 3, гратку 4, циліндричний ніж 5, опорний конус 6. Він працює так. Сировина із бункера 2 подавальним шнеком 3 переміщується до циліндричного ножа 5, який подрібнює матеріал на гратці 4, а опорний конус 6 забезпечує розподіл сировини по поверхні гратки і підвищує рівномірність подрібнення. Завдяки новій конструкції подрібнювального механізму досягається якісне подрібнення, змішування і зниження температури нагрівання сировини.

#### 6.4. Шнековий насос-подрібнювач м'яса

До недоліків шнекових подрібнювачів м'яса треба віднести зниження коефіцієнта ефективності використання гратки, яка перекривається тілом обертового ножа. Виключити цей недолік можна, використавши запропоновану нами корисну модель (патент КМ №74995 від 26.11.12 р., бюл. № 22).

Застосування шнекового насоса-подрібнювача (А.с. 1325198, SU, опубл. 23.07.87, бюл. № 27, А.с. 1413277, SU; опубл. 30.07.88, бюл. № 28) може бути ефективним і для подрібнення м'яса. Завдяки новій конструкції подрібнювального вузла, досягається тонке і якісне подрібнення, одночасне змішування і знижується температура нагрівання фаршу.

В насосі, з метою поліпшення подрібнення волокнистих включень, розташований шнек, обладнаний додатковими кільцями подрібнювального вузла, які розміщені між концентричними кільцями основного шнека з утворенням єдиного диска. Подрібнювальні зуби виконані на відповідних поверхнях кілець у вигляді радіальних заглиблень. Основні кільця подрібнювального вузла подрібнювача м'яса встановлені з можливістю регулювання по глибині входження між додатковими концентричними кільцями подрібнювального вузла, що

забезпечує інтенсивне подрібнення м'яса гострими різальними крайками концентричних кілець.

На рис. 6.6 приведено схематичне зображення загального вигляду подрібнювача м'яса та подрібнювальні кільця з різальними крайками. Подрібнювач включає корпус 1, бункер 2, подавальний шнек 3, приводний вал 4, додаткові концентричні кільця 5, подрібнювальний вузол 6, подрібнювальне кільце 7.

Подрібнювач м'яса працює так. М'ясо з бункера 2 подавальним шнеком 3 просувається до подрібнювального вузла 6. При створенні шнеком тиску, м'ясо витискається у концентричні щілини між основними і додатковими подрібнювальними кільцями. Частково подрібнившись, м'ясо захоплюється гострими крайками додаткових подрібнювальних кілець і, під дією тиску, надходить у зазори подрібнювального вузла, де остаточно подрібнюється до певних розмірів і вивантажується.

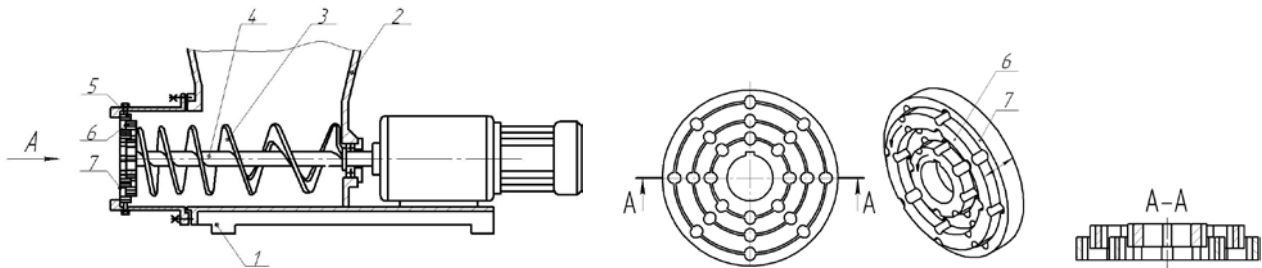


Рис. 6.6 – Конструктивна схема шнекового насоса-подрібнювача м'яса

Переваги пристрою у збільшенні продуктивності, забезпеченні якісного тонкого подрібнення м'яса, зменшенні температури нагрівання подрібнюваного продукту.

## 6.5. Обґрунтування умов ефективного подрібнення у нових машинах

### 6.5.1. Взаємозв'язок енергозатратності процесу з геометричними параметрами різального вузла

У запропонованих нами різальних машинах процес подрібнення м'яса відбувається при взаємодії ґраток і ножів у двохвимірному просторі (площині), що визначає форму поперечного перерізу подрібнюваного тіла та дисперсність фаршу після проходження через різальну пару. Конструктивне оформлення ґраток і ножів може бути різним, а тому у загальному випадку процес різання м'яса двома лезами може бути охарактеризований такими параметрами різального пристрою: радіусом заокруглення (затуплення) різальних крайків ножів  $r$ , зазором між

крайками  $\Delta$ , що вимірюється у напрямі нормалі до швидкості руху ножів; висотою  $h$  і шириною  $b$  (або діаметром) шматка м'яса і його міцністю; швидкістю відносного зближення різальних ножів  $v$  (рис. 6.17).

Складемо критеріальне рівняння залежності сили різання м'ясопродуктів від геометричних, кінематичних і сталих параметрів процесу. Параметри розділимо на дві групи. Перша група - геометричні і кінематичні параметри. Друга група - фізичні параметри подібності, що описують властивості м'яса.

З першої групи на величину енерговитрат впливають геометричні параметри різального пристрою ( $\delta_1, \delta_2, \varphi, \Delta, r$ ), швидкість різання  $v$  і розмір куска м'яса  $h$  і  $b$ .

Критеріальне рівняння енергії, що витрачається на утворення нової поверхні одиничного акту розрізання м'яса має наступний вигляд:

$$W_{\text{III}} = w_{\text{num}}(T, v) f(b, h, \delta_1, \delta_2, \varphi, \Delta, r, v), \quad (6.5)$$

де  $w_{\text{num}}(T, v)$  - питома енергія утворення вільної поверхні матеріалу, що залежить від його температури  $T$  і швидкості деформування  $v$ .

Якщо буде відома функція подібності  $f(b, h, \delta_1, \delta_2, \varphi, \Delta, r, v)$ , то робота різання буде пропорційна питомій роботі і може бути обчислена для будь-якого конкретного процесу при відомих геометричних параметрах устаткування.

Аналіз рівняння дозволяє зробити висновок: оптимальні геометричні характеристики устаткування не залежать від виду подрібнюваного м'яса і його стану, а відповідають мінімальному значенню  $f(b, h, \delta_1, \delta_2, \varphi, \Delta, r, v)$  при заданих технологічних і конструктивних обмеженнях. У такому разі оптимізація температурно-швидкісного режиму руйнування зводиться до визначення мінімуму функції для конкретного виду м'яса. Визначення виду цієї функції наведено у додатку Я1.

З наведених у цьому додатку викладок виходить, що

$$f(b, h, \delta_1, \delta_2, \varphi, \Delta, r, v) = \frac{V_{\text{def}}(t)}{V_{\text{def}}^{\text{io}}(t)}, \quad (6.6)$$

$V_{\text{def}}(t)$  - зміна об'єму деформаційної зони під дією лез при різанні в часі;

$V_{\text{def}}^{\text{io}}(t)$  - зміна об'єму деформаційної зони під дією лез за найкращих умов різання м'яса ( $\Delta \rightarrow 0, r \rightarrow 0$ ).

Руйнування м'яса за різних механізмів деформування відбувається по-різному і відносна деформація цієї сировини також різна

( $I_p=0,01\dots0,05$  – крихкий,  $I_p=0,3\dots0,7$  – високоеластичний,  $I_p=0,7\dots1,0$  – пластичний стан м'яса).

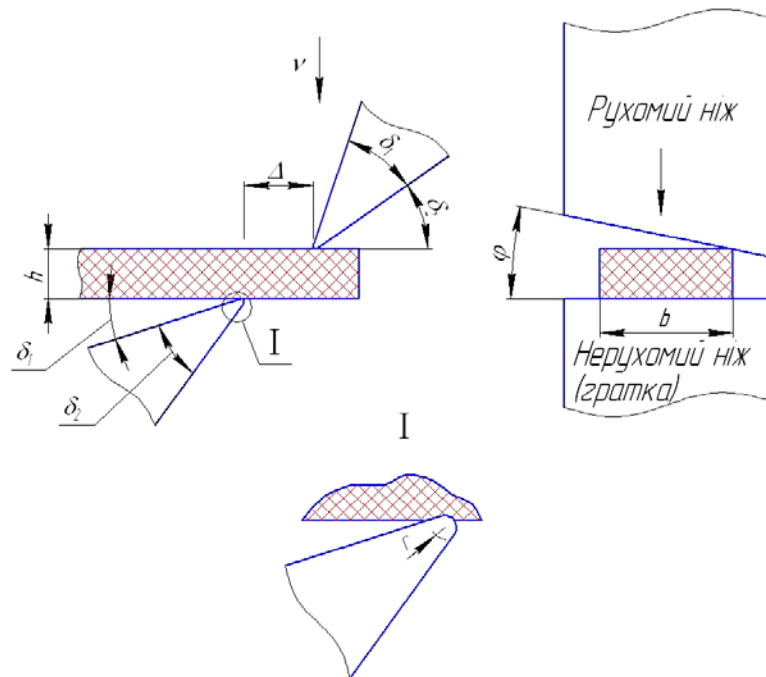


Рис. 6.7. Параметри, що визначають силу різання:  $\delta_1$  – кути заточування лез,  $\delta_2$  – передні кути лез,  $\varphi$  - кут між крайками лез,  $\Delta$  - зазор між крайками,  $r$  – радіуси загострення крайок,  $h$ ,  $b$  – відповідно товщина і ширина шматка м'яса

А тому на процеси деформування і руйнування впливають усі чинники визначеної нами функції подібності, що видно з графіків, отриманих аналітично (додаток Я.1, рис. Я.5-Я.8).

При руйнуванні м'яса у високоеластичному і пластичному стані великі його деформації потребують урахування зміни форми шматків, а при крихкому – урахування швидкості деформування і температури процесу.

Регулюючи зазор між крайками лез можна обмежити розмір частинок м'яса при подрібненні м'яса у високоеластичному стані. Кут  $\delta_1$  доцільно приймати в межах  $0\dots-5^\circ$ , а кут  $\delta_2$  повинен вибиратись мінімально можливим для зменшення зусиль різання і витрат енергії. Радіус заокруглення різального леза має бути мінімальним, а кут  $\varphi$  не більше  $\varphi=10^\circ$ .

Розглядаючи геометричні параметри різання м'яса двома лезами, сили і деформації, виникаючі в процесі та враховуючи критеріальне

рівняння (6.5), визначили питомі витрати енергії на утворення нової поверхні (додаток Я.1):

$$W_{\text{ПП}} = W_p^{\text{num}}(T, \nu) = \frac{(V_{\text{деф}}(t))^2}{V_{\text{деф}}^{\text{експ}}(t_p) b h}, \quad (6.7)$$

Схеми руйнування м'язової тканини яловичини за різних механізмів руйнування (рівня температури сировини) різні.

При різанні м'яса, що деформується за певних умов як крихке тіло, відбувається його руйнування при дуже малих величинах деформації стискання. Руйнування м'яса у високоеластичному стані відбувається у три стадії: деформування, утворення випереджаючої тріщини і розсування частини м'яса клином. При різанні м'яса у пластичному стані відбувається входження клина леза у зразок практично відразу після їх контакту і утворення тріщини може не відбутись аж до повного змикання різальних крайок (додаток Я, рис. Я.4). За наявності зазору між крайками лез повного розділення м'яса на частини не відбувається, а руйнування завершується після розтягування пластичної сировини за рахунок кінематичного зачеплення. Аналогічно може руйнуватися м'ясо у високо еластичному стані, якщо пластична складова деформації переважає.

Отримані вище математичні моделі деформування м'яса у крихкому, високоеластичному та пластичному стані можуть бути використані для розрахунку процесів різання різноманітних м'ясопродуктів.

### **6.5.2. Міцність біополімерів м'яса в умовах різання**

Дослідження виконані для встановлення закономірностей впливу технологічних чинників на рівень руйнівних напружень і деформацій у м'ясній сировині. З метою визначення чисельних значень характеристик міцності м'ясних зразків, проведено їх випробування в умовах різання за різних температур і швидкостей деформування.

Випробуванню підлягали зразки м'язової тканини після 120 год автолізу яловичини з прямокутним перетином і шириною основи 10 мм та висотою 5...15 мм за температур -20, +4, +20°C з модулями пружності при стисканні уздовж волокон, відповідно, 9,0; 0,04 і 0,01 МПа, що мали квазікрихкі, високоеластичні та пластичні властивості.

Всі зразки вирізали з одного шматка м'язової тканини яловичини, що підлягали відповідному термообробленню. Кількість зразків, взятих для випробувань після кожного виду термооброблення, вибиралась не менше п'яти.

Дослідження проводились з використанням спеціального різального пристрою, який встановлювали на розривній машині IP5057. Сили різання визначали з використанням тензометричного давача, а температуру зразків із застосуванням кремнієвого давача на базі мікросхеми LM 135, які були з'єднані з аналого-цифровим перетворювачем та ЕОМ. Методика виконання і обробки експериментів та її апаратурне забезпечення подані у додатку Я2.

Величину руйнівного напруження  $\sigma_p$  і напруження текучості  $\sigma_T$  (Н/м<sup>2</sup>) розраховували за приведеними нижче формулами (6.8), (6.9) за максимальним значенням діючої сили (рис. 6.8, 6.9, 6.10). Величину деформацій до руйнування для досягнення межі текучості розраховували за приведеними нижче формулами (6.10), (6.11). При цьому величину відносного подовження при пластичному деформуванні зразків розраховували при максимальному діючому зусиллі.

Руйнівне напруження і межа текучості при різанні обчислювались за формулами:

$$\sigma_p = F_p / hl_p, \quad (6.8)$$

$$\sigma_T = F_T / hl_p, \quad (6.9)$$

де  $F_p$  – навантаження, при якому зразок руйнувався, Н;  $F_T$  – навантаження, у момент досягнення межі текучості, Н;  $l_p$  – висота і ширина робочої частини зразка, м.

$$\varepsilon_p = \Delta h_p / h_0, \quad (6.10)$$

$$\varepsilon_T = \Delta h_T / h_0, \quad (6.11)$$

де  $\Delta h_p$ ,  $\Delta h_T$  – відповідно, зменшення висоти зразка при зрізі і при досягненні межі текучості, м;  $h_0$  – початкова висота зразка, м.

Зменшення висоти зразка за умови постійної швидкості руху ножа  $v = \text{const}$  розраховували за формулою:

$$\Delta h_p = h_0 - vt_p, \quad (6.12)$$

де  $t_p$  – час до початку руйнування або початку пластичного деформування.

Характеристику розкиду даних оцінювали за величиною середнього і стандартного відхилення.

Обробка даних шляхом апроксимації отриманих значень питомих енергій (рис. 6.15) дозволила отримати наступні залежності питомої енергії руйнування від кута заточки ножів для випробуваних зразків м'яса у станах:

квазікрихкому:  $W_p^{num} = 0,029 \exp(0,094\alpha) + 1,41$  (6.13)

високоеластичному:  $W_p^{num} = 0,056 \exp(0,066\alpha) + 0,85$  (6.14)

пластичному:  $W_p^{num} = 0,196 \exp(0,06\alpha) + 2,32$  (6.15)

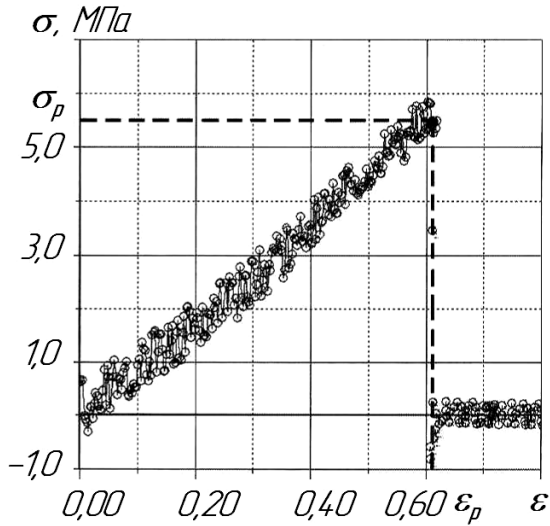


Рис. 6.8. Визначення показників міцності м'яса за температури  $-20^{\circ}\text{C}$  при квазікрихкому руйнуванні (на прикладі діаграми руйнування м'язової тканини при зрізі після обробки даних вимірювання)

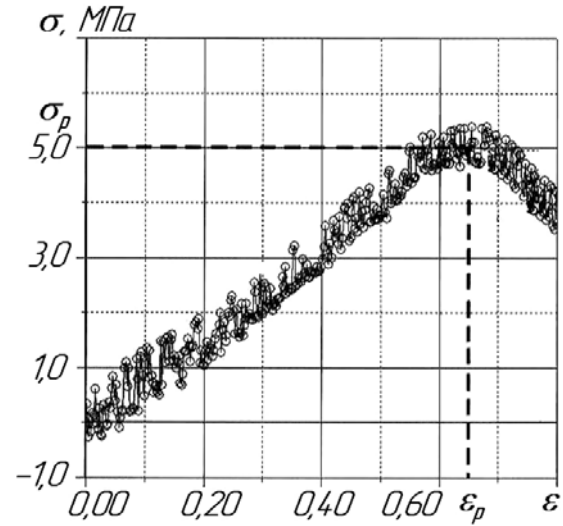


Рис. 6.9. Визначення показників міцності м'яса за температури  $+4^{\circ}\text{C}$  при руйнуванні за високо еластичним механізмом (на прикладі діаграми руйнування м'язової тканини при зрізі після обробки даних вимірювання)

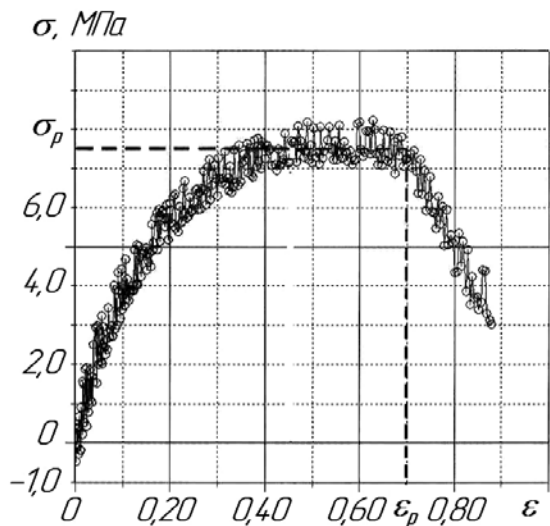


Рис. 6.10 -. Напруження руйнування м'яса за температури  $+20^{\circ}\text{C}$  при пластичному деформуванні м'язової тканини яловичини

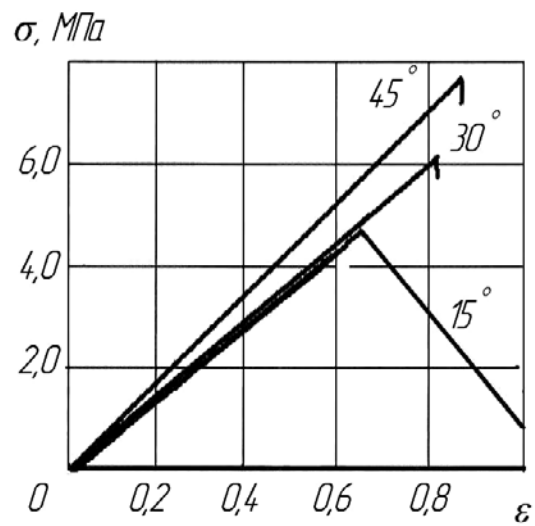


Рис. 6.11. Діаграми «напруження-деформація» при різанні м'яса за температури  $+4^{\circ}\text{C}$  у високо еластичному стані ножами з кутами

загострення 15, 30 і 45°

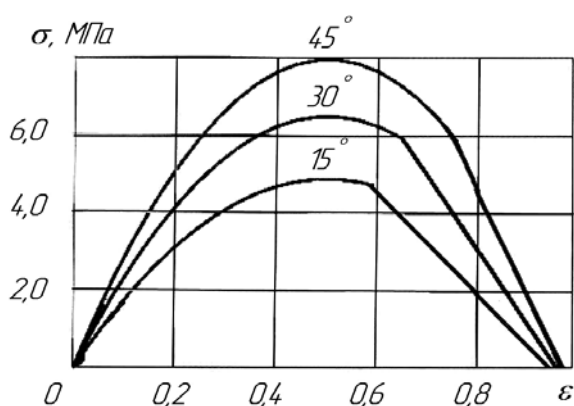


Рис. 6.12. Діаграми «напруження-деформація» при різанні м'яса за температури +20°C у пластичному стані ножами з кутами загострення 15, 30 і 45°

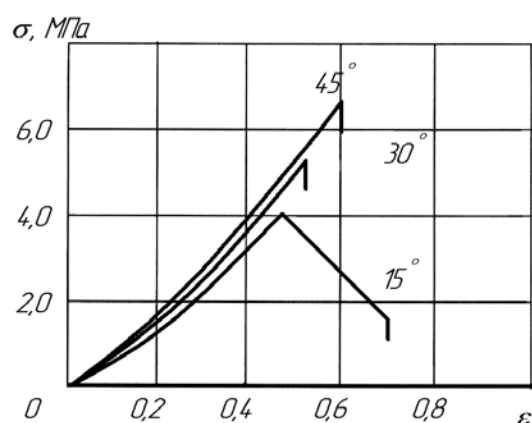


Рис. 6.13. Діаграми «напруження-деформація» при різанні м'яса за температури - 20°C у квазікрихкому стані з кутами загострення

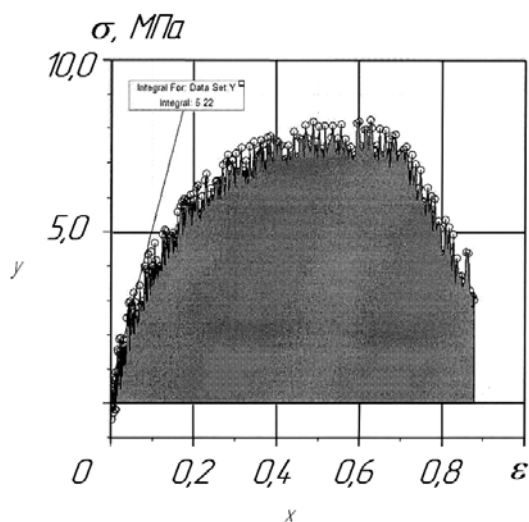


Рис. 6.14. Обчислення питомої енергії різання сировини за допомогою програми «Graphical analysis» (на прикладі діаграми різання м'яса у пластичному стані при куті заточки ножів 45°)

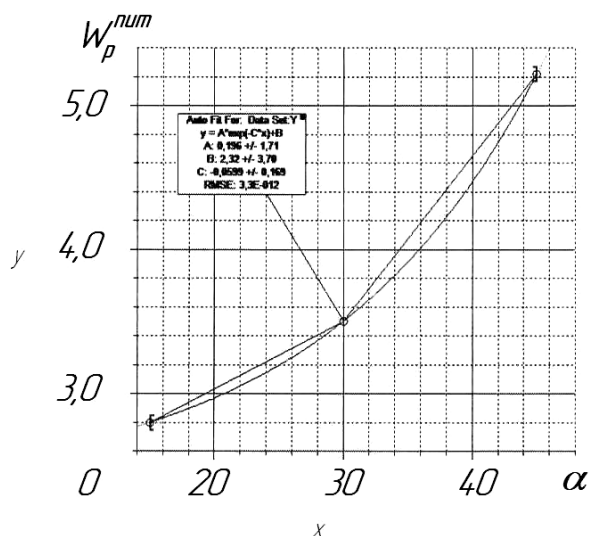


Рис. 6.15. Отримання рівнянь залежності питомої енергії руйнування м'яса у пластичному стані при різанні від кута заточування ножів

Встановлено, що питома енергія руйнування м'яса при різанні завжди зменшується при зменшенні кута заточування ножів і теоретично



може досягати мінімального значення при  $\alpha=0$ . З рівнянь (6.13), (6.14), (6.15) при  $\alpha=0$  знаходимо значення мінімальних енергій руйнування випробуваних зразків за температури і швидкості деформування 2 мм/с для м'яса у станах:

квазікрихкому: 
$$W_{p \min}^{num}(295,2) = 1439 \text{ кДж/м}^3 \quad (6.16)$$

високоеластичному: 
$$W_{p \min}^{num}(295,2) = 906 \text{ кДж/м}^3 \quad (6.17)$$

пластичному: 
$$W_{p \min}^{num}(295,2) = 2515 \text{ кДж/м}^3 \quad (6.18)$$

На основі проведеного аналізу залежності міцності від виду напруженого стану можна зробити припущення, що значення  $W_{\delta \min}^{i\delta}$  буде змінюватись в залежності від швидкості, температури і може бути розраховано тільки за наявності залежностей такого виду:

$$W_{p \min}^{num} = w_{p0}^{num} f\left(T, \frac{d\varepsilon}{dt}\right) \text{ кДж/м}^3 \quad (6.19)$$

де  $w_{p0}^{num}$  - постійна, що характеризує максимально можливу міцність м'яса при  $T=0K$  і  $(d\varepsilon/dt) \rightarrow v_0$  ( $v_0$  – швидкість звуку у м'ясі при  $T=0K$ ).

Визначити у явному вигляді залежність (6.19) можна тільки в результаті випробувань м'яса на міцність при змінних температурах і швидкостях деформування.

### **6.5.3. Міцність м'язової тканини яловичини при різанні за різної температури і швидкості деформування**

Варіювання температури зразків м'яса проводили в межах від -20 до +20°C. Охолодження зразків здійснювали поміщення в морозильній камері з витримкою протягом 3...4 годин, а нагрівання протягом такого ж часу у термостаті.

Контроль температури здійснювали з використанням контрольного зразка в який було вмонтовано датчик температури.

Температура випробування фіксувалась по температурі контрольного зразка в момент руйнування робочого. Відхилення температур випробувань від заданих при охолодженні було в межах 0,5...2°C, а при нагріванні – 0,5...1°C. За рахунок того, що робочий і контрольний зразки охолоджувались і нагрівались при випробуванні в однакових умовах, точність вимірювання температури відповідала точності вимірювальної системи.

Варіювання швидкості деформуванні при випробуванні зразків м'яса на зріз за допомогою розривної машини можливе тільки в межах 1...8

мм/с. Тому для випробувань при значно більших швидкостях різання був використаний гравітаційний копер висотою 2,5 м, що дало можливість досягти максимальної швидкості різання 7 м/с.

При плануванні експерименту було враховано технічні можливості розривної машини ІР 5057 і вибрано межі варіювання швидкостей 1...8 мм/с, а при випробуванні на зріз за допомогою копра – 3000...6000 мм/с. Постановочні експерименти показали, що при високих швидкостях руйнування вимірювання деформацій до руйнування мають недостатню точність і будуть недостовірними, тому при випробуваннях на копирі вимірювали тільки максимальне зусилля, що виникало в результаті взаємодії ножів з матеріалом.

З апріорної інформації відомо [63, 103, 167, 225], що залежності руйнівних напружень і деформацій м'яса від температури і швидкості прикладення навантажень мають нелінійний характер, тому експеримент проводили за рототабельним композиційним планом другого порядку. В такому випадку досліджуваний процес, можна з достатньою точністю описати поліномом другого порядку. При дослідженні процесів і систем з двома чинниками раціональним є план типу правильного шестикутника з числом центральних точок  $n_0 > 0$ . Зазвичай  $n_0$  приймають рівним 4. В цьому випадку такий план передбачає проведення 10 дослідів, з яких шість виконуються на рівнях чинників, вказаних у вершинах шестикутника, а чотири – на рівнях, відповідних центру плану. Цей план є рототабельним і за кількістю дослідів більш економічний, ніж відповідний рототабельний план другого порядку, що вимагає для своєї реалізації постановки 13 дослідів: повний експеримент чинника типу 22 містить 4 дослідів, в «зоряних» точках необхідно провести  $2^k = 2 \cdot 2 = 4$  дослідів і 5 дослідів у центрі плану. Інша перевага описуваного плану полягає в тому, що для чинника  $x_1$  він вимагає використання п'яти рівнів (+1; +0,5; 0; -0,5; -1), а для чинника  $x_2$  – всього трьох рівнів (+0,866; 0; -0,866). Центральний композиційний рототабельний план другого порядку передбачає використання обох чинників на п'яти рівнях (+1,1414; +1; 0; -1; -1,1414). Матриця плану представлена у додатку Я.3, табл. Я.1). За результатами дослідів, виконаних згідно цього плану, визначали коефіцієнти рівняння:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 \quad (6.20)$$

Коефіцієнти рівняння (6.20) знаходили за приведеними нижче формулами:

$$b_0 = \frac{1}{4} \sum_{u=1}^4 y_{0u}; b_1 = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{10} x_{1j} y_j; b_2 = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{10} x_{2j} y_j; b_{12} = \frac{4}{3} \sum_{j=1}^{10} x_{1j} x_{2j} y_j;$$

$$b_{11} = \frac{3}{4} \sum_{u=1}^4 x_1^2 y_j + \frac{1}{12} \sum_{j=1}^{10} x_2^2 y_j + \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{10} y_j; \quad (6.21)$$

$$b_{22} = \frac{3}{4} \sum_{u=1}^4 x_2^2 y_j + \frac{1}{12} \sum_{j=1}^{10} x_1^2 y_j + \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{10} y_j$$

де  $y_{0u}$  - значення функції відгуку в  $u$ -ому досліді в центрі плану;  $x_{ij}$ ,  $x_{2j}$  – кодовані значення чинників в  $j$ -ому досліді;  $y_j$  – значення функції відгуку в  $j$ -му досліді.

Дисперсію  $S_y^2$  відтворюваності експерименту визначали за результатами дослідів в центрі плану, використовуючи формулу:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1}, \quad (6.22)$$

де  $\bar{y}_0$  - середнє арифметичне значення функції відгуку, отримане за наслідками  $n_0$  дослідів в центрі плану.

Дисперсії коефіцієнтів регресії обчислювали за формулами:

$$S_{b0}^2 = \frac{1}{4} S_y^2; S_{b1}^2 = S_{b2}^2 = \frac{1}{3} S_y^2; S_{b12}^2 = \frac{4}{3} S_y^2; S_{b11}^2 = S_{b22}^2 = \frac{1}{3} S_y^2 \quad (6.23)$$

При плануванні експерименту були враховані теоретичні відомості [225] про те, що величину руйнівного напруження м'яса за різних швидкостей деформування можна описати логарифмічною залежністю:

$$\sigma_p(v, T) = f(T) \cdot \ln(f(v)), \quad (6.24)$$

де  $f(T)$  - функція залежності руйнівного напруження від температури;  $\ln(f(v))$  - функція залежності руйнівного напруження від швидкості деформування.

Відомо [225], що зростання руйнівного напруження при збільшенні швидкості деформування має певну межу, яка обумовлена досягненням рівня швидкості розповсюдження пружних хвиль у м'ясі за температури нижчої температури крихкості, тому представимо  $f(v)$  у вигляді:

$$f(v) = \frac{c_v}{v}, \quad (6.25)$$

де  $c_v$  - постійний коефіцієнт, значення якого більше за значення швидкості деформування.

Оскільки відомо, що швидкість розповсюдження пружних хвиль у м'ясі за температур нижче температури крихкості складає близько 1000

м/с [103], то величина  $c_v$  у першому наближенні може бути саме такого порядку.

Для переходу в побудові плану експерименту від величини швидкості до її логарифмічної функції обчислювали значення  $\ln(v^{-1} \cdot 10^6)$  для меж варіювання і потім складали план згідно рівням факторів (додаток Я.3, табл Я.2). Потім визначали значення швидкості деформування для кожного рівня. Таким чином досягнули зниження нелінійності залежності руйнівного напруження від швидкості деформування і, тим самим, підвищили точність обробки експерименту.

При проведенні постановочних експериментів було встановлено, що дисперсія розсіювання результатів вимірювання задовольняє критерію Кохрена за умови відтворення експерименту при кількості паралельних дослідів не менше 4, тому було прийнято проводити випробування зразків з п'ятикратним повторюванням.

Порівняльний аналіз рівнянь, отриманих в результаті обробки даних експерименту при швидкостях різання 1...8 м/с і 3000...6000 м/с показав, що розбіжність значень руйнівних напружень, розрахованих за відповідними рівняннями при однакових умовах, не перевищує 15%. Тобто можна константувати незмінний характер впливу швидкості на процес руйнування в широкому діапазоні. Похибки рівнянь можна вважати більшими при більших швидкостях деформування, тому доцільно використовувати регресійні рівняння, що отримані за менших швидкостей випробувань (додаток Я.3, табл. Я.3, Я.4).

З рівнянь (Я.34 – Я.41) очевидно, що зроблене припущення про величину коефіцієнта  $c_v=1000$  м/с правомірне, тому що навіть якщо гранична швидкість  $c_v$  відрізняється від прийнятої на один порядок в ту чи іншу сторону, тобто становить 100 м/с, або 10000 м/с (що неможливо навіть теоретично для реальних зразків м'яса), то максимальне (з усіх рівнянь) відхилення значень руйнівних напружень і критичних деформацій буде відповідно -6% і +12% за рахунок зміни величин вільних членів рівнянь.

#### **6.5.4. Питома енергія, що витрачається на деформування м'яса до початку процесу руйнування при різанні**

Як видно з діаграм деформування випробуваних зразків м'яса при різанні (рис. 6.11, 6.12, 6.13) залежність напруження від деформації до руйнування сировини у квазікрихкому і високоеластичному стані можна вважати лінійною і значення питомої енергії, що витрачається на

деформування цих матеріалів до початку процесу руйнування при різанні можна обчислити за формулою:

$$W_p^{num}(T, v) = \frac{1}{2} \sigma_p(T, v) \cdot \varepsilon_p(T, v) f(h, \delta_1, \delta_2, \varphi, \Delta, r), \quad (6.26)$$

де  $f(h, \delta_1, \delta_2, \varphi, \Delta, r)$  - параметрична функція подібності, що визначається співвідношенням (6.6).

При деформуванні ножами м'яса у пластичному стані переважно відбувається пластичне деформування і залежність напруження від деформації нелінійна, що обумовлено специфічним процесом входження ножа в матеріал. Нами було проведено аналіз зміни характеру цієї залежності шляхом апроксимації кривих деформування, що отримані за різних кутів заточування ножів, температурі 293 К і швидкості руйнування 2 мм/с (рис. 6.16) залежністю (Я.30) перетвореної до виду:

$$\sigma_p^{nl}(\varepsilon) = \varepsilon \cdot [\sigma_{nl}] \cdot \left( (2f + tg(\delta)) \cdot (1 - \varepsilon) + \frac{2r}{h(1 - \varepsilon)} \right). \quad (6.27)$$

В результаті аналізу встановлено, що за різних температур і швидкостей руйнування залежність напруження від деформації (ступеня входження ножів в матеріал) може бути описана рівнянням.

$$\sigma = \varepsilon \left( k_1(1 - \varepsilon) + \frac{k_2}{(1 - \varepsilon)} \right), \quad (6.28)$$

де  $k_1$  - коефіцієнт, що залежить від кута заточування ножів, межі пластичності і коефіцієнту тертя м'яса;  $k_2$  - коефіцієнт, що залежить від межі пластичності м'яса, радіуса заокруглення крайки ножа і висоти зразка.

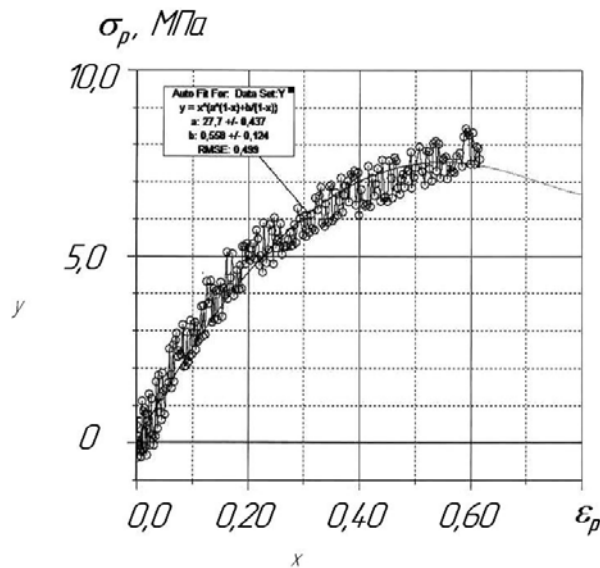


Рис. 6.16. Апроксимація діаграми різання м'яса у пластичному стані при швидкості 2 мм/с, температурі 295 К і куті заточування ножів  $\alpha=45^\circ$

В результаті апроксимації отримані величини коефіцієнтів при різних кутах заточування ножів.

Для визначення межі міцності м'яса у пластичному стані достатньо знати величину коефіцієнту тертя при температурі випробувань, або величину радіуса заокруглення різальної крайки.

Вимірювання заокруглення різальної крайки леза проводили з використанням інструментального мікроскопа. В результаті вимірювань отримано значення 0,15 мм.

Межу пластичності матеріалу знайдемо з виразу:

$$[\sigma_{nl}] = k_2 \frac{h}{2r} \quad (6.29)$$

Коефіцієнт тертя знайдемо з виразу:

$$f_{мер} = 0,5 \left( \frac{\alpha_1}{[\sigma_{nl}]} - tg(\delta) \right) \quad (6.30)$$

Формула (6.28) з урахуванням розрахованих величин  $[\sigma_{nl}]$  і  $f_{мер}$  приймає вигляд:

$$\sigma_p^{nl}(\varepsilon)_{деф} = 20 \cdot \varepsilon \cdot \left( (0,39 + tg(\delta)) \cdot (1 - \varepsilon) + \frac{2r}{h(1 - \varepsilon)} \right) \quad (6.31)$$

Формула (6.31) справедлива за температури м'яса 293 К і швидкості різання 2 мм/с.

Апроксимація лінійних ділянок спадання напруження при різанні дозволила отримати наступне рівняння

$$\sigma_p^{nl}(\varepsilon)_{руїн} = 20,2(0,39 + tg(\delta)) \cdot (1 - \varepsilon) \quad (6.32)$$

З (6.31) і (6.32) видно, що розбіжність коефіцієнтів у рівняннях складає не більше 1%, отже це підтверджує правильність зроблених нами вище (розділ 4) припущень про механізм різання м'яса з вираженими пластичними властивостями.

Процес руйнування м'яса у пластичному стані визначається залежністю межі пластичного руйнування  $[\sigma]_{nl}$  від температури і швидкості деформування і коефіцієнта тертя від температури і нормального тиску на поверхню ковзання  $p$ .

Тоді питома енергія деформування м'яса у пластичному стані до руйнування може бути обчислена за виразом:

$$W_{деф}^{num}(T, v) = [\sigma]_{nl}(T, v) \int_0^{\varepsilon_p} \varepsilon \cdot \left( (2f_{мер}(T, p) + tg(\delta)) \cdot (1 - \varepsilon) + \frac{2r}{h(1 - \varepsilon)} \right) d\varepsilon \quad (6.33)$$

Після інтегрування (6.33) отримуємо рівняння питомої енергії деформування м'яса до початку процесу руйнування:

$$W_{def}^{num}(T, v) = [\sigma]_{nl}(T, v) \int_0^{\varepsilon_p} \varepsilon \cdot \left( (2f_{mep}(T, p) + tg(\delta)) \cdot \left( \frac{\varepsilon_p^2}{2} - \frac{\varepsilon_p^3}{3} \right) - \frac{2r}{h} \cdot (\varepsilon_p + \ln(1 - \varepsilon_p)) \right) d\varepsilon \quad (6.34)$$

А питому енергію руйнування після досягнення граничного стану  $\varepsilon_p$  знайдемо інтегруванням виразу

$$W_p^{nl}(T, v) = [\sigma]_{nl}(T, v) \cdot (2f_{mep}(T, p) + tg(\delta)) \int_{\varepsilon_p}^1 (1 - \varepsilon) d\varepsilon. \quad (6.35)$$

Після інтегрування (6.35), отримали:

$$W_p^{nl}(T, v) = 0,5[\sigma]_{nl}(T, v) \cdot (2f_{mep}(T, p) + tg(\delta)) \cdot (1 - 2\varepsilon_p + \varepsilon_p^2) \quad (6.36)$$

При умові ідеального різання множинник при  $[\sigma]_{nl}(T, v)$  у рівнянні (6.34) дорівнює одиниці.

### 6.5.5. Проектування енергоефективних шнекових подрібнювачів

Процес подрібнення м'яса у шнекових подрібнювачах характеризується енерговитратами на утворення нової поверхні матеріалу, що переробляється, а також якісними показниками фаршу. При проектуванні таких машин треба вирішувати двоєдину задачу: отримання якісного продукту при мінімальних енерговитратах на технологічний процес.

Поставлена задача вирішується шляхом розрахунку цільової функції питомих енерговитрат при заданій продуктивності і ступені подрібнення матеріалу, з подальшою реалізацією алгоритму пошуку екстремальних її значень за допомогою розроблених програм для ЕОМ (додаток Я.5).

В залежності від типорозміру машини і виду м'яса потрібно вибирати такі технологічні режими його роботи, щоб забезпечити необхідну продуктивність, ступінь подрібнення при мінімальних витратах електроенергії і з врахуванням обмежень, які обумовлені температурною стійкістю сировини, а також характеристиками міцності черв'яка. Основна мета розрахунку полягає в тому, щоб на підставі розрахункових формул (додаток Я.4) знайти такі оптимальні геометричні параметри деталей, які разом з характеристиками їх міцності і ефективним відведенням тепла забезпечували б мінімальні енерговитрати при заданій якості фаршу.

У зв'язку з цим ставиться завдання визначити вектор, який мінімізує цільову функцію, що характеризує витрати енергії на утворення питомої площі вільної поверхні матеріалу.

Розрахунки на міцність деталей шнекового подрібнювача виконуються після попереднього вибору геометричних розмірів черв'яка і розрахунку технологічних параметрів. Розрахунки виконуються з урахуванням виду силового навантаження і режиму роботи. Метою розрахунків на міцність є визначення розмірів основних деталей машини (товщина стінки циліндра, розмірів сполучних елементів, максимального прогинання черв'яка), вибір і розрахунок опорних елементів та ін.

Розрахунки на міцність проводяться на максимально можливі зусилля, що виникають в подрібнювачі (додаток Я.4) за допомогою розробленої програми для ЕОМ (додаток Я.5).

На основі розроблених моделей руйнування м'яса у різальному вузлі і транспортування в напірній зоні машини розроблено програму для розрахунку раціональних технологічних і конструктивних параметрів процесу подрібнення. Метод оптимізації, що використаний при складанні програми, заснований на мінімізації цільової функції методом ковзаючого допуску. Текст програми представлено в додатку Я.5.

## **6.6. Машина для подрібнення шпику**

Форма і розмір кусочків шпику прямо впливають на технологічні і споживчі якості ковбас. Від них залежать терміни сушки сирокочених ковбас, якість і характер гістологічного зрізу готових виробів. Тому нами була запропонована корисна модель шпигорізки (патент № 86188 від 25.12.13 р.), яка гарантує якісне нарізання шпику.

Відома шпигорізка (Гвоздєв О.В. Машини і устаткування для переробки продукції тваринництва. - Мелітополь.: Таврійська державна агротехнічна академія, 2001 р.- с. 75), яка складається з двох ножових рамок, які перпендикулярні одна одній і здійснюють зворотно-поступальний рух завдяки ексцентрикам. Шпик ножовими рамками ріжеться на брусочки, а потім кубики шпику відтинаються обертовим серповидним ножом. Шпигорізки мають вертикальну чи горизонтальну подачу шпику, що здійснюється гідравлічним чи механічним пристроєм.

Недоліками відомої шпигорізки є складність конструкції, металомісткість і значні витрати електроенергії на процес різання. При недостатньому тиску маси в коробі живлення відбувається деформація шпику і не забезпечується чітка форма кубиків.

Завдяки новій конструкції подрібнювальних механізмів, живильними вальцями шпик подається на барабани, які при взаємодії подрібнюють його на кубики. Шпигорізка (рис. 6.17) містить корпус, на якому закріплений обертовий ніж і штовхач. У верхній частині корпуса



встановлений бункер з валом дискових ножів і рифленими живильними вальцями, а в нижній частині корпуса закріплені два взаємодіючі барабани. У внутрішній частині перфорованого квадратними отворами барабана, вздовж його осі, встановлений конус з гвинтовими лопатями на зовнішній поверхні, а на поверхні другого барабана горизонтальними рядами з зазорами виконані квадратні призми, між якими, у нижній частині, закріплені шкребки.

Завдяки тому, що в приймальному бункері встановлений ножовий вал і живильні вальці забезпечується подрібнення і дозована подача брусочків шпику на взаємодіючі барабани і утворення кубиків шпику. Завдяки конусу з гвинтовими лопатями, закріпленому в порожнині перфорованого барабана, відбувається вивантаження шпику і очищення поверхні квадратних призм, виконаних на другому барабані, за допомогою шкребок.

Виконання живильного бункера з ножовим валом і живильними рифленими вальцями забезпечує стискання пласта шпику і його просування до барабанів, внаслідок чого підвищується рівномірність подачі. Використанням двох взаємодіючих барабанів досягається підвищення продуктивності шпигорізки, якості продукції, зниження металомісткості і зменшення енерговитрат.

На рис. 6.17 зображена принципова схема шпигорізки. Вона включає корпус 3, бункер 1, ножовий вал 2, живильні рифлені вальці 4, перфорований барабан 5, барабан з рядами призм 6, шкребки 7, привод 8, конус 9, гвинтові лопаті 10.

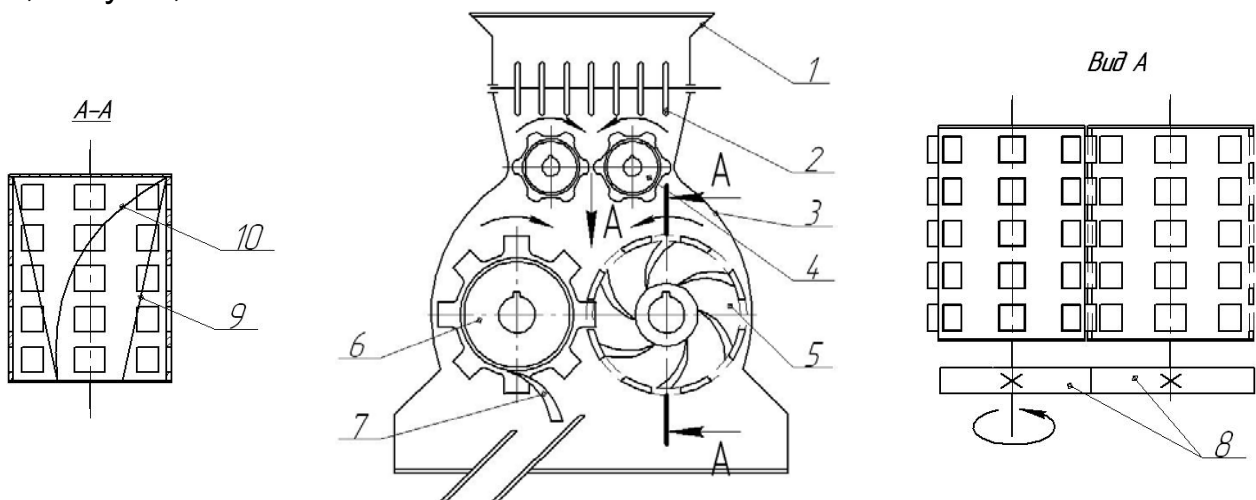


Рис. 6.17 – Конструктивна схема машини для подрібнення шпику

Шпик завантажується у бункер 1. При вмиканні приводу 8 приводиться в рух ножовий вал 2, живильні рифлені вальці 4, барабани

5 і 6. Ножами вала 2 шпик подрібнюється на брусочки, що відповідають розмірам сторін кубика, які захоплюються живильними рифленими вальцями 4, стискаються у пласт і подаються до барабанів 5 і 6. Брусочки шпику захоплюються призмами барабана 6 і, протискуючись в квадратні отвори перфорованого барабана 5, утворюють кубики шпику, який попадає на поверхню конуса 9 і, гвинтовими лопатями 10, вивантажується з барабана 5.

Для забезпечення надійної роботи пристрою у нижній частині барабана 6 встановлені шкребки 7, що видаляють жири між рядами призм. Для різання шпику на кубики з розмірами сторін 4, 6, 8 і 12 мм встановлюють барабани з відповідними розмірами сторін призм і перфорованих отворів на барабані.

### 6.7. Синтез ефективних кутерних ножів

Процес тонкого подрібнення м'ясної сировини на сьогоднішній день є одним з найбільш енергоємних процесів у ковбасному виробництві, а якість готового продукту великою мірою залежить від умов, в яких здійснюється подрібнення. З огляду на ресурсозбереження, даний процес досліджений недостатньо, що призводить до нераціонального використання енергії, яка витрачається на подрібнення, зниження якості готової продукції. Одним з шляхів є вдосконалення конструкції робочих органів машин. Основними робочими органами сучасних кутерів є ножі, які мають переважно пряму або серпоподібну форму. Основними геометричними параметрами, які характеризують процес різання є:  $\beta$  - кут загострення леза ножа;  $\delta$  - задній кут;  $\gamma$  - передній кут;  $\delta + \beta$  - кут різання;  $\alpha$  - кут ковзання леза;  $\beta'$  - кінематичний кут різання (див. рис. 6.2).

Важливим для здійснення технологічного процесу подрібнення м'яса для варених ковбас є кут загострення леза ножа  $\beta$ , адже загострити його потрібно так, щоб, з одного боку, забезпечити якісне різання, з іншого - стійкість ножа в процесі роботи. Раціональний час між переточуваннями ножа складає 8 годин безупинної роботи кутера, а максимальну стійкість ножа, при якісному подрібненні м'ясної сировини, забезпечує його кут загострення  $\beta = 27-30^\circ$ [249].

Загальновідомо, що на ефективність різання впливає його кінематика, яка визначається швидкостями руху точок леза. Швидкість  $v$  будь-якої точки леза відносно продукту змінна у часі і утворює з лезом гострий кут  $\alpha$ , так що вона розкладається на нормальну  $v_n$  і дотичну  $v_t$ .

до леза складові. Кут  $\alpha$  між векторами  $v$  і  $v_n$  є кутом ковзання леза, а тангенс цього кута називається коефіцієнтом ковзання леза  $k_c$ .

Відомо, що можливі три варіанти процесу різання [211]:

а) якщо  $v = v_n$ ,  $v_t = 0$  і  $k_c = 0$ , то різання відбувається без ковзання або це нормальне (рубаче) різання;

б) якщо  $v \neq v_n$ , то різання косе або похиле (ковзне);

в) якщо  $v = v_t$ ,  $v_n = 0$ ,  $k_c = 0$ , то лезо ковзає поверхнею продукту, не вклинюючись в нього, при цьому різання не відбувається.

Похиле різання має перевагу перед нормальним, тому що при цьому значно зменшується  $v_n$ , що обумовлює менше зминання продукту, втрату ним соку і краще зберігання смакових і товарних якостей.

Основними перевагами похилого різання є:

а) кінематична трансформація кута загострення леза  $\beta'$ ;

б) перенесення частини сили тертя продукту на ніж з нормального напрямку до леза на дотичний  $\beta$ .

Ефект кінематичної трансформації кута загострення полягає у тому, що у випадку похилого різання фактичний кут  $\beta'$  дещо менший від конструктивного кута загострення ножа, що було вже показано вище.

Кінематичний кут різання обчислюється за відомою формулою [250]:

$$\beta = \arctg \left( \frac{\operatorname{tg}(\beta)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\alpha)}} \right) \quad (6.37)$$

На енерговитрати у процесі різання м'яса впливають такі чинники: товщина леза, глибина його занурення, шорсткість поверхні ножа, кут загострення, швидкість різання та фізико-механічні властивості продукту, що розрізається. Правильне врахування усіх чинників, які впливають на енерговитрати при різанні, має вирішальне значення під час розробки конструкцій робочих органів.

Серпоподібні ножі можуть мати різноманітну форму леза (див. підрозділ 6.2). Дуже часто форма леза ножа побудована на основі математичних кривих. Найчастіше застосовують евольвенту, логарифмічну спіраль, архімедову спіраль [211].

Розглянемо, які показники будуть у леза, виконаного у вигляді архімедової спіралі.

Колова швидкість будь-якої точки різальної крайки, виконаної у вигляді спіралі Архімеда, визначається із співвідношення [211]:

$$v_0 = \omega \cdot \rho = \varphi \cdot v \quad (6.38)$$

де  $\varphi$  - кут повороту променя, рад;  $v$  - радіальна швидкість руху точки по променю, вона ж швидкість вклинювання леза в матеріал, м/с.

Відношення швидкості вклинювання  $v$  до колової  $v_0$  в нашому випадку рівна  $k_c$ , причому  $v = v_n$ ,  $v_0 = v_t$ . Тоді коефіцієнт  $k_c$  буде рівним:

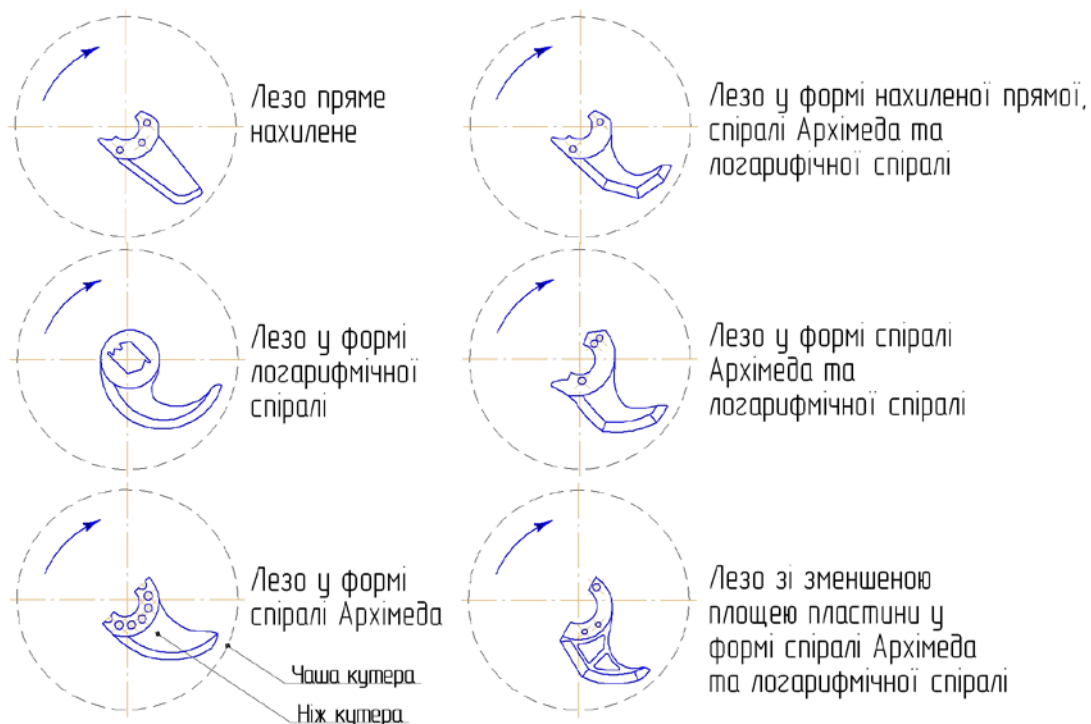
$$k_c = \frac{v_t}{v_n} = \frac{\varphi \cdot v}{v} = \varphi \quad (6.39)$$

Таким чином, нормальна швидкість різання буде постійною у будь-якій точці леза.

При використанні ножа з лезом у вигляді логарифмічної спіралі швидкість руху точки по променю пропорційна довжині радіуса, причому при  $\omega = const$  колова швидкість будь-якої точки леза теж пропорційна радіусу [250]. Отже, коефіцієнт ковзання є постійною величиною  $k_c = const$ .

При використанні ножа з лезом у вигляді евольвенти тангенціальна швидкість у будь-якій точці леза постійна [251]. У табл. табл. 6.1 показані деякі можливі варіанти конфігурацій ножів.

Таблиця 6.1 – Профілювання ножів кутера на основі математичних кривих



Розрахунки і дослідження показали, що застосування ножів з формою леза у вигляді архімедової спіралі та евольвенти доцільне під час подрібнення м'яса з низьким вмістом сполучної та хрящової тканини, а використання ножів з формою леза у вигляді логарифмічної спіралі - для подрібнення м'яса з високим вмістом сполучної тканини. Тому в запропонованого ножа для забезпечення його універсальності прийнято рішення поєднати у формі леза криву Архімеда та логарифмічну спіраль. При цьому спіраль Архімеда застосовано ближче до центра обертання ножа, а логарифмічну спіраль - ближче до периферії, де швидкість різання більша.

Мінімальна потужність на різання необхідна (рис. 6.18), якщо ножі прямі і кут між дотичною до кола та лезом  $90^\circ$ , тобто різання рубає без тангенціальної складової. Теоретично таке різання є найбільш економічно вигідним. Разом з тим, на практиці таке різання дає добрий результат лише під час подрібнення м'яса I сорту (без вмісту сполучної тканини) і лише у разі застосування гострого леза. Незначне затуплення різальної крайки, яке відбувається вже через декілька хвилин кутерування, відразу погіршує якість подрібнення і підвищує енергоспоживання. Тому різання такими ножами у кутерах практично не застосовують. Краще поводитись себе прямі ножі з кутом між дотичною до кола та лезом  $60-90^\circ$ . Енергоспоживання при подрібненні такими ножами дещо більше, але якість подрібнення сировини краща. Однак подрібнення м'яса з деяким вмістом сполучної тканини у випадку незначного затуплення різальної крайки, також є проблематичним застосування цих ножів.

Для подрібнення сировини зі значним вмістом сполучної тканини найкраще застосовувати ножі з лезом, крайка якого окреслена по логарифмічній спіралі, евольвенті чи архімедовій спіралі. Високу якість подрібнення забезпечують ножі з лезами, побудованими по логарифмічній спіралі, але і споживання енергії у таких ножів максимальне. Найкращими у співвідношенні якості фаршу та енергоспоживання є ножі, у яких різальна крайка одночасно окреслена спіраллю Архімеда та логарифмічною спіраллю.

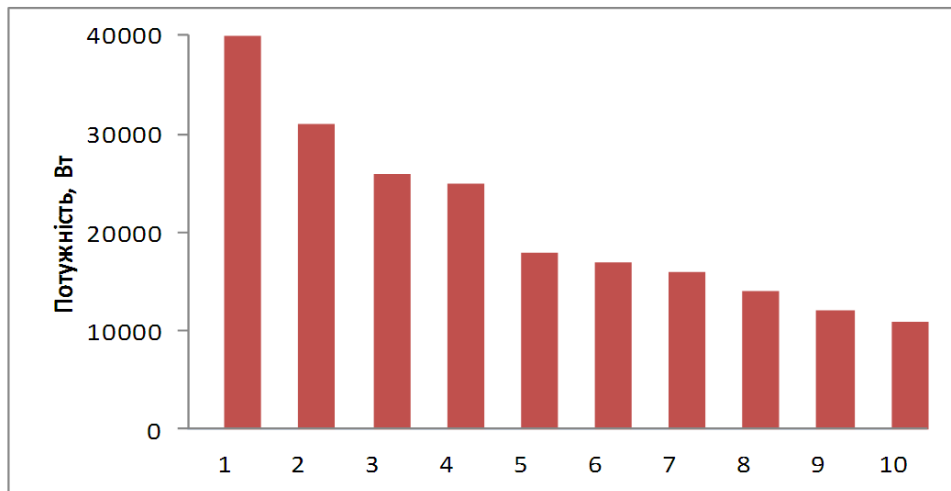


Рис. 6.18 – Залежність споживаної потужності від форми ножів: 1 – логарифмічна спіраль; 2 – евольвента; 3 – поєднання спіралі Архімеда та логарифмічної спіралі; 4 – спіраль Архімеда; 5 – поєднання спіралі Архімеда та логарифмічної спіралі і зменшена бічна поверхня; 6-10 – прямі ножі

Тертя ножів по сировині призводить до небажаного перегрівання сировини, що може спричинити денатурацію білків, надлишкове деформування фаршу та зниження його СМХ. Тому для ще більшого зменшення енергоспоживання за рахунок зменшення сили тертя варто застосовувати ножі зі зменшеною поверхнею бічних граней.

## 6.8. Прогнозування показників надійності м'ясоподрібнювальних машин

Корозійно-механічне зношування (КМЗ) деталей м'ясоподрібнювального обладнання описується закономірностями, що є функціями випадкових аргументів, тому що зовнішні чинники (стан і склад середовища, температура навантаження, швидкість ковзання), характеристики конструкційних та інструментальних матеріалів (твердість, межа міцності) і умови експлуатації є випадковими величинами. Тому прогнозування надійності м'ясоподрібнювальних машин повинно зводитись до визначення імовірності безвідмовної роботи і строку служби. При вирішенні цієї задачі необхідно спиратися на закономірності теорій імовірності та надійності [225, 239].

Можна припустити, що корозія і зношування (зміна параметру деякої визначальної деталі машини) відбуваються за лінійним законом:

$$X = K \cdot t, \quad (6.40)$$

де  $K$  - швидкість протікання процесу (корозії і зношування),  $t$  - час.

Найбільш характерний випадок, коли швидкість такого процесу підвладна нормальному закону, тому що вона залежить від великої кількості випадкових факторів. Виходячи з цього, можна записати:

$$f_0(k) = \frac{1}{\sigma_k \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(k-K_{cp})^2}{2\sigma_k^2}}, \quad (6.41)$$

де  $f_0(k)$  - густина імовірності;  $K_{cp}$  - середня швидкість зношування або корозії (зміни вихідного параметру  $X$ );  $\sigma_k$  - середнє квадратичне відхилення швидкості зношування або корозії. При  $X=X_{max}$  настає граничний стан, який визначає строк служби виробу  $t=T$ , як функцію випадкового аргументу  $K$  [188]:

$$T = \varphi(K) = \frac{X_{max}}{K} \quad (6.42)$$

Середній строк служби виробу

$$T_{cp} = \frac{X_{max}}{K_{cp}} \quad (6.43)$$

Важливо визначити ресурс обладнання, що піддається зношуванню і корозії за заданою імовірністю безвідмовної роботи. Розв'язок задачі полягає в знаходженні імовірності безвідмовної роботи  $P(T)$  по заданій функції  $f_0(K)$ . Для функцій випадкового аргументу в теорії імовірностей використовується формула [45]:

$$f(T) = f_0(\psi(T)) \cdot (\psi'(T)) \quad (6.44)$$

де  $\psi(T)$  - обернена функція  $\varphi(K)$ , і  $\psi(T) = X_{max} / T$ ,  $\psi'(T) = -(X_{max} / T^2)$  - похідна цієї функції. Підставляючи ці значення в (6.44) і роблячи перетворення, отримуємо :

$$f(T) = \frac{T_{cp}}{\gamma_k \sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{T^2} \cdot e^{-\frac{(T_{cp}-T)^2}{2\gamma_k^2 T^2}}, \quad (6.45)$$

де  $\gamma_k = \sigma_k / K_{cp}$  - коефіцієнт варіації (безрозмірна величина).

Для зручності розрахунків введемо безрозмірний час (в долях від  $T_{cp}$ ):

$$\tau = T / T_{cp} \quad (6.46)$$

Тоді формула прийме вигляд

$$f(\tau) = \frac{1}{\gamma_k \sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{\tau^2} \cdot e^{-\frac{(1-\tau)^2}{2\gamma_k^2 \tau^2}}, \quad (6.47)$$

де  $f(\tau) = f(T)$ ;  $T = \tau \cdot T_{cp}$ . Ця формула зручна тим, що густина імовірності є функцією лише одного безрозмірного параметру  $\gamma_K$ . Для визначення імовірності відмови  $F(T)$  необхідно проінтегрувати функцію густини імовірності:

$$F(T) = \int_0^T f(T) dT = \int_0^{\tau} f(\tau) d\tau = F(\tau) \quad (6.48)$$

Якщо ввести змінну  $Z = \frac{1-\tau}{\gamma_K \cdot \tau}$ , то даний інтеграл зводиться до функції Лапласа і, враховуючи, що ймовірність безвідмовної роботи визначається  $P_u(T) = 1 - F(t)$ , отримаємо:

$$P_u(T) = 0,5 + \Phi\left(\frac{X_{\max} - K_{cp} T}{T \cdot \sigma_K}\right), \quad (6.49)$$

де  $\Phi$ - нормована функція Лапласа.

Формулу (6.49) можна записати в іншому вигляді, виразивши через параметри  $X_{\max}$ ,  $K_{cp}$  і  $\sigma_K$ , які є вихідними у розв'язанні поставленої задачі.

Враховуючи залежності (6.43) і (6.46) отримаємо:

$$P_u(T) = 0,5 + \Phi\left(\frac{X_{\max} - K_{cp} T}{T \cdot \sigma_K}\right) \quad (6.50)$$

Розглянута схема розрахунку є дещо ідеалізованою, тому що не враховує розсіювання початкового параметру виробу (точність виготовлення, твердість матеріалу тощо). З урахуванням цих параметрів рівняння (6.40) запишеться так:

$$X = a + Kt, \quad (6.51)$$

де  $a$  - початковий параметр деталі.

Термін служби є функцією двох незалежних випадкових аргументів  $a$  і  $K$ :

$$T = \frac{X_{\max} - a}{K}, \quad (6.52)$$

У випадку розподілу аргументів  $a$  і  $K$  за нормальним законом параметр  $X$  для кожного значення  $t = T$  буде розподілений по такому ж закону з параметрами:

$$X_{cp} = a_0 + K_{cp} T; \quad \sigma_K = \sqrt{\sigma_a^2 + T^2 \cdot \sigma_K^2}, \quad (6.53)$$

де  $a_0$  - математичне сподівання;  $\sigma_a$  - середнє квадратичне відхилення випадкового параметру  $a$ .



$P_u(T)$  можна визначити, враховуючи, що імовірність безвідмовної роботи виробу дорівнює імовірності того, що параметр  $X$  при заданому  $t=T$  не вийде за межі максимально допустимого значення  $X_{\max}$ :

$$P_u(T) = I_{\text{мов}}(X \leq X_{\max}) \quad (6.54)$$

Тому імовірність безвідмовної роботи чисельно дорівнює площі під кривою густини розподілу  $f(x)$  в межах від  $-\infty$  до  $X_{\max}$ :

$$P_u(T) = \int_{-\infty}^{X_{\max}} \frac{1}{\sigma_K \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - x_{cp})^2}{2\sigma_K^2}\right) dx = 0,5 + \Phi\left(\frac{X_{\max} - x_{cp}}{2\sigma_K}\right) \quad (6.55)$$

Підставляючи в цю формулу (6.14) отримаємо:

$$P_u(T) = 0,5 + \Phi\left[\frac{X_{\max} - a_0 - K_{cp}T}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_K^2 \cdot T^2}}\right] \quad (6.56)$$

При  $a_0 = 0$  і  $\sigma_a = 0$  ця формула перетворюється в формулу (6.50).

Деталі технологічних машин, які працюють в технологічних середовищах м'ясопереробних виробництв, одночасно з поступовими відмовами мають і раптові. Причини виникнення останніх пов'язані не лише зі зміною стану деталей, але й з небажаним співвідношенням діючих чинників.

Побудова моделі раптової відмови пов'язана з аналізом умов експлуатації машини, режимів її роботи, можливістю виникнення екстремальних навантажень і активного впливу технологічного середовища. Імовірність безвідмовної роботи у цьому випадку описується експоненціальним законом:

$$P_g(T) = e^{-\lambda T}, \quad (6.57)$$

де  $\lambda$  - інтенсивність відмов.

При сумісній дії поступових і раптових відмов імовірність безвідмовної роботи може бути підрахована за теоремою множення імовірностей.

$$P(T) = P_u(T) \cdot P_g(T) \quad (6.58)$$

Використовуючи (6.56) і (6.57) отримаємо:

$$P(T) = \left[0,5 + \Phi\left(\frac{X_{\max} - a_0 - K_{cp} \cdot T}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_K^2 \cdot T^2}}\right)\right] \cdot e^{-\lambda T} \quad (6.59)$$

Таким чином, якщо відомі закономірності розподілу  $T_{cp}$ ,  $\sigma$ ,  $\lambda$ , то можна підрахувати імовірність безвідмовної роботи деталі, вузла чи машини в цілому.

Розглянемо приклад використання викладеної методики для розрахунку показників надійності чаші кутера у м'ясопереробному

виробництві, яка працює в корозійно-активному середовищі – м'ясному фарші з добавками солі і спецій.

Нехай відомі наступні вихідні дані:

– середня швидкість корозійно-механічного зношування чаші кутера (базової деталі)  $K_{cp}=1$  мм/рік;

– середнє квадратичне відхилення швидкості корозії  $\sigma_k = 0,07$  мм/рік;

– середнє квадратичне відхилення початкового параметру  $\sigma_a = 0,2$  мм;

З умов функціонування кутера визначена допустима величина корозійно-механічного зносу  $X_{max}=2$  мм (товщина захисного покриття на корпусі).

Є потреба розрахувати ресурс кутера по базовій деталі (чаші) при заданій імовірності безвідмовної роботи  $P(T)$  від 0,9 до 0,9999.

З формули (6.56) отримаємо для визначення  $T$  квадратне рівняння:

$$U_\alpha \cdot \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_k^2} \cdot T = X_{max} - a_0 - K_{cp} \cdot T \quad (6.60)$$

Порядок розрахунку полягає в тому, що для заданого значення  $P(T)$  по таблицях для квантилей нормального розподілення випадкових величин знаходимо відповідні значення  $U_\alpha$  та з рівняння (6.60) визначаємо ресурс  $T$ . При  $P(T) = 0,5$ , квантилі  $U_\alpha = 0$ , з врахуванням (6.60) і (6.52) отримаємо середній строк служби чаші кутера:

$$T_{cp} = \frac{X_{max} - a_0}{K_{cp}} \quad (6.61)$$

Таким чином, середній строк служби базової деталі (чаші) кутера дорівнює

$$T_{cp} = \frac{2 - 0}{1} = 2 \text{ роки}$$

Підставивши у формулу (6.60) значення вихідних даних і, розв'язавши квадратне рівняння відносно  $T$ , отримаємо формулу для розрахунку по даній квантилі:

$$T = \frac{K_{cp} X_{max} + \sqrt{K_{cp}^2 X_{max}^2 + (U_\alpha^2 \sigma_k^2 + K_{cp}^2) \cdot (U_\alpha^2 \sigma_a^2 - X_{max}^2)}}{K_{cp} - U_\alpha^2 \sigma_k^2} \quad (6.62)$$

Результати розрахунків зведемо в табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Залежність ресурсу чаші кутера від імовірності безвідмовної роботи

Імовірність безвідмовної роботи $P(T)$	Квантиль	Ресурс $T$ , років
0,9	1,282	1,701
0,99	2,326	1,476
0,999	3,090	1,319
0,9999	3,719	1,194

З наведених розрахунків виходить, що вибір ресурсу повинен бути достатньо точним, тому що невеликі його зміни можуть значно вплинути на імовірність безвідмовної роботи.

Запропонована методика розрахунку дозволяє на основі апріорної вихідної інформації про стан машин і можливі умови їх експлуатації розрахувати ресурс за необхідної ймовірності безвідмовної роботи, визначити які заходи будуть найефективнішим для підвищення надійності обладнання та кількісно оцінити значимість кожного.

### 6.9. Оцінка ефективності від впровадження результатів роботи

Методика і результати визначення економічної ефективності від використання нових і удосконалених процесів подрібнення, машин та інструментів наведені у додатку Я.6. Складові сумарної економічної ефективності наступні (табл. 6.3).

Економічний ефект отриманий від впровадження результатів теоретичних і експериментальних досліджень та нових технічних рішень на підприємствах ІПР НААН України, ПАТ «Полтавський машинобудівний завод», ТДВ «М'ясокомбінат «Ятрань», ТОВ «СТРИМ», «Елпотех», «Тирпласт», «СВІП ЛТД» (Україна); МП «ЖАЗ» і «КЕНЧ» (Киргизстан), склав 5906,1 тис. грн.

Таблиця 6.3. – Економічна ефективність

№ п/п	Об'єкти впровадження	Річний економічний ефект, тис. грн.
1.	Вовчок-кутер нової конструкції	1352,4
2.	Кутер з новим профілюванням ножів	1764,6
3.	Технологія заточування і зміцнення різальних інструментів вовчків і кутерів	61,158
4.	Технологія плазмового напилення ножів вовчків і кутерів	2727,9
	<b>Всього:</b>	<b>5906,1</b>

Зокрема впровадженні: механічні та електричні моделі м'ясопродуктів і класифікація подрібнювальних процесів за станом напруженого стану та структурою матеріальних потоків сировини; математичні моделі, які описують процеси подрібнення м'яса з різним хімічним складом і дозволяють їх оптимізувати напрямки створення енергоефективного обладнання; модеь корозійно-механічного зношування обладнання галузі і способи захисту від нього та методика оцінки рівня надійності машин; нові подрібнювальні машини, деталі яких

зміцнені електрофоретичними і евтектичними покриттями та покриттями з ефектом вибіркового переносу міцелів міді; автоматичний пенетрометр для визначення СМХ фаршів у потоці, що забезпечує їх високу якість продукції і зменшує енергоємність механічної обробки; технологія плазмового зміцнення деталей м'ясоподрібнювальних машин і ефективного заточування різальних інструментів кругами з кубічного нітриду бору; методика профілювання лез різальних інструментів на основі математичних кривих і вибору сталей для їх виготовлення; методика вибору оптимального терміну кутерування фаршів для сирокочених ковбас для зменшення терміну сушки; подрібнювачі м'яса з еластичними шнеками та негайним видаленням фаршу з зони різання.

Результати досліджень включені у написані авторами підручники і навчальні посібники з грифом МОН України, лекційні курси, та лабораторні практикуми для студентів, які використовують у НУБіП України та інших вищих навчальних закладах сільськогосподарського та харчового профілю.

### **Висновки до розділу 6**

1. Обґрунтовані раціональні конструктивні параметри шнекових подрібнювачів.

2. Розроблені нові м'ясоподрібнювальні машини і обґрунтовані геометричні параметри різальних інструментів.

3. Визначені показники міцності і питомі енергії руйнування м'яса у квазікрихкому, високоеластичному і пластичному станах.

4. Розроблені математичні моделі деформування і руйнування м'яса, які описують процес з урахуванням температури, швидкості різання та геометричних параметрів інструментів.

5. Запропоновані комп'ютерні програми для забезпечення автоматизованого проектування енергоощадних подрібнювальних машин.

6. Удосконалена машина для подрібнення шпику, що забезпечує якісне формоутворення частинок.

7. На основі математичних кривих синтезовані високоефективні кутерні ножі та визначені області їх застосування в залежності від характеристик сировини.

8. Доведено, що прогнозувати показники надійності м'ясоподрібнювальних машин доцільно за критеріями корозії і зношування.

9. Оцінена економічна ефективність від впроваджувальних робіт, яка складає близько до 6,0 млн. грн.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На підґрунті аналізу і систематизації м'ясоподрібнювальних процесів, принципів дії та конструкцій вітчизнаних і зарубіжних машин та оцінки їх взаємодії з технологічними середовищами галузі, в роботі отримані нові наукові результати, які розширюють уявлення про закономірності формування м'ясних дисперсних систем з необхідними фізико-хімічними і реологічними властивостями, що дозволило розробити теоретичні основи, експериментально обґрунтувати і практично реалізувати новий концептуальний підхід у вирішенні проблеми підвищення якості продукції, ефективності використання і зносостійкості обладнання, покладений в основу його класифікації, математичного моделювання процесів, конструктивних і технологічних рішень, вибору кінематичних і динамічних параметрів різальних вузлів, сталей і зносостійких покриттів для їх зміцнення, що забезпечує енерго- і матеріалоощадність при подрібненні, високу якість і вихід продуктів та є науково-технічною основою для створення нового технологічного обладнання з підвищеним ресурсом.

Виконані дослідження дають можливість зробити наступні висновки і рекомендації:

1. Оцінка поведінки м'яса в процесах його подрібнення може частково ґрунтуватися на математичному апараті і методах фізико-хімічної механіки хімічних полімерів. Діаграми його деформації та інші механічні залежності математично доцільно описувати з застосуванням механічних чи електричних реологічних моделей.

2. Оптимальний термін подрібнення фаршу на різних м'ясоподрібнювальних машинах залежить від критерію хімічного складу м'яса та узагальнених кінематичних характеристик машин. Ступінь подрібнення фаршу прямо впливає на його якість, тривалість сушки сирокочених і втрати маси при термообробленні варених ковбас, а керовані режими фаршеприготування дозволяють отримувати продукти із заданими СМХ.

3. Розроблений метод контролю СМХ фаршу і готових виробів з використанням номограм та спосіб і його апаратне забезпечення для експрес-оцінки СМХ фаршів в процесі подрібнення.

4. Виявлений взаємозв'язок міцностних (граничне напруження зрізу) енергетичних (робота зрізу і зминання), компресійних (відносна об'ємна деформація, модуль пружності, період релаксації) і зсувних

(граничне напруження зсуву, пластична і ефективна в'язкість) характеристик фаршу і готових виробів та ступеня подрібнення сировини.

5. Запропонований математичний апарат, який дозволяє прогнозувати якість (консистенцію) готової продукції за СМХ фаршу, що створює передумови для розробки нового асортименту м'ясних виробів з наперед заданими властивостями та дозволяє забезпечити оптимальний термін подрібнення на машинах з різною різальною здатністю.

6. Проведений аналіз можливих потоків подрібнюваної сировини та розроблена математична модель їх гідродинамічної структури, особливості якої визначають ефективність роботи подрібнювачів. За структурою потоків всі подрібнювачі розділені на 9 типів і проведена оцінка їх енергетичної ефективності з застосуванням запропонованого критерію, що може бути використаний для порівняння будь-яких видів устаткування.

7. Розроблені математичні моделі вільного і стиснутого подрібнення м'яса дозволили знизити енергозатратність процесів, обмежити надмірну силову дію робочих органів на сировину за рахунок надання їм раціональних геометричних параметрів та еластичних властивостей, що забезпечило збереження нативних властивостей м'ясопродуктів у процесі фаршеприготування.

8. Розроблені узагальнена математична модель процесу подрібнення м'яса та моделі руйнування крихких, високоеластичних і пластичних м'ясопродуктів, що є підґрунтям для вибору і проектування технологічного обладнання.

9. Експериментально досліджений вплив технологічних середовищ галузі на дислокаційну структуру і спрацювання деталей м'ясоподрібнювальних машин. У кислих м'ясних середовищах можуть добре працювати деталі подрібнювальні інструменти з достатнім рівнем пластичності, а у лужних – з достатнім рівнем твердості. Перспективні для зміцнення деталей та інструментів евтектичні покриття, які поєднують названі властивості та зносостійкість при переробці сировини з різним терміном автолізу.

10. Регулювати опір спрацюванню деталей машин для подрібнення м'ясної сировини з різною глибиною автолізу можна за рахунок їх електричного зарядження, або підбором захисних покриттів, що мають необхідний рівень механічних характеристик та відповідні електрохімічні характеристики, що підтверджує розроблена математична модель

корозійно-механічного зношування. Для підвищення зносостійкості вузлів тертя доцільне також застосування ефекту вибіркового переносу.

11. Найбільш перспективними для виготовлення інструментів подрібнювальних машин є швидкоріжучі, а також середньо- і високохромисті сталі, а загострювати леза доцільно кругами з кубічного нітриду бору.

12. Запропоновані нові м'ясоподрібнювальні машини, обґрунтовані геометричні параметри різальних інструментів, способи їх зміцнення та визначені області застосування в залежності від фізико-механічних характеристик сировини. Розроблені математичні моделі для визначення питомих енергій деформування і руйнування м'яса у різних станах, які описують процес з урахуванням температури, швидкості різання і геометричних параметрів інструментів та запропоновані комп'ютерні програми для автоматизованого проектування обладнання.

13. Розроблена методика визначення і прогнозування показників надійності м'ясоподрібнювальних машин.

Результати роботи впроваджені з економічним ефектом близько 6 млн. грн у науково-дослідних, проектних і виробничих організаціях, включені у підручник і навчальні посібники та застосовуються у навчальному процесі ВНЗ України.



## ЛІТЕРАТУРА

1. Bakal A. Heat transfer during freezing and thawing of foods: [Текст] / A. Bakal, K. Hayakawa. - New York: Adv. Food Res. 20, 1973. - 217-256 p.
2. Borisov Y., Borisova A., Petrov S. Structure and properties of coatings deposited by supersonic air-gas plasmas spraying // Proc. of the 14th Intern spray conf. Kobe.- 1995.-P 857-862.
3. Bromark M. Influence of substrate surface topography on the erosion resistance of TiN coated tool steels / M. Bromark, M. Larsson, P. Hedenqvist, M. Olsson, S. Hogmark // Tribologia. - 1992. - V.1 1, №2. - P.153-160.
4. Europäische Patentschrift EP 0573759 B1, B02 C18/38. Groyinger, Horst Herbert; Haack, Eberhard. Zufuhrregelung eines Fleischwolfes. 02.07.1997.
5. Hamm R. Die Bedeutung des Wasserbindungsvermögens des Fleisches bei der Brühwurstherstellung. - Die Fleischwirtschaft, 1973, №1, s.273-281, 373-381.
6. Kapsalis J. G. Texture Stud: [Текст] / J.G. Kapsalis, T.E. Walker, M.I. Wolf. - 1970. - № 1. - 464 p.
7. Klocke F. Coated Tools for Metal Cutting - Features and Applications: [Текст] / F. Klocke, T. Krig // Annals of the CIRP. - 1999. - Vol. 48/2. - P.515-525.
8. Kowstubhan M.V. On the tool - life equation of TiN - coated high speed steel tools / M.V. Kowstubhan, P.K. Philip // Wear. - 1991. - V.143, №2. - P.267-275.
9. Meclunache M., Haddouche K., Youbi Z. New modeling approach of the cutting force in turning (Моделирование сил резания при точении) // Tribologia. - 2001.-V.20,№3.-P. 36-40.
10. Patentschrift DE 19637665 C2, B02 C18/30. Mossmer, Michael; Haack, Eberhard. Vorsatz- und Zusatzgerät für Zerkleinerungsmaschinen, 17.03.01.
11. Sooblom, Peter O. On low-velocity impact testing of composite materials: [Текст] / Sooblom, Peter O., Hartness, J. Timothy Cordell, Tobey M. // J. Compos, mater. - 1988. - с. 1. - P.30-52.
12. Tonshoff H.K. Einfluss der Substratbearbeitung auf das Einsatzverhalten beschichteter Zerspanwerkzeuge / H.K. Tonshoff, H.-G. Wobker, A. Mohlfeld, A. Fritsch // HTM: Harter.-techn. Mitt. - 1996. - V.51, №4. - P.207-213.
13. Tool coating // Cutt. Toll Engineering. - 2001 - V.53, №3 - P. 66.

14. Vincent M. Etude experiaientale et theorique de l'orientation de fibres dans des ecoulements de polymeres charges: [Текст] / M. Vincent, J.F. Agassant. - Paris, 1984. - 125 p.

15. Wirth F. Der Fettgehalt vom Fleischwaren, technologisohe Mogliohkeit der Kalorienreduzierung.- Die Fleischwirtschaft, 1972, №8, s. 1006-1019.

16. Wirth F. Die technologisohe Funktion der Fette in feinzerkleinerten Fleischwaren.- Die Fleischwirtschaft, 1972, №5, s.605-609.

17. А. с. СССР № 1058607, МКИ кл. В 02 С 18/30 Приёмная решётка / Филиппов В. С.-1983.

18. А.с. № 1050737. Г.Х. Випенский, В.М. Герасимов, А.М. Нестеренко / Мясорубка. - опубликовано 30.10.83 г. Открытия. Изобретения, Бюл.№ 40. - с. 28.

19. А.с. № 967450. Устройство для измельчения мяса / М.Н. Клименко, А.И. Усанов, В.И. Нечипоренко. - Опубл. 1982, Бюл. № 39.

20. А.с. №686765. П.Ф. Михайленко, В.В. Пукас И.В. Петко / Режущий блок шнековой мясорубки. - Опубликовано 25.09.79 г. Открытия изобретения, Бюл. № 33. - с. 7.

21. Абдурахимов Т.У. Исследование восстановления шеек валов неподвижных соединений тракторов и сельскохозяйственных машин контактным электроимпульсным покрытием лентой: Автореф. дис....канд. техн. наук. - М, 1984.-20 с.

22. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович. - М.: Физматгиз. – 343 с.

23. Акимов Г.В. Теория и методы исследования коррозии металлов. М-Л, изд. АН СССР, 1985, 414 с. с ил.

24. Александер Р. Биомеханика: Пер. с английского [Текст] / Р. Александер. - М.: И-во МИР, 1980. - 340 с.

25. Алексеев В.М. Оборудование для измельчения мяса: [Экспресс-информация] / В.М. Алексеев, Н.Г. Бандуркин, Н.Ф. Генералов. - М.: ЦНИИТЭИмясомолпром, 1984. - Сер. Мясная промышленность. Зарубежный опыт. Вып. 11. - 177с.

26. Алёхин В.Д. Некоторые особенности микропластической деформации поверхностных слоев полупроводниковых кристаллов при температурах ниже и выше температурного порога хрупкости [Текст] / В.Д. Алехин, М.Л. Шоршоров, Г.Г. Алиев и др. // В сб. "Металлофизика", К., «Наукова думка», 1973. - вып. 44, С.41-42.

27. Анатомия и гистология мясопромышленных животных: [Текст] / Н.А. Лебедева, А.Я. Бобровский, В.Н. Писменская и др. - М.: Агропромиздат, 1995. – 368 с.

28. Антипов С.Т. Машины и аппараты пищевых производств / С.Т. Антипов, И.Т. Кретов, А.Н. Остриков, В.А. Панфилов, О.А. Ураков; УО "БГАТУ"; под ред. В. А. Панфилова, В. Я. Груданова. - Минск: Минсельхозпрод, 2008. – 580 с.

29. Антонюк В.С. Основи підвищення працездатності різального інструменту шляхом формування зносостійких покриттів дискретного типу [Текст] / Дис...докт. техн. наук, спец. 05.03.01 / В.С. Антонюк. - К.: НТУУ "КПІ", 2006. - 309с.: с іл.

30. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. - М.: Машиностроение, 1980.

31. Аронов В.А., Вернадский Л.И., Костецкий Б.И. Экспериментальное исследование физической модели нормального изнашивания металлов. В сб. "Проблемы трения и изнашивания", К., "Техніка", 1972, вып.2, с.63-89.

32. Бакунц Г.В. Исследование процесса механической обработки при куттеровании и перемешивании с целью изыскания способа определения структурномеханических свойств фарша в потоке. Дис...канд. техн. наук - М.: МТИШП, 1987, - 178 с.

33. Балтер М.А. Упрочнение деталей машин: [Монография] / М.А. Балтер; 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1988. - 184с.

34. Баранов А.Ф. Исследование структурно-механических свойств мяса говядины: Дис... канд. техн. наук 05.18.12 [Текст] / А.Ф. Баранов. - М.: МТИММП, 1995. - 180 с.

35. Белухин В.А. Конструктивные особенности промышленных волчков / В.А. Белухин, С.Г. Юрков, СВ. Божьев // Мясная индустрия. - 2006.-№8.-С. 37-43.

36. Бершадский Л. И. О самоорганизации и концепциях износостойкости трибосистем // Трение и износ. - 1992. - Том 13, № 6. - С. 1077-1094.

37. Биргер А.И. Расчет на прочность деталей машин: Справочник [Текст] / А.И. Биргер, Б.Ф.Шорр, Г.Б. Иосилевич; 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1989. - 702 с.

38. Бобровский В. Электро-диффузионный износ инструмента и борьба с ним. М., "Московский рабочий", 1979, 102 с. с ил.

39. Боуден Ф. Влияние электрического потенциала по поверхности на трение [Текст] / Ф. Боуден // Сборник "Трение и граничная смазка". - М.:, 1953. - С.67-73.

40. Боуден Ф. Трение и смазка твердых тел: [Монография] / Ф. Боуден, Д. Тейбор; Пер. с англ. Под ред. д-ра техн. наук И. В. Крагельского. - М.: Машиностроение, 1978. – 543 с.: с ил.

41. Бранков Г. Основы биомеханики: Перевод с болг. В. Джупанова [Текст] / Георги Бранков. - М.: Из-во МИР, 1991. - 254 с.

42. Бренч А.А. Повышение эффективности процесса куттерования мясного сырья на основе разработки новых конструкций ножей [Текст]: Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.18.12. – Минск: 2004. – 24 с.

43. Броек Д. Основы механики разрушения: перевод с английского [Текст] / Д. Броек. - М.: Высшая школа, 1990. - 366 с.

44. Бубыренко В.К. Исследование волчков с целью повышения их эффективности и: долговечности деталей рабочих органов: Дис. канд. техн. наук. - М., 1997.

45. Вайнберг А.А., Котляр Л.И. Эксплуатационная надежность оборудования зерноперерабатывающих предприятий.–М.: Колос, 1971. - 207 с.

46. Васильев И.В. Изнашивание металлов и изменение электродных потенциалов при трении в щелочных средах. – Коррозия и износ металлов, сб., М.: Машгиз, 1971 / Труды НИИХИММАШ, вып. 37, с. 111-112.

47. Васильев И.В. К методике испытания материалов на изнашивание при трении в агрессивной среде. – Трение и износ в машинах: сб. ТХУ, М.: Изд-во АН СССР, 1972, т. 15, с. 59-77.

48. Венстрем Е.К., Ребиндер П.А. Электрокапиллярный эффект облегчения твердости металлов. М.: АН СССР, 1949, с. 68-70.

49. Википедия – свободная энциклопедия: [Электронный ресурс]. - <http://www.wikipedia.org/>.

50. Виноградов И.Э. Физические методы исследования противозадирных присадок к маслам. – Методы оценки противозадирных и противоизносных свойств смазочных материалов. М.: Наука, 1969, с. 21-24.

51. Виноградов Я.И. Использование вискозиметрии для расчета фаршепроводов. [Текст] / Я.И. Виноградов, А.В. Горбатов, В.Д. Косой - В кн.: ХШ Европейский конгресс научных работников мясной промышленности. - М.: Пищевая пром-сть, 1990, с. 406-410.

52. Воловик Е.Л. Восстановление и упрочнение деталей оборудования перерабатывающих отраслей агропромышленного комплекса. Обзорная информация./Е.Л.Воловик, В.А.Михайлов // М.: АгроНИИТЭИИТО, 1999.

53. Волькенштейн В.В. Физико-химия поверхности полупроводников: [Монография] / Ф.Ф. Волькенштейн. - М.: Наука, 1983. – 399 с.

54. Восстановление и защита, поверхностей деталей машин перерабатывающей промышленности //Обзорная информация. - М.: АгроНИИТЭИИТО, 1992. -25 с.

55. Восстановление и упрочнение деталей оборудования перерабатывающих отраслей АПК. Обзорная информация. - М.: АгроНИИТЭИПП, 1999.-45 с.

56. Генин Э.С. Основные направления создания оборудования для мясной промышленности: [Текст] / Э.С. Генин. - Мясная индустрия СССР, 1997. - №6. - 1-4с.

57. Герасименко В. В. Коррозия сталей в нейтральных водных средах: [Монография] // В.В. Герасименко. – М. : Металлургия, 1991. – 192 с.

58. Гмотинский В.Г. Теоретические основы инженерного прогнозирования: [Текст] / В.Г. Гмотинский, Г.И. Флиорент. - М.: Наука, 1983. - 303 с.

59. Гольберг И.И. Механическое поведение полимерных материалов: [Текст] / И.И. Гольберг. - М.: Химия, 1980. - 190 с.

60. Гольденблат И.И. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов: [Текст] / И.И. Гольденблат, В.А. Копнов. - М.: Машиностроение, 1988. - 192 с.

61. Горбатов А.В. Влияние длительности куттерования и влажности на технологические характеристики фарша и готовых изделий / А.В.Горбатов, В.Д. Косой, Б.Т.Спирин [Текст]/. - М.: ЦНИИТЭИмясомолпром, 1989, с.3-13 ; 30-49.

62. Горбатов А.В. Влияние некоторых технологических факторов на реологические свойства колбасного фарша и готовых изделий [Текст]/ А.В. Косой, В.Д. Косой, В.В. Елкин / Мясная индустрия СССР, 1986, № 1, с. 23-26.

63. Горбатов А.В. Влияние продолжительности куттерования и влагосодержания фарша на выход вареных бесшпиковых колбас. / А.В. Горбатов, В.Д. Косой, В.В. Елкин - Мясная Индустрия СССР, 1975, № 2, с. 37-40.

64. Горбатов А.В. Гидравлика и гидравлические машины для вязкопластичных масс [Учебное пособие] / А.В.Горбатов, В.Д. Косой, Я.И. Виниградов. - М.: МТИММП, 1988. - 74 с.

65. Горбатов А.В. Реология мясных и молочных продуктов: [Текст] / А.В. Горбатов. . - М.: Пищ. пром-сть, 1989. - 384 с.

66. Горбатов А.В., Косой В.Д. Исследование структурно механических свойств колбасных фаршей при различных влажностях и степени измельчения [Текст] / А.В. Горбатов, В.Д. Косой - В кн. : Труды межвузовской конференции " Новые физические методы в пищевой промышленности ". - М.:, 1977, с. 149-150.

67. Горюнов Ю.В., Перцов Н.В., Сулим Б.Д. Эффект Ребиндера. М.: Наука, 1976. 128 с.

68. Горяев В.В. Совершенствование конструкций и методики расчета режущего механизма волчков: [Текст] // Дис....канд. техн. наук. - М.: МТИММП, 1999. - 185 с.

69. Граф В.А. Оборудование для колбасного производства: экспресс-информация. АгроНИИТЭИММП. Сер. Мясная промышленность. Зарубежный опыт. 1996. -Вып. 20. — С. 1-15.

70. Груданов, В. Я. Новые куттерные ножи для измельчения мясного сырья / Груданов В.Я., Иванова И.Д., Бренч А.А. / Мяс. пром-сть. - 2003. - № 4 - С. 33-35.

71. Гутман Э.М. Механохимические явления при пластической деформации металла. «Порошковая металлургия», 1980, № 4, с. 80-87.

72. Гутман Э.М. О кинетике катодных и анодных реакций деформированной стали в кислых электролитах [Текст] / Э.М. Гутман // Физика, химия, механика материалов. - 1978. - Т.4, № 1. - С.87-88.

73. Гутуев М.Ш. Ресурсосбережение при восстановлении и изготовлении режущего инструмента /М.Ш.Гутуев, И.Л.Воротников, А.Е.Кисилев //Материалы научно-практической конференции посвященной 70-ти летию МГАУ. Часть 3. -М.:МГАУ, 2000. – 168 с.

74. Гутуев М.Ш. Технологические инновации в сфере восстановления и упрочнения режущего инструмента перерабатывающего оборудования /М.Ш.Гутуев, О.Л.Воротников, // Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья: - 2002. - №6. - с. 75-76.

75. Даурский А.Н., Мачихин Ю.А., Хамитов Р.И. Обработка пищевых продуктов резанием. – М.: Пищевая промышленность, 1999. – 216 с.

76. Даурский, А. Н. Резание пищевых материалов / А. Н. Даурский, Ю. А. Мачихин. - М. : Пищ. пром-сть, 1990. - 240 с.

77. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. М., "Наука", 1985, 278 с. с ил.

78. Динамическая диаграмма «напряжение - деформация» для мягких коллагенсодержащих материалов: [Текст] / Ивашов В.И., С.Г. Юрков, Б.Н. Дуйденко и др. // Мясная индустрия СССР. - 1992. - №6. - С.39-41.

79. Дорожкин Н.Н. Упрочнение и восстановление деталей машин металлическими порошками / Н.Н.Дорожкин. - Минск; Наука и техника, 1985.-152с.

80. Дорохов В.П. Разработка рационального режима процесса измельчения мясного сырья при получении фарша для сырокопченых колбас: [Текст] Диссертация на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / В. П. Дорохов. - М.: МГУПБ, 2006. -198 с.

81. Евдокимов В .Д., Семенов П.И. Экзоэлектронная эмиссия при трении. М., "Наука", 1983, 182 с. с ил.

82. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел: [Монография] / Т. Екобори. - М.: Металлургия, 1981. – 408 с.

83. Желиговский В.А. Экспериментальная теория резания лезвием / В.А. Желиговский. - М.: Труды МИМЭСХ, 1970. - Вып. 9. - 27 с.

84. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов: [Учебное пособие] / Н.П. Жук. - М.: ООО ТИД "Альянс", 2006. – 472 с.: с ил.

85. Зависимость качества фарша и вареных колбас от остаточного давления при куттеровании / Н.К.Журавская, В.И.Ивашов, Е.И. Титов и др. - Мясная Индустрия СССР, 1991, Л 7, с. 31-33.

86. Зайцев В.А., Ложкин Л.Н., Скорчеллетти В.В. и др. Влияние напряжений на электродный потенциал меди. ЖПХ, 1992, № 3, с. 535-538.

87. Зайцев В.А., Ложкин Л.Н., Скорчеллетти В.В. Изучение влияния изменения электродного потенциала при деформации на коррозионное растрескивание. Тезисы докладов УП Всесоюзной конференции по коллоидной химии и физико-химической механике. Минск, АН СССР, 1987, вып. Е, с. 98.

88. Заявка № 4848518 Сварочный электрод для контактной приварки материалов. В.М.Хатеев, В.А.Полуян, А.В.Поляченко. В 23 К 11/30.

89. Зинко Б.М. Исследование износостойкости деталей технологического оборудования сахарных заводов, упрочненных пластическим деформированием поверхностного слоя: Автореф. дис..канд. техн. наук [Текст] / Б.М. Зинко. - К.: КТИПП, 1969. - 31с.

90. Ивашов В.И., Чижикова Т.В., Юрков С.Г. и др. Новое в конструировании волчков. // Обзор информация М.: АгроНИИТЭИ мясомолпром, 1998.- 48 с.

91. Ильюшин А.А. Пластичность, основы общей математической теории: [Текст] / А.А. Ильюшин. - М.: Изд-во АН СССР, 1983. - 180 с.

92. Интенсификация процессов и защита оборудования пищевых производств: [Монография] / Г.П. Тищенко, Н.Д. Хоменко, В.Ю. Сухенко, П.П. Ермаков, Ю.Г. Сухенко; под ред. профессора Ю.Г. Сухенко. – К.: ДІА, 2006. – 224 с.

93. Каменева А.Л. Улучшение эксплуатационных характеристик инструмента путем нанесения износостойких покрытий / А.Л. Каменева, А.М. Ханов, В.Ф. Маточкин // Сб. "Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов": (Сборник докладов 2-й Международной конференции «ОТТОМ-2»). - Харьков: ННЦ ХФТИ, ИПЦ «Контраст», 2001. - С.118 - 122.

94. Карпенко Г.В. Про фізико-хімічну механіку металів: [Монографія] / Г.В. Карпенко. – К.: Наукова думка, 1983. - 174 с.

95. Карташев Э.М., Процессы разрушения полимеров в хрупком и квазихрупком состоянии: [Текст] / Э.М. Карташев, Г.М. Бартенев // Высокомол. соед. – 1991, 23А. - № 4. - С. 904-911.

96. Кафаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии: [Текст] / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов. - М.: Наука, 1976. - 500 с.

97. Киркач И.Ф., Баласанян Р.А. Расчет и проектирование деталей машин - Х.: Висш. шк. Изд-во при Харьков. ун-те, 1987. - Ч. 2.

98. Кирюткин Г.В. Мойка и дезинфекция технологического оборудования предприятий молочной промышленности [Текст]: Учебник / Г.В. Кирюткин, В.В. Молочников. - М.: Пищевая промышленность, 1996.- 126с.

99. Кіндрачук М.В. Підвищення адгезійнокогезійної міцності газотермічних покриттів трибо технічного призначення дискретним оплавленням та термоциклюванням лазером: [Текст] / М.В. Кіндрачук, Ю.Г. Сухенко, О.М. Бялик // Конструкційні та функціональні матеріали: матеріали міжнар. конф. - Львів, 1997. - С.249.

100. Клименко М.Н. Влияние скорости измельчения мяса на конечную температуру измельченного продукта: [Текст] / М.Н. Клименко // Сб. науч. тр. . - М. : МТИММП, 1989. - С.23-29.



101. Клименко М.Н. Исследование структурно-механических свойств мяса: [Текст] / М.Н. Клименко, А.И. Пелеев; Изв. Вузов СССР. - М.: Пищевая технология, 1986. - №2. - 310 с.
102. Клименко М.Н. Оценка качества среза пищевых продуктов: [Текст] / М.Н. Клименко, И.Н. Лебедев // Пищевая промышленность: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1993.- Вып. 29. - С. 25-27.
103. Клименко М.Н. Развитие теории резания мяса и совершенствование машин для измельчения сырья в производстве колбасных изделий: Дис...д-ра. техн. наук [Текст] / М.Н. Клименко. К.:, 1990 - 380 с.
104. Климов С.В. Электродуговая металлизация при восстановлении деталей и коррозионной защите металлоконструкций / С.В.Климов // Госагропром СССР - М.:ЦНИИТЭИ, 1995. - 11с.
105. Коломейцев А.Г. Опыт восстановления деталей газотермическими методами. /А.Г. Коломейцев, И.Г. Голубев, В.И. Свищев // Обзорная информация. М.: ЩИИТЭИ, 1985. – 38 с.
106. Комиссаров С.С. Исследование процесса измельчения мясного сырья в волчках и разработка ножевых головок : [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.18.12. / С.С. Комиссаров. - М., 2003. – 159 с.
107. Комплексное использование рыбного и растительного сырья для создания продуктов повышенной пищевой и биологической ценности: [Текст] / А.Б. Роговая, Ж.Б. Левинтон, Т.Д. Химии, Е.А. Ятченко. - М.: Питание: здоровье и болезнь, 1990. - 170 с.
108. Конструирование и изготовление режущего инструмента: [Текст] / Под ред. Н.В. Успенского. - М.: Машгиз, 1974. - 604 с.
109. Кособудский В.А. Механизм накопления остаточных напряжений с высоким градиентом в поверхностных слоях обкатываемых деталей машин: [Текст] / В.А. Кособудский, В.Г. Динзвич // Детали машин: научн. сб. - К.: Техніка, 1992. - Вип. 15. - С.75-77.
110. Косой В.Д. Инженерная реология в производстве колбас: [Текст] / В.Д. Косой, А.Д. Малышев, С.Б. Юдина. - М.: Колос, 2005. - 264 с.
111. Косой В.Д. Научные основы совершенствования и оптимизации процессов производства вареных колбас методами инженерной реологии. Дис...д-ра. техн. наук [Текст] / В.Д. Косой. - М.: МГУПБ, 1994. – 544 с.
112. Косой В.Д. Совершенствование процесса производства варенных колбас: [Текст] / В.Д. Косой. - М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1993. - 272 с.

113. Костецкий Б.И. Механохимические процессы при граничном трении: [Текст] / Б.И. Костецкий, М.Є. Натансон, Л.Л. Бершадский. - М.: Наука, 1982. - 170с.: с ил.

114. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении: [Текст] / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов [и др]; под ред. Б. И. Костецкого. - Киев: Техніка, 1986. - 296 с.

115. Костецкий Б.И. Процесс схватывания металлов и критерии оценки его интенсивности / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский // Проблемы трения и изнашивания. - К.: Техніка, 1982. - вып. 2. - С.74-77.

116. Костецкий Б.И., Бармашенко А.И., Славинская Л.В. Роль структуры и ориентации монокристаллов в формировании процесса внешнего трения. В сб. "Металлофизика", К.: "Наукова думка", 1982, вып.40, с. 24-37.

117. Костецкий Б.И., Дяченко Ю.П., Артемьев Ю.И. Разрушение металлов при трении скольжения в связи с типом их кристаллической решетки. В сб. "Проблемы трения и изнашивания", К.: "Техніка", 1983, вып. 4, с. 64-66.

118. Костецкий Б.И., Лозовский В.Н. Факторы, определяющие вероятность возникновения схватывания и окисления металлов при трении. ФХШ, 1978, т. 4, Л 5, с. 54-57.

119. Крагельский И.В. Некоторые задачи науки о трении, В об. "Проблемы трения и изнашивания", К., "Техніка", 1981, вып. I, с. 11-17.

120. Кузьмин В.В. Совершенствование процесса резания мясного сырья на основе математического моделирования формы режущих инструментов [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12. С-Петербург.: 2008 с. 129 с ил.

121. Кукшин В.К. Износостойкость и режущие свойства ножей и решеток волчков изготовленных из различных сталей /В.К.Кукшин, Г.А.Прейс, А.И. Некоз // Мясная индустрия СССР. - 1972.- № 4. – С. 94-99.

122. Кукшин В.К. Влияние твердости закаленных и цементированных сталей на износостойкость в растворе моделирующем мясную среду /В.К.Кукшин, Г.А.Прейс // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 1978 - №5.

123. Кукшин В.К. Исследование режущих свойств и стойкости ножей волчков с различными геометрическими параметрами / В.К. Кукшин, Г.А. Прейс, А.И. Некоз // Изв. вузов. Пищ. технология. - К., 1972. - №1. - С.114–118.

124. Кулешев Б.В. Исследование импульсного резания и структурно-механических свойств костной ткани с целью разработки соответствующего оборудования: Дис...канд. техн. наук 05.18.12 [Текст] / Б.В. Кулешев. - М.: МТИММП, 1989. - 194 с.

125. Кулманова Н. Механические свойства говяжьего мяса при замораживании [Текст] / Н. Кулманова // Мясная индустрия. - М., 1969. - №1. - С.33-34.

126. Лихтман В.И., Щукин Е.Д., Ребиндер П.А. Физико-химическая механика металлов. М., изд. АН СССР, 1982, 303 с. с ил.

127. Лобарский И.М. Упрочнение и разупрочнение при трении: [Текст] / И.М. Лобарский // Проблемы трения и изнашивания. - К.: Техніка, 1991. - вып. 1. - С.27-34.

128. Лысов В.С. Исследование вакуумного куттерования с целью разработки соответствующего оборудования. : Автореф. дис... канд.техн.наук. -М.: 1989, -23 с.

129. Любарский И.М. Упрочнение и разупрочнение при трении. В сб. "Проблемы трения и изнашивания", К., "Техніка" 1981, вып.1,с.27-34.

130. Максимов Д.А. Исследование процесса истечения мяса через решетку волчка: [Текст] // Д.А. Максимов, И.М. Тамбовцев, О.И. Якушев // Проблемы совершенствования холодильной техники и технологии: Сборник научных трудов. Выпуск №4 – М.: МГУПБ, 2008. – С.137 – 141.

131. Максимов Д.А. Конструктивные особенности современных волчков / Д.А. Максимов, О.И. Якушев // Мясная индустрия. - 2007. — №11. -С. 404

132. Максимов Д.А. Разработка адаптированного подающего гибкого рабочего органа в волчках [Текст] Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13. М.: 132 с. с ил.

133. Масабуми Я. Строение и свойства слоев, полученных при азотировании стали: [Текст] / Я. Масабуми // Дэнки сэйко. - 1978. - т.49, № 1. - С.35-42.

134. Мачихин Ю.А. Инженерная реология пищевых материалов: [Текст] / Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин. - М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1989. - 216 с.

135. Методы измерения в электрохимии. – Том. 1. Пер с англ. / В.С. Маркина, В.Ф. Пастушенко. – под ред. Ю.А. Чизмаджева. – М.: Изд. Мир, 1987. – 585 с.

136. Механічні процеси і обладнання переробного та харчового виробництва: навч. посіб. для студ. вищих техн. та аграр. навч. закладів /

П.С. Берник, З.А. Стоцько, І.П. Паламарчук, В.В. Яськов; Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Л.: НУЛП, 2004. – 336 с.

137. Мирзоян Х.А. Исследование и обоснование способа восстановления изношенных-чугунных корпусных деталей приваркой стальной ленты, на примере блоков цилиндров тракторных двигателей СМД-14 и СМД-60 Автореф. дис....канд.техн. наук.-М, 1994.-20 с.

138. Михайлов П.М. Приборы для измерения температуры [Текст] / П.М. Михайлов, Б.И. Леват - М.: Пищевая пром-сть, 1999. - 120 с.

139. Місяць В.П. Аналітичне визначення складових видів деформації полімерів при подрібненні: [Текст] / В.П. Місяць // Вісник КНУТД. – 2007. - №4. - С. 27-31.

140. Місяць В.П. Математичне моделювання матеріальних потоків в механічних пристроях для подрібнення полімерів: [Текст] // Вісник Хмельницького національного університету. - 2006. - №2 Т.1. - С.180-184.

141. Місяць В.П. Моделювання процесів руйнування полімерних матеріалів при подрібненні: [Текст] / В.П. Місяць, О.П. Бурмістенков, О.З. Гладчук // Вісник КНУТД. – 2007. - №3. - С. 40-45.

142. Місяць В.П. Основи побудови математичних моделей процесів подрібнення матеріалів: [Текст] / В.П. Місяць // Вісник Технологічного університету Поділля. - 2000. - №5. - С.34-37.

143. Монтаж, наладка, аксплуатація и ремонт оборудования: Справ. / Под ред. В. М. Горбатова. - М.: Пищ. пром-сть, 1975.

144. Мороз Л.С. Механика и физика деформаций и разрушения материалов: [Текст] / Л.С. Мороз . - Л.: Машиностроение, 1994. - 224 с.

145. Мямлин В.А. Электрохимия полупроводников: [Монография] / В.А. Мямлин, Ю.В. Плесков. - М.: Наука, 1985. - 333 с.

146. Набарро Ф.Р.Н. Пластичность чистых монокристаллов: [Текст] / Ф.Р.Н. Набарро, З.С. Базинский, Д.Б. Холт. Пер. с англ. - М.: Металлургия, 1977. - 216 с. с ил.

147. Назаренко П.В. Исследование влияния упруго-пластических деформаций и структурных изменений на процессы внешнего трения и износостойкость: Автореф. дис.. докт. техн. наук [Текст] / - К.: КИИГА, 1973. - 49 с.

148. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент [Текст] / Под общей редакцией Ю.Н.Внукова / Ю.Н. Внуков, А.А. Марков, Т.В. Лаврова, Н.Ю. Бердышев - Киев: Техника, 1992. -143 с.

149. Нейберг Г. Теория концентрации напряжений в призматических стержнях, работающих в условиях сдвига, для любого нелинейного

закона, связывающего напряжения и деформации: [Текст] / Г. Нейберг // Сб. переводов иностр. статей . - М.: Механика, 1981. - №4. - С.36-43 .

150. Некоторые особенности микропластической деформации поверхностных слоев полупроводниковых кристаллов при температурах ниже и выше температурного порога хрупкости [Текст] / В.П. Алехин, М.Х. Шорохов, Г.Г. Алиев [и др.] // В сб.: Металлофизика. - К.: Наукова думка, 1973. - вип. 44. - С.31-42.

151. Николаев Б.А. Исследование структурно-механических свойств мяса методом растяжения: [Текст] / Б.А. Николаев, А.Ф. Баранов // Мясная индустрия СССР. - М., 1986. - №6. - С.35-37.

152. Новиков Н.В., Дуб С.Н., Шульженко А.А. Инструменты из сверхтвердых материалов. Учебное пособие / Под. ред. Н.В. Новикова.- Киев: ИСМ НАНУ, 2001.-528 с.

153. Новицкий А.Е. Повышение долговечности деталей оборудования молочной промышленности, подверженных коррозионно-механическому изнашиванию [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.14. / А.Е. Новицкий. - К.: 1984 с. 244 с ил.

154. Новицкий А.Е., Некоз А.И., Лысенко Ю.Л. Установка для исследования износостойкости материалов в жидких средах. – Пробл. Трения и изнашивания: Респ. межвед. научн.-техн. сб., 1980, вып. 17, с. 32-34.

155. Новіков М.В., Карюк Г.Г., Клименко С.А., Девін Л.М. Застосування ріжучого інструмента з швидкоріжучих сталей, твердих сплавів, мінералокераміки і полікристалічних надтвердих матеріалів в промисловості // Вісн. Житомир, інж-технол. ін-ту. Техн. науки. - 1999 - №10 - С. 3 - 6.

156. Новіков М.В., Клименко С.А., Копейкіна М.Ю. Перспективи розвитку процесів лезової обробки інструментами, оснащеними ПСТМ // Вісн. Житомир, інж-технол. ін-ту. Техн. науки. - 2003. -№2 - С. 121 - 128.

157. Новые методы исследования коррозии металлов. /отв. ред. – И.Л.Розенфельд, - сб. статей М.: Наука, 1983, - 220 с.

158. Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості : підруч. для студ. ВНЗ / В. Г. Мирончук, І. С. Гулий, М. М. Пушанко та ін. - Вінниця : Нова книга, 2001. – 576 с.

159. Оборудование для убоя скота, птицы, производства колбасных изделий и птицепродуктов: Справ. / Под ред. В. М. Горбатова. - М.: Пищ. Пром-сть, 1985. – 591 с.

160. Объективная оценка качества мяса и мясных продуктов реологическими методами: Обзор. информ. [Текст] / Т.Е. Лимонов, СИ.

Суханова, О.П. Боровикова, А.В. Горбатов. - М.: ЦИНТИиТЭИМММП, 1995. - 26 с.

161. Окопный Ю. А., Радник В. П., Чирков В.П. Механика материалов и конструкций // Справочник. Инж. Журнал - 2001 - №11. - С. 34-48.

162. Определение рациональных режимов работы и параметрической надежности волчков [Текст] / В.Д. Косой, В.В. Крементуло, А.С. Андрианов, В.С. Катюхин. - Мясная Индустрия СССР, 1992, № 3, с. 14-18.

163. Пат. 2047368 Российская федерация МПК7 В 02 С 18/36. Решётка к устройству для измельчения мясо-костного сырья / Груданов В. Я., Манько А.П., Иванцов В.И., Белохвостов Г. И.; заявитель и патентообладатель Груданов В. Я., Манько А.П., Иванцов В.И., Белохвостов Г. И. - № 92006177/33; заявл. 16. 11. 1992; опубл. 10. 11. 1995.-8 с.: ил.

164. Пат. 70749 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 22 С 17/00. Устройство для измельчения пищевых продуктов / Якушев О.И., Ивашов В.И., Сидоряк А.Н., Максимов Д.А.; - заявл. 20.06.2007; опубл. 20.02.2008, Бюл. №5. – 2 с.

165. Пашечко М.И. Формирование и фрикционная стойкость эвтектических покрытий: [Монография] / М.И. Пашечко, В.М. Голубец, М.В. Чернец /. - К.: Наукова думка, 1993. - 343 с.

166. Пелеев А.И. Износ инструмента в процессе резания мяса: [Текст] / А.И. Пелеев, М.Н. Клименко; ЦИНТИпищепром // Мясная и птицеперерабатывающая пром-сть: Науч.-техн. информ. - М., 1986. - Вып.5. - С.4-7.

167. Пелеев А.И. К теории машинной обработки мяса. Исследование процесса трения скольжения мяса по стали: [Текст] / А.И. Пелеев, М.Н. Клименко // Мясная индустрия СССР. - М., 1986. - С.45-47.

168. Пелеев А.И. Определение зависимости давления истечения мяса через решетки от диаметра отверстий, скорости истечения и степени деформации: [Текст] // А.И. Пелеев, С.А. Пелеев // Мясная индустрия СССР. - 1983. -№5.-С. 31-32.

169. Пелеев А.И. Определение энергозатрат при нарезке порционных полуфабрикатов / А.И. Пелеев, А.Н. Познышев, В.А. Захаров // Мясная индустрия СССР. - 1982. - № 7. - С. 31-32.

170. Пелеев А.И. Пути механизации обвалки мяса / А.И. Пелеев, Б.Г. Грачев. - М.: ЦИНТИпищепром, 1980. - 67 с.

171. Пелеев А.И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности: [Текст] / А.И. Пелеев. - М.: Пищевая промышленность, 1981. - 519 с.

172. Пеленко В.В. О необходимости развития отечественного машиностроения для мясопереработки: [Электронный ресурс] / В.В. Пеленко, Н.А. Зуев, Р.А. Азаев, А.А. Янцевич, В.В. Кузьмин, Р.Г. Ольшевский. - СПб: Научный журнал НИУ ИТМО.: ISSN:2072-2389.

173. Підвищення довговічності різального комплексу м'ясорізальних вовчків: [Текст]/ О.І., Некоз В.І.Білий, М.М. Пушанко та ін. // Придніпров. наук. вісник. – 1998. – №73 (140). – С. 59–60.

174. Повышение ресурса технических систем путем использования электрических и магнитных полей: [Монография]: / Е. Е. Александров, И. А. Кравец, Е. Н. Лысиков и др.. - Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. - 544 с.

175. Познышев А.Н. Исследование способов и режимов резания мяса с учетом его структуры: Дис...канд. техн. наук 05.18.12 [Текст] / А.Н. Познышев. - М.: МТИММП, 1993. - 143 с.

176. Полещук О. Б. Оптимизация работы мясоизмельчительных шнековых машин на основе изучения закономерностей переноса влаги в мясном сырье : дисс. ... канд. техн. наук: 05. 18. 12.; 05.02.14: Защищена 10.10.1988.: утв. 3.03. 1989/Полещук Олег Борисович.-Л. 1988.

177. Полуян В.А. Повышение долговечности ножей мясоизмельчительных машин [Текст]: Дис....канд. техн. наук: 05.20.03. - Зерноград: РГБ, 2007, с. 163.

178. Поляченко А.В. Восстановление и упрочнение деталей сельскохозяйственной техники электроконтактной приваркой присадочных материалов / А.В.Поляченко, Л.Б.Рогинский // Тезисы доклада научно-техн. конф. стран членов СЭВ». Современное оборудование и технологические процессы восстановления и упрочнения деталей, машин. -М.: ДгроНИИТЭИИТО,1998. – 35 с.

179. Портер А.И. Исследование влияния коррозионно-активных сред на процессы трения и изнашивания [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04. Одесса.: 1979 с. 221 с ил.

180. Портер А.И. О влиянии коррозионно-активных сред на дислокационную структуру при трении скольжения твердых тел: [Текст] / А.И. Портер, Г.А. Прейс, Н.А. Сологуб // сб. "Проблемы трения и изнашивания". - К.: Техніка, 1973. - вип. 4. - С.74-77.

181. Портер А.И. Электрохимический метод регулирования деформации поверхностных слоев металлов: [Текст] / А.И. Портер, Г.А.

Прейс, Н.А. Сологуб // В сб.: "Разработка и применение технологических смазок. - Киев: РДЭНТП, 1973. - С.23-24.

182. Постников С.Н. Электрические явления при трении и резании: [Текст] / С.Н. Постников. - Горький: Волго-Вятское книжное изд-во, 1995. – 280 с.

183. Прейс Г.А. О природе коррозионно-механического изнашивания металлов: Международный научный журнал / Г.А. Прейс; Государственное научное учреждение ИММС НАН Беларуси // Трение и износ. - 1987. - Т.8, № 5. - С.792-797.: ISSN 0202-4977.

184. Прейс Г.А. Повышение износостойкости деталей оборудования предприятий пищевой промышленности. [Текст] / Г.А. Прейс. К.: Машгиз, 1983. – 282 с. с ил.

185. Прейс Г.А. Повышение износостойкости деталей оборудования сахарных заводов: [Монография] / Г.А. Прейс, М.А. Сологуб. - К.: Техніка, 1986. – 138 с.: с ил.

186. Прейс Г.А. Электрохимические явления при трении металлов [Текст]: Международный научный журнал / Г.А. Прейс, А.Г. Дзюб; Государственное научное учреждение ИММС НАН Беларуси // Трение и износ. - 1980. - Т.1, № 2. - С.217-235.: ISSN 0202-4977.

187. Прейс Г.А., Сологуб Н.А., Портер А.М. Электрохимический метод повышения износостойкости металлов в коррозионно-активных средах. В сб. "Физико-химическая механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия". К., КНИГА, 1978, с.117-118.

188. Проников А.С. Основы надежности и долговечности машин / А.С. Проников. - М.: Изд-во стандартов, 1979. - 160 с.

189. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел.: [Текст] / Ю.Н. Работнов. - М: Наука, 1997. - 304 с.

190. Разрушение твердых полимеров : пер. с англ. [Текст] / Под ред. Б. Роузена. - М.: Химия, 1981. - 523 с.

191. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / А.И. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1989. - 702 с.

192. Ребиндер П.А. Избранные труды. Физико-химическая механика / П.А. Ребиндер. - М.: Наука, 1989. - 382 с.

193. Ребиндер П.А., Епифанов Г.И. Влияние поверхностно-активной среды на граничное трение и износ. В кн. Развитие теории трения и изнашивания. – М.: АН СССР, 1957, с. 47-56.



194. Ребиндер П.А., Щукин В.Д. Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения. "Успехи физических наук", 1972, т.108, вып.1, с.32-42.

195. Резание пищевых продуктов на технологическом оборудовании: [Текст] / Н.А. Буренков, М.Н. Клименко, А.П. Жучков, М.П. Семенов // Пищевая промышленность: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1987. - № 23. - С. 83-87.

196. Резник Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов: [Текст] / Н.Е. Резник. - М.: Машиностроение, 1985. - 311 с.

197. Родін П.Р. Основи формоутворення поверхонь різанням - Київ: Вища школа; - 192 с.

198. Романов А.А. Механизация производства рыбной продукции: [Текст] / А.А. Романов . - М.: Пищевая промышленность, 1984. - 171 с.

199. Романов В.В. Методы исследования коррозии металлов. М.: Металлургия, 1975, - 335 с.

200. Рудык А.Е. Повышение долговечности деталей узлов трения технологического оборудования сахарных заводов [Текст]: Дис....канд. техн. наук: 05.02.14. / А.Е. Рудык. – К.: - 1986. с. 235 с ил.

201. Рябченков А.В. Коррозионно-усталостная прочность стали. М.: Машгиз. 1953. – 215 с.

202. Семенов А.П. Металлофторопластовые подшипники: [Текст] / А.П. Семенов, Ю.Э. Савинский. - М.: Машиностроение, 1986. - 300 с.

203. Семенов М.П. Исследование процесса резания некоторых пищевых продуктов на технологическом оборудовании: Дис. ... канд. техн. наук [Текст] / М.П. Семенов. - К.: КТИПП, 1987. - 166 с.

204. Сергеев В.З. Восстановление и упрочнение деталей с применением порошковых материалов: Обзорная информация // АгроНИИТЭИИТО. -М, 1996.-40 с.

205. Сидоряк А.Н. Основные допущения, используемые для разработки

математической модели нового способа измельчения мясного сырья / А.Н.

Сидоряк, Р.И. Шевляков, О.И. Якушев // Теоретические и практические аспекты применения методов инженерной физико-химической механики с

целью совершенствования интенсификации технологических процессов пищевых производств: сборник научных трудов. — М.: МГУПБ, 2002. — С.

206. Сидоряк А.Н. Совершенствование процесса измельчения мяса: Дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12. [Текст] / А.Н. Сидоряк. - М.: Моск. гос. ун-т приклад. биотехнологии, 2007. - 177 с.

207. Сидоряк А.Н. Улучшение структурно-механических свойств мяса за счет нового способа измельчения / А.Н. Сидоряк, Р.И. Шевляков, О.И. Якушев // Теоретические и практические аспекты применения методов инженерной физико-химической механики с целью совершенствования и интенсификации технологических процессов пищевых производств. — М.: МГУПБ, 2002. - С. 57-60.

208. Скалинский Е.И. Микроструктура мяса: [Текст] / Е.И. Скалинский, А.А. Белоусов. - М.: Пищевая промышленность, 1988. - 175 с.

209. Скиба М.Є. Обладнання для переробки відходів: [Навчальний посібник] / М.Є. Скиба. - Хмельницький: ХДУ, 2004. - 90 с.

210. Современный агропромышленный комплекс и сельскохозяйственные науки : монография / [авт.кол. : В.В. Мануилов, Л.Т. Печеная, Н.А. Рыхтикова и др.]. – Одесса: Куприенко С.В., 2014 – 124 с. : ил., табл. ISBN 978-966-2769-41-8.

211. Соколов В.Н. Конструирование оборудования пищевых производств. - М.: Пищевая промышленность, 1999. - 348 с.

212. Соколовский В.В. Теория пластичности: [Текст] / В.В. Соколовский. - М.: Высш. шк, 1989. - 608 с.

213. Соловьев Б.М. Восстановление и защита поверхностей деталей машин перерабатывающей промышленности. Обзорная информация: [Текст] / Б.М. Соловьев. - М.: АгроНИИТЭИПП, 1997. – 42 с.

214. Степанов А.И. Центробежные и осевые насосы. М.:, 1960. – 120 с.

215. Степанов Г.В. Упругопластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок: [Текст] / Г.В. Степанов. - К.: Наукова думка, 1979. - 268 с.

216. Структурутворення та формування триботехнічних властивостей евтектичних покриттів: [Монографія] / М.В. Кіндрачук, Ю.А. Куницький, О.І. Дудка, Ю.Г. Сухенко, В.М. Коржик. - К.: Вища школа, 1997. – 120 с.

217. Сухенко В.Ю. Обґрунтування основ забезпечення зносостійкості м'ясорізальних інструментів: [Текст] / В.Ю. Сухенко // Проблеми тертя та зношування: наук. техн. зб. . - К.: НАУ, 2012. - Вип. 57. - С.76-92.

218. Сухенко В.Ю. Прогнозування впливу терміну автолізу м'яса на процеси руйнування деталей подрібнювальних машин : [Текст] / В.Ю. Сухенко // Проблеми тертя та зношування: наук. техн. зб. . - К.: НАУ, 2013. - Вип. 59. - С.55-64.

219. Сухенко В.Ю. Вплив ступеня подрібнення фаршів на кінетику висушування сирокочених ковбас [Текст] / В.Ю. Сухенко. Науково-практичний журнал «Продовольча індустрія АПК» № 4 2013, ПП «Паралель» С. 24-28.

220. Сухенко В.Ю. Енергетичні показники процесу вільного різання м'ясопродуктів для ковбасних виробів [Текст] /В.Ю. Сухенко // Науковий вісник НУБіП України, 2010. Вип. 144 ч.4 серія «Техніка і енергетика АПК» с. 326-334.

221. Сухенко В.Ю. Застосування плазмового напилення для підвищення довговічності м'ясорізальних вовчків: [Текст] / В.Ю. Сухенко, В.М. Таран, Ю.Г. Сухенко // Харчова промисловість: Міжвідомчий тематичний наук. зб. - К.: УДУХТ, 2000. - Вип. 45. - С.229-234.

222. Сухенко В.Ю. Защитные эвтектические покрытия пищевого оборудования и влияние солей на их износостойкость [Текст] /В.Ю. Сухенко, Вестник молодежной науки– 2013: сборник научных статей студентов, аспирантов и молодых ученых. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2013. – С. 335-340.

223. Сухенко В.Ю. Методика исследования процессов коррозионно-механического изнашивания оборудования пищевых и перерабатывающих производств: [Текст ] / А. Дзюб, В. Сухенко, В. Мануилов, Ю. Сухенко; Polish Academy of Sciences. - Lublin-Rzeszow: AgroMedia, 2014. - Vol. 16, № 3. - 74-81с.

224. Сухенко В.Ю. Механіка біополімерів м'яса: [Текст] / В.Ю. Сухенко // Науковий вісник НУБіП України. - К.: Вид-во НУБіП України, 2010. - Вип. 144 ч.3. - С.290-302.

225. Сухенко В.Ю. Моделювання процесів подрібнення м'яса і синтез технологічних машин: [Монографія] / В.Ю. Сухенко. - Київ: ТОВ ЦП "Компринт", 2013. - 227с.

226. Сухенко В.Ю. Обґрунтування вибору зносостійких сталей для різальних вузлів шнекових м'ясоподрібнювальних машин (вовчків) [Текст] / В.Ю. Сухенко // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: Вид-во нац. авіац. Ун-ту «НАУ-друк», 2013. – Вип. 60. – с. 67-73.

227. Сухенко В.Ю. Обґрунтування основ забезпечення зносостійкості м'ясорізальних інструментів: [Текст] / В.Ю. Сухенко; НАУ //

Проблеми тертя та зношування: наук. -техн. зб. - К.: НАУ, 2012. – Вип. 57 - С.76-92.

228. Сухенко В.Ю. Обґрунтування основ забезпечення зносостійкості м'ясорізальних інструментів: [Текст] / В.Ю. Сухенко; НАУ // Проблеми тертя та зношування: наук. -техн. зб. - К.: НАУ, 2012. – Вип. 57 - С.76-92.

229. Сухенко В.Ю. Опір спрацюванню евтектичних покриттів у розчинах харчової солі [Текст] / В.Ю. Сухенко, Ю.Г. Сухенко, В.В. Мануїлов / Науково-виробничий журнал «Рибне господарство України» № 3 (86) 2013, КДМТУ, С. 49-53.

230. Сухенко В.Ю. Природа корозійно-механічного изнашивания оборудования пищевой и перерабатывающей промышленности: [Текст ] / Ю. Сухенко, А. Дзюб, В. Сухенко, В. Мануїлов; Polish Academy of Sciences. - Lublin-Rzeszow: AgroMedia, 2014. - Vol. 16, № 3. - 90-95с.

231. Сухенко В.Ю. Структурно-механічне моделювання м'яса: [Текст] / В.Ю. Сухенко // Продовольча індустрія АПК. - К.: ВП "Паралель", 2012. - С.30-32.

232. Сухенко В.Ю. Ступінь подрібнення та його вплив на якість в'яленої та напівкопченої продукції [Текст] / В.Ю. Сухенко, Ю.Г. Сухенко. Східно-Європейський журнал передових технологій. Харків. 5/10 (65) 2013. С. 40-42.

233. Сухенко Ю.Г. Дослідження електрохімічних процесів під час корозійно-механічного зношення іонно-плазмових покриттів: [Текст] / Ю.Г. Сухенко, О.Г. Дзюб, В.М. Голубець, О.Б. Гасій // Проблеми тертя та зношування. - К.: НАУ, 2007. - Вип. 47. - С.67-74.

234. Сухенко Ю.Г. Електрохімічний вплив соляного розчину на зносостійкість захисних евтектичних покриттів [Текст] / В. Ю. Сухенко, Ю.Г. Сухенко, Ю.І. Бойко, В. В. Мануїлов. Науково-практичний журнал «Продовольча індустрія АПК» № 1 2013, ПП «Паралель» С. 6-9.

235. Сухенко Ю.Г. Забезпечення довговічності м'ясорізальних вовчків переробних підприємств [Текст] / Ю.Г. Сухенко, В.Ю. Сухенко, В.В. Доценко // Науковий вісник НУБіП України – К.: НУБіП України. 2010. – Вип. 144, ч.2. – С.150-160.

236. Сухенко Ю.Г. Интенсификация тепломассообменных процессов в пищевых отраслях [Текст] / Ю.Г. Сухенко, В.Ю. Сухенко, В.М. Бородин, С.В. Хоменко // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Харків: Вид-во ХНТУСГ, Вип. 88. – 2009. – С.23-25.

237. Сухенко Ю.Г. Інтенсифікація перемішування технологічних середовищ переробних і харчових виробництв [Текст] / Ю.Г. Сухенко, В.Ю. Сухенко, П.П. Єрмаков // Науковий вісник НУБіП України, 2010. Вип. 144 ч.5 серія «Техніка і енергетика АПК» с. 77-88.

238. Сухенко Ю.Г. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв [Текст]: Підручник / Ю.Г. Сухенко, О.А. Литвиненко, В.Ю. Сухенко; під ред. професора Ю.Г. Сухенка. - К.: РВЦ НУХТ, 2010. - 547с.

239. Сухенко Ю.Г. Технологічні методи забезпечення довговічності обладнання харчової промисловості: [Монографія] / Ю.Г. Сухенко, О.І. Некоз, М.С. Стечишин. - К.: Елерон, 1993. - 107 с.

240. Сухенко Ю.Г. Трансформація властивостей фаршу в процесі виготовлення варених ковбас: [Текст] / Ю.Г. Сухенко, В.Ю. Сухенко, Т.М. Жеведь // Науковий вісник НУБіП України. - Вид-во НУБіП України, 2010. - Вип. 144, ч.3. - С.311-315.

241. Сухенко Ю.Г., Сухенко В.Ю. Досвід організації дільниць зміцнювальних та відновлювальних технологій в харчовій і переробних галузях АПК: [Текст] // Експрес-новини: наука, техніка, виробництво. – К.: УкрІНТЕІ. - 1999. - №5-6. – С.36-39.

242. Тензометрия в машиностроении: [Справочное пособие] / Под ред. Р.А. Макарова. - М.: Машиностроение, 1985. - 287 с.

243. Технология мяса и мясопродуктов: учебник для студентов высших учебных заведений по специальности "Технология мяса и мясных продуктов" [Текст] / А.А. Соколов, Д.В. Павлов, А.С. Большаков и др.; под общ. ред. А.А. Соколова. - М.: Пищевая промышленность, 1990. - 740 с.

244. Технологічне обладнання для переробки продукції тваринництва: [Навч. посібник] / О.В. Гвоздев , Ф.Ю. Ялпачик , Ю.П. Рогач, Л.М. Кюрчева; За ред. к.т.н. О.В. Гвоздева. - Суми: Довкілля, 2004. - 420с.

245. Технологія м'яса і м'ясних продуктів: [Підручник] / М.М. Клименко, Л.Г. Віннікова, І.Г. Береза та ін.; За ред. М.М. Клименка. - К.: Вища освіта, 2006. - 640 с.

246. Тиняков Г.Г. Гистология мясопромышленных животных: [Текст] / Г.Г. Тиняков. - М.: Пищевая промышленность, 1988. - 416 с.

247. Титов Е.И. Изучение свойств фаршей и качества вареных колбас в зависимости от давления газовой среды при куттеровании. - Дис... канд.техн.наук.- М.: ЖИМШ, 1989, - 163с.

248. Точек А. Моделирование механических свойств мышечной биоткани как объекта переработки в мясной промышленности: Автореф. дис... канд. техн. наук [Текст] / А. Точек. - М., 1987. - 19 с.

249. Трение, изнашивание и смазка. Справ.: В 2-х кн. Кн.2 / Под ред. И.В. Крагельского и В.В. Алисина- М.: Машиностроение, 1989. - 358 с.

250. Улиг Г. Коррозия металлов [Текст]: Монография / Г. Улиг; под ред. канд. техн. наук Л. В. Турковской. - М.: Metallургия, 1978. - 308 с.

251. Филоненко-Бородич М.М. Теория упругости: [Текст] / М.М. Филоненко-Бородич. - М-Л.: Гостехиздат, 1977. - 300 с.

252. Фрумкин А.Н. Потенциалы нулевого заряда. М.: Наука, 1982. 259 с.

253. Хаазе Р. Термодинамика необратимых процессов [Текст]: Монография / Рольф Хаазе; Darmstadt; Перевод с немецкого под ред. А.В. Лыкова. - М.: Мир, 1987.

254. Хлебников В.К. Зависимость растворимости белков и реологических свойств фарша от длительности куттерования / В.Хлебников, В.Махонина, А.Симоненко, В.Косой. - Мясная Индустрия СССР, 1975, № 3, с. 33-35.

255. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов: [Монография] / Р. Хоникомб; Перевод с англ. под ред. докт. физ-мат. наук Б.Я. Любова. - М.: Мир, 1982. - 408с.: с ил.

256. Чижикова Т.В. и др. Установка для изучения процесса виброрезания бескостного мясо-жирового сырья. М.: Труды ВНИИМП, вып. 25, ч. П, 1991, с. 135-137.

257. Чижикова Т.В. Исследование процесса резания шпика вибрирующим лезвием: Автореф. дис... канд. техн. наук / Т.В. Чижикова. - М., 1992. -28 с.

258. Чижикова Т.В. К вопросу создания режущего инструмента повышенной износостойкости методом борирования / Т.В.Чижикова, В.К.Седунов, С.Г.Лазарева // Тезисы науч.-техн. конф. стран членов СЭВ. Современное оборудование ; и технологические процессы для восстановления и упрочнения деталей машин., Ремдеталь-88. - М., 1998. – Часть 1.

259. Чижикова Т.В. Машины для измельчения мяса и мясных продуктов [Текст]. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1992. – 302 с.

260. Чижикова Т.В. Перспективы повышения надежности оборудования / Т.В.Чижикова // Мясная и молочная промышленность. - 1989. - №3. - С.42-44.

261. Чижикова Т.В. Перспективы повышения эксплуатационной надежности режущих инструментов в мясной промышленности / Т.В. Чижикова, Г.А. Мартынов // Мясная индустрия СССР. - 1995. - №1

262. Чижикова Т.В. Упрочнение быстроизнашиваемых решеток измельчителей мясного сырья /Т.В.Чижикова, В.К. В.К. Седунов // Мясная индустрия СССР. - 1995. -№3. С. 23-25.

263. Шарыпов О.А., Власов В.И. Сопротивление изнашиванию режущего инструмента // Вестник машиностроения - 1997 - №7 - С.52-54.

264. Шпеньков Г.П. Физикохимия трения. / Под ред. Д.Н. Гаркунова. – Минск,: Изд-во БГУ им. В.И. Ленина. 1988. – 208 с.

265. Шуляк В.А. Научно-практические основы создания комбинированных агрегатов для сушки и механотермической обработки пищевых материалов: Автореф. дисс...докт. техн. наук [Текст] / В.А. Шуляк . - Могилев: Могил. гос. универс. продов, 2005. - 42 с.

266. Эванс Ю.Р. Коррозия и окисление металлов. – М.: Машгиз, 1962. – 856 с.

267. Электронный учебник «Биология»: [Электронный ресурс]. - <http://www.ebio.ru>.

# Додатки



## ЗМІСТ ДОДАТКІВ

Додаток А	Ключові технологічні операції виготовлення ковбасних виробів_____	311
Додаток Б	Структура тканин м'ясопромислових тварин_____	314
Додаток В	Електричні реологічні моделі м'ясопродуктів_____	318
Додаток Д	Типові діаграми деформування м'яса _____	320
Додаток Е	Огляд транспортувальних систем сучасних вовчків_____	325
Додаток Ж	Сучасні конструктивні рішення різальних механізмів шнекових подрібнювачів м'яса_____	332
Додаток З	Види кутерних ножів_____	340
Додаток И	Характеристика інших подрібнювачів_____	342
Додаток И.1.	Конструкції дезінтеграторів і відцентрових подрібнювачів _____	342
Додаток И.2.	Конструкції колоїдних млинів та емульсаторів_____	344
Додаток И.3.	Комбіновані та інші подрібнювачі м'ясопродуктів _____	347
Додаток И.4.	Конструкції формуютьовуювальних різальних машин _____	354
Додаток К	Методи і засоби оцінки фізико-хімічної механіки взаємодії деталей м'ясоподрібнювальних машин з технологічними середовищами_____	359
Додаток К.1.	Дослідження корозійно-механічного спрацювання робочих органів подрібнювачів м'яса потенціостатичним методом _____	359
Додаток К.2.	Засоби дослідження впливу м'ясних середовищ на субмікроструктуру і зносостійкість деталей подрібнювальних машин _____	369
Додаток К.3.	Засоби оцінки силової взаємодії різальних інструментів з м'ясопродуктами _____	375
Додаток К.4.	Мембранний метод дослідження напружено-деформованого стану біополімерів м'яса _____	387
Додаток Л	Рецептури сирокочених ковбас _____	391
Додаток М	Методи і засоби оцінки реологічних, хіміко-технологічних і органолептичних характеристик м'яса і м'ясопродуктів_____	392
Додаток Н	Реологічні характеристики дисперсних середовищ фаршів для сирокочених ковбас за різних режимів кутерування _____	400
Додаток П	Зсувні характеристики фаршів _____	415
Додаток Р	Автоматизація процесу подрібнення фаршу _____	417
Додаток С	Вплив вакууму на процес подрібнення _____	423
Додаток Т	Подрібнення фаршу на кутері та колоїдному млині _____	425
Додаток У	Методика розрахунку оптимальних режимів подрібнення фаршів _____	427
Додаток Ф	Забезпечення якості ковбасних виробів з фаршів, подрібнених на різних машинах _____	429
Додаток Ф.1.	Ковбаси з кутерованого фаршу_____	430

Додаток Ф.2.	Ковбаси з фаршу, приготовленого комплексним подрібненням на кутері і колоїдному млині _____	437
Додаток Х	Методи диспергування твердих тіл _____	439
Додаток Ц	Формування тріщин при подрібненні м'яса _____	444
Додаток Ш	Складові загальної роботи вільного різання м'яса _____	447
Додаток Щ	Моделювання руху м'яса і деформування шнека у вовчках _____	451
Додаток Ю.1.	Контактна взаємодія різальних інструментів з сировиною _____	458
Додаток Ю.2.	Структура сервовитних плівок на різальних інструментах _____	463
Додаток Я	Визначення раціональних умов подрібнення сировини у запатентованих подрібнювачах _____	465
Додаток Я.1.	Визначення функції геометричних параметрів процесу різання _____	465
Додаток Я.2.	Методи і засоби оцінки впливу технологічних чинників на міцність зразків м'яса при різанні _____	475
Додаток Я.3.	Планування експериментальних досліджень _____	478
Додаток Я.4.	Інженерний розрахунок шнекових подрібнювачів _____	481
Додаток Я.5.	Програми для розрахунку конструктивних і технологічних параметрів подрібнювачів м'яса _____	492
Додаток Я.6.	Економічна ефективність від впровадження результатів досліджень ____	505

## Ключові технологічні операції виготовлення ковбасних виробів

На технологічній схемі (рис. А.1) виготовлення ковбасних і м'ясомістких виробів наведено основні технологічні операції, які використовують під час виготовлення основних видів ковбас [1].

Під час виготовлення ковбас знежилване м'ясо піддають солінню для надання йому солоного смаку, липкості, спрямованого розвитку мікрофлори, підвищення вологозв'язуючої здатності та створення умов для формування специфічного смаку і аромату. Щоб прискорити процес соління м'ясо попередньо подрібнюють та перемішують у мішалці разом із сіллю. Тривалість засолювання, залежно від ступеня подрібнення, наведена в табл. А.1 [1].

Для копчених ковбас фарш готують у мішалках. Спочатку закладають нежирну сировину — подрібнену яловичину та нем'ясні компоненти — і перемішують 2-3 хв. Для надання ковбасам специфічного смаку і аромату до фаршу додають спеції, прянощі, розчин нітриту натрію (якщо його не додавали при солінні). Яловичину зі спеціями перемішують 2-3 хв, а потім додають свинину і жирну м'ясну сировину, перемішуючи 2 хв. Наприкінці додають подрібнений шпик. Температура готового фаршу не повинна перевищувати 12° С.

Для варених ковбас яловичину, свинину, баранину, що засолені у шматках або у шроті, подрібнюють на вовчку з діаметром отворів вихідної ґратки 2-3 мм. Потім м'ясо подрібнюють і складають фарш у кутері в три стадії: на першій стадії, яка триває 2-3 хв, руйнується первинна структура яловичини або нежирної свинини. Процес відбувається за температури близько 0° С для утворення розчину солерозчинних білків. Для підтримування необхідної температури м'яса до нього періодично додають лід (сніг). На першій стадії до фаршу додають фосфати (за потреби), розчин нітриту натрію, нейтралізовану аскорбінову кислоту або її сіль. На другій стадії до фаршу додають порціями більшу частину води — до 40% , білкові добавки. Наприкінці другої стадії фарш, за рахунок тертя ножів, нагрівається до 8-10° С, після чого в нього додають спеції. Під час другої стадії утворюється водно-білковий розчин. Наприкінці другої стадії додають жировмісну сировину. У цьому разі температура фаршу повинна бути нижча 8° С, що пов'язано з уповільненням емульгування жирів і процесів кольороутворення за низьких температур. За температури від 8 до 14° С м'язові білки адсорбуються на поверхні подрібнених жирових часток, що сприяє запобіганню утворенню жирових набряків під час термооброблення. Шпик, борошно, крохмаль, згідно з рецептурою, додають наприкінці процесу.

Процес формування ковбасних виробів включає підготовку ковбасної оболонки, шприцювання (наповнення) фаршу в оболонку, в'язання з одночасним маркуванням і навішуванням на рами.

Термічне оброблення ковбасних виробів складається з таких технологічних процесів: осаджування, обсмажування, варіння, копчення, охолодження та сушіння.



Рис. А.1 – Принципова технологічна схема виготовлення ковбасних і м'ясомістких виробів

Таблиця А.1 – Тривалість засолювання м'яса при виготовленні ковбас

Група ковбас	Ступінь подрібнення, мм (г)	Температура в камері соління, °С	Тривалість засолювання, год
Варені сосиски і сардельки	2-3 мм	2-6	6-12
	16-25 мм	0-4	24-48
	300-600 г	0-4	48-72
Напівкопчені	16-25 мм	0-4	24-48
	300-600 г	0-4	48-96
Варено-копчені	16-25 мм	0-4	24-48
	300-600 г	0-4	48-96
Сирокопчені, сиров'ялені	300-600 г	0-4	120-168

Вихід варених ковбас становить 102-120% до маси основної сировини, напівкопчених – 75-84%, варено-копчених – 60-70%, сирокопчених та сиров'ялених – 55-60% [2].

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Загальні технології харчових виробництв: [Підручник] / А. І. Українець, М. М. Калакура, Л. Ф. Романенко, В. А. Домарецький, Л. М. Мельник, О. О. Василенко, П. Л. Шиян, Л. М. Хомічак. - К.: Університет «Україна», 2010. - 814с.: ISBN 978-966-388-318-2.
2. Сухенко В.Ю. Моделювання процесів подрібнення м'яса і синтез технологічних машин: [Монографія] / В.Ю. Сухенко. - Київ: ТОВ ЦП "Компринт", 2013. - 227с.

## Структура тканин м'ясопромислових тварин

М'ясо та м'ясопродукти мають досить складну структуру. До складу м'яса, крім м'язової тканини, входять всі види з'єднувальної тканини, нервова тканина, кровеносні та лімфатичні вузли, кров. При приготуванні фаршу варених ковбасних виробів в якості сировини використовуються в основному скелетна м'язова тканина (рис. Б.1) [1].

М'язова тканина м'ясопромислових тварин являє собою неоднорідне за складом середовище, основу якого складають не клітини, а якісно нові утворення – сімпласти. Вони мають вигляд циліндрів-волокон діаметром від 10 до 150 мкм і довжиною від декількох міліметрів до 0,15 м і більше [2, 3]. Всередині м'язового волокна містяться рідинна фаза (саркоплазма), а також ядра, білкові міофібрили (нитки).

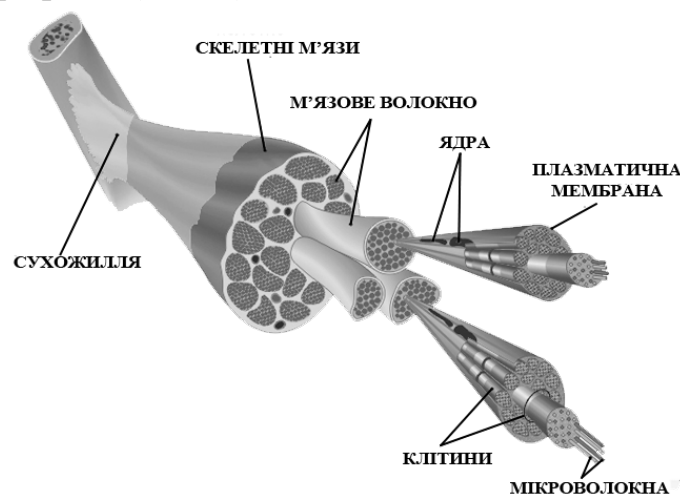


Рис. Б.1 – Структура м'язів

Білкові скорочувальні нитки-актин і міозин (рис. Б.2) можуть взаємодіяти одна з одною за допомогою активних груп і утворювати комплексний білок (актоміозин). Рідка саркоплазма являє собою концентрований золь білків переважно глобулярного типу. Крім того, в ній містяться жири, солі та інші речовини.

М'язові волокна вкриті саркоплазмою, яка складається з двох шарів мембран. Зовні кожне м'язове волокно окутане мережею кровеносних капілярів і дуже тонкими колагеновими волокнами, які вкриті фібрилами і, в свою чергу, утворюють навколо волокна дуже тонку сітчасту з'єднувальну оболонку – ендомізій [2]. Вільні кінці колагенових фібрил, розташованих на оболонці волокон, збираючись у пучки, утворюють сухожильні пучки (волокна) першого порядку. Ендомізій окремих м'язових волокон, зростаючись, об'єднує м'язові волокна в первинні пучки, які вкриті більш щільною з'єднувальною оболонкою – перемізієм. М'язові волокна всередині первинних пучків розташовуються, як правило, в одному напрямі і пов'язані з

внутрішньом'язовими з'єднувальними прошарками за допомогою пальцевих виступів і ендомізію.

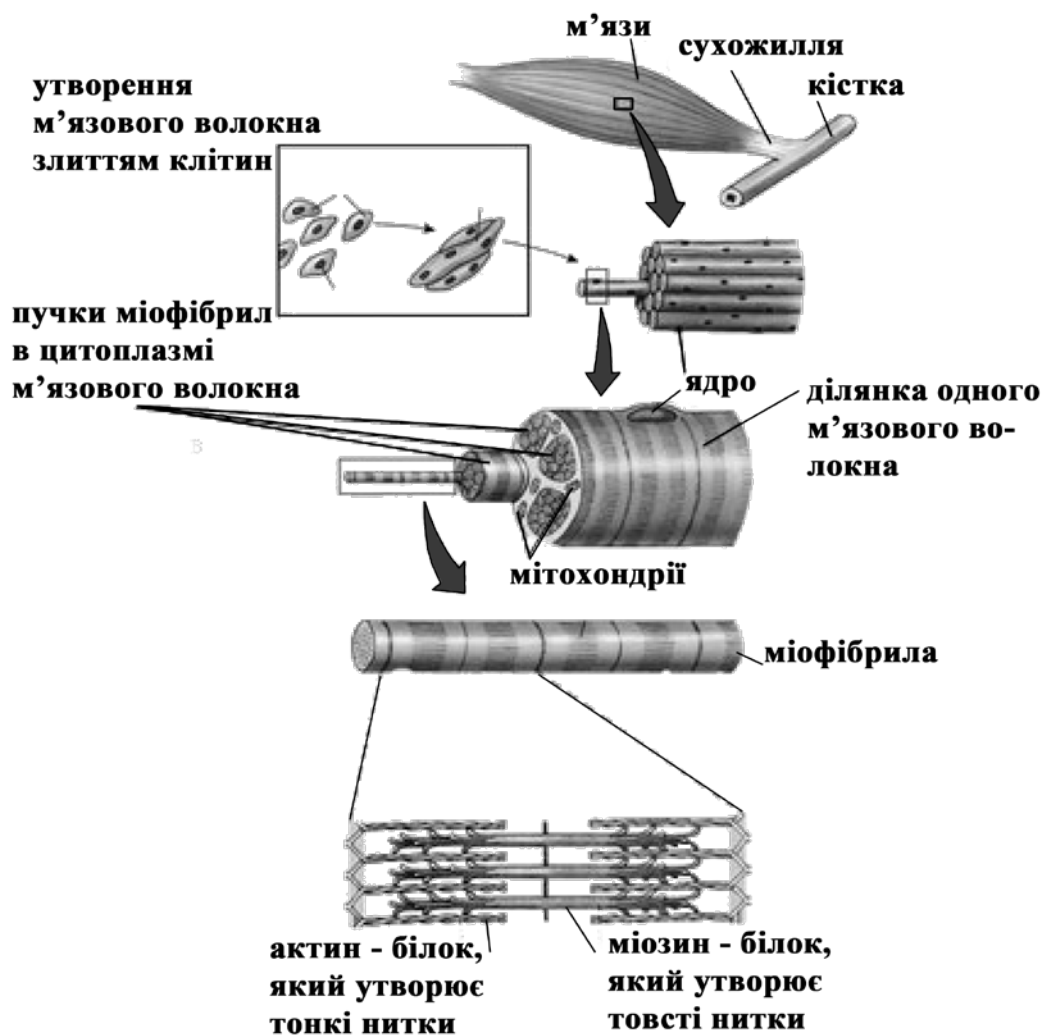


Рис. Б.2 – Будова м'язової тканини м'ясопромислових тварин

Первинні пучки м'язових волокон за допомогою перемізію з'єднують м'язові волокна у вторинні і третинні пучки [2, 3]. При цьому з'являється м'язове черевце – основна частина скелетного м'яза.

З'єднувальні прошарки між первинними пучками м'язових волокон пронизані кровоносними і лімфатичними судинами, нервами і жировими клітинами. Ззовні м'яз вкритий щільним шаром з'єднувальної тканини – епімізієм. Внутрішні і зовнішні з'єднувальні оболонки, зростаючись, утворюють з'єднувальний остов м'язів. Він надає м'язам форму і прикріплює їх до кісток скелету.

Основу з'єднувального остова складають колагенові волокна і, в значній мірі, еластинові і ретикулінові волокна. Колагенові первинні волокна мають діаметр близько декількох десятків мікрометрів і складаються з фібрил діаметром  $\sim 0,2$  мкм. Вони мають велику міцність і розриваються при навантаженні, яке інколи становить 600 МПа [2, 3].

Колагенові фібрили мають складну будову і об'єднують більш тонкі протофібрили. Протофібрили складаються з макромолекул колагену довжиною близько 2800 Å і діаметром близько 14 Å [3]. Макромолекули в протофібрилах з'єднуються одна з іншою боковими водневими зв'язками та міжфібрилярною речовиною [2, 3].

З віком у тварин колагенові волокна товщають, що викликає підвищення міцності м'яса у дорослих тварин у порівнянні з більш молодими.

Еластинові волокна складають незначну частину м'язового з'єднувального каркасу. Їх діаметр складає близько 10 мкм. При розтягуванні вони можуть подовжуватись до 150%, а потім розриватись. Їх міцність на розрив не перевищує  $(20 \div 30) \cdot 10^5$  Па. Якщо розтягнуте волокно розвантажити, то воно, як пружина, приймає початкову форму [2, 3]. Очевидно еластинові волокна являються одними з тих елементів остова, які надають м'ясу пружних властивостей.

Кількість і міцність еластинових і колагенових волокон в з'єднувальному остові м'язів залежить від виду і віку тварин, анатомічного розташування їх м'язів, рівня фізичних навантажень при житті тварини та інших чинників.

Шпик відноситься до жирових тканин, розташованих під шкірою свиней. Він є видозміненою розпушеною з'єднувальною тканиною (рис. Б.3) [5], клітини якої заповнені жиром. Жирові клітини шпика мають овальну форму з розмірами близько  $(60 \div 150) \cdot 10^{-6}$  м [4] і об'єднані з'єднувальним тканинним каркасом у щільні пакети. Товщина оболонок між клітинами всередині пакета незначна (до 800 ангстрем). Між пакетами розташовані товсті шари сполучної тканини, в яких розподілені великі кровоносні і лімфатичні судини та вузли.

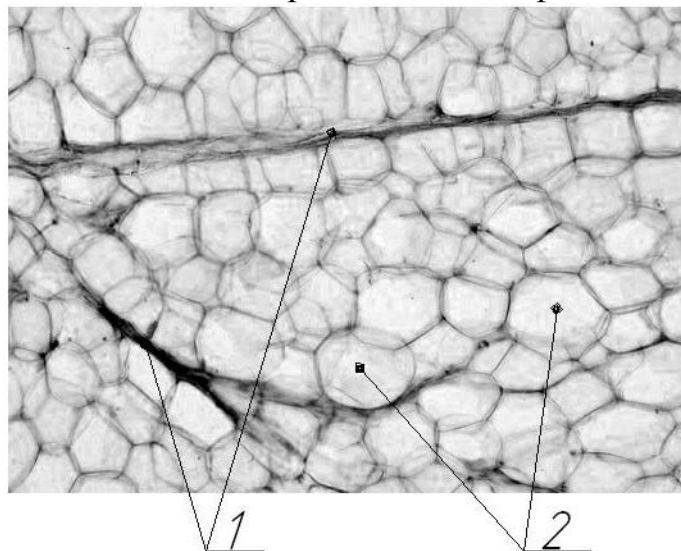


Рис. Б.3 – Зріз жирової тканини: 1- пухка сполучна тканина, по якій проходять судини та нерви; 2- жирова клітина

Шпик розділений шаром сполучної тканини, розташованої паралельно до шкірного покриву, поділяється на два різних за анатомічним походженням шари. Поверхневий шар - це елемент шкірної дерми, перетвореної в процесі



розвитку тварини в жирову тканину. Цей шар характеризується товщим і щільнішим з'єднувальним тканинним каркасом. Внутрішній шар шпика, розташований з боку туші, є підшкірним шаром, який переродився у жирову тканину. Він містить більш пухку з'єднувальну тканину і в менших кількостях.

Хімічний склад і товщина шару шпика залежать від віку і породи тварин, способу відгодівлі та інших чинників. У шпику може міститися від 80 до 94% жирів, 5-10% води, 0,5-5,0% білків, до 0,8% мінеральних речовин і незначна кількість інших речовин [6].

### ЛІТЕРАТУРА

1. Пелеев А.И. Пути механизации обвалки мяса / А.И. Пелеев, Б.Г. Грачев. - М.: ЦИНТИпищепром, 1970. - 67 с.
2. Анатомия и гистология мясопромышленных животных: [Текст] / Н.А. Лебедева, А.Я. Бобровский, В.Н. Писменская и др. - М.: Агропромиздат, 1995. - 368с.
3. Скалинский Е.И. Микроструктура мяса: [Текст] / Е.И. Скалинский , А.А. Белоусов . - М.: Пищевая промышленность, 1998. - 175 с.
4. Анатомия домашних животных : [Текст] / Акаевский А.И., Юдичев Ю.Ю., Михайлов Н.В., Хрусталева И.В. . - М.: Колос, 1994. - 543с.
5. Википедия – свободная энциклопедия: [Электронный ресурс]. - <http://www.wikipedia.org/>.
6. Технология мяса и мясопродуктов: учебник для студентов высших учебных заведений по специальности "Технология мяса и мясных продуктов" [Текст] / А.А. Соколов, Д.В. Павлов, А.С. Большаков и др.; под общ. ред. А.А. Соколова. - М.: Пищевая промышленность, 1990. - 740 с.

## Електричні реологічні моделі м'ясопродуктів

Загальна деформація механічної моделі ковбасного фаршу (див. розділ 1 монографії):

$$dy = dy_G + dy_H + dy_C + dy_p,$$

де  $dy_G, dy_H, dy_C, dy_p$  - деформації, відповідно, тіл Гука, Ньютона, Сен-Венана і елемента, що відбиває втрату міцності фаршу при різанні.

Для складання електричної моделі фаршу замість названих складових можна застосувати моделі Генрі, Ома і Фарадея.

В ідеальному пружному тілі Гука - Фарадея електроенергія, витрачена на зарядження, накопичується і може бути повернена при розрядженні. Ідеально в'язка рідина Ньютона - Генрі характеризується тим, що в ній електрична напруга пропорційна силі струму. Ідеальнопластичне тіло Сен-Венана - Ома може бути змодельоване у вигляді електричного опору. При переміщенні зарядів у в'язко-пластичних матеріалах начеб-то опір протидіє їх руху. На подолання цієї протидії витратиться електроенергія, яка перетвориться в тепло.

Фізична поведінка в'язко-пластичних матеріалів пояснюється характером їх структури, яка протидіє руху при збільшенні напружень, а при їх зменшенні знижує межу текучості.

Електрична аналогія моделі поведінки в'язко-пластичних матеріалів складається з елементів Генрі, Ома і Фарадея. Елементи Ома і Генрі з'єднані послідовно, а разом - паралельно з елементом Фарадея (рис. В.1).

Розглянемо ділянку ланцюга з послідовним з'єднанням елементів R і L. На кожен з елементів подається напруга  $U_R$  і  $U_L$ .

За другим законом Кірхгофа для миттєвих значень:

$$U = U_R + U_L \quad (\text{В.1})$$

Повний опір ділянки ланцюга буде дорівнювати:

$$Z_1 = R + X_L, \quad (\text{В.2})$$

де R - електричний опір елемента Ома,  
 $X_L$  - електричний опір елемента Генрі.

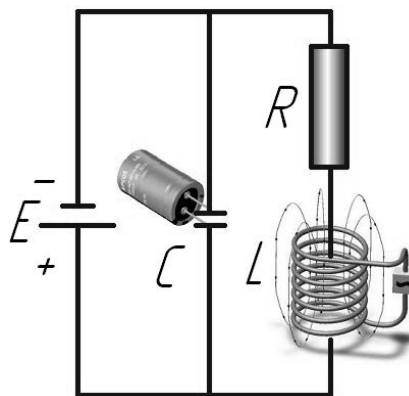


Рис. В.1 – Електричний аналог механічної реологічної моделі ковбасного фаршу при різанні

Запишемо закон Ома для ділянки ланцюга:

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{U}{R + X_L}. \quad (\text{В.3})$$

При паралельному з'єднанні двох розгалужень ланцюга, виходячи з першого закону Кірхгофа, запишемо:

$$I = I_1 + I_2, \quad (\text{В.4})$$

де  $I_1, I_2$  - струми в паралельних гілках;  $I$  - загальний струм.

Повний опір ділянки ланцюга буде дорівнювати:

$$Z_2 = \frac{X_C \cdot Z_1}{X_C + Z_1} = \frac{X_C \cdot (R + X_L)}{X_C + R + X_L}, \quad (\text{В.5})$$

де  $X_C$  - електричний опір елемента Фарадея.

Тоді загальний струм ділянки ланцюга:

$$I = \frac{U}{X_C} + \frac{U}{Z_1}. \quad (\text{В.6})$$

Враховуючи, що

$$X_C = \frac{1}{314 \cdot C}.$$

Можна записати рівняння електричної аналогії моделі бінгамівського середовища:

$$I = 314 \cdot U \cdot C + \frac{U}{R + X_L}. \quad (\text{В.7})$$

Застосування електричних моделей може спрощує дослідження пружньо-в'язко-пластичних властивостей м'ясопродуктів при їх подрібненні та змішуванні.

Таким чином структуру складних біополімерів м'ясопродуктів з пружньо-пластично-в'язкими властивостями можна моделювати з використанням механічних та електричних моделей, що дозволить адекватно оцінити силові, деформаційні та енергетичні характеристики процесу їх подрібнення.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Сухенко В.Ю. Моделювання процесів подрібнення м'яса і синтез технологічних машин: [Монографія] / В.Ю. Сухенко. - Київ: ТОВ ЦП "Компринт", 2013. - 227с.

2. Сухенко В.Ю. Структурно-механічне моделювання м'яса: [Текст] / В.Ю. Сухенко // Продовольча індустрія АПК. - К.: ВП "Паралель", Вип. 1. 2012. - С.30-32.

3. Сухенко В.Ю. Електричні реологічні моделі м'ясних продуктів [Текст] / В.Ю. Сухенко, Ю.Г. Сухенко / Науково-практичний журнал «Продовольча індустрія АПК» № 5 2012, ПП «Паралель» С. 18-20.

### Типові діаграми деформування м'яса

На рис. Д.1 подані циклічні діаграми,  $\varepsilon = \varepsilon(\tau)$ , отримані при стисканні зразків, вирізаних з довгої м'язової тканини яловичої туші, які зберігалися протягом 30 годин при температурі 2-4°C після забою, що характеризують залежність відносної деформації  $\varepsilon$  від терміну витримки  $\tau$  зразків під навантаженням за температурі 15°C [8, 9, 10].

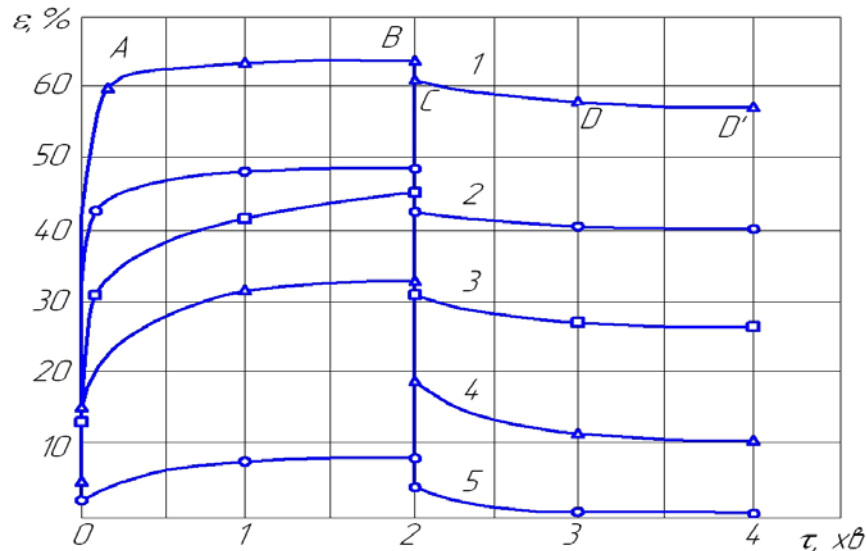


Рис. Д.1 – Деформаційно-часові криві зразків яловичини за температурі 15°C при циклічному навантаженні – розвантаженні:  $\sigma = 0,1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , 1 – поперек волокон, 2 – уздовж волокон;  $\sigma = 0,05 \cdot 10^5 \text{ Па}$  3 – поперек волокон, 4 – уздовж волокон;  $\sigma = 0,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , 5 – уздовж волокон.

Циклічна діаграма отримана за такої послідовності режимів: стискання миттєво прикладеним постійним навантаженням до точки А, витримка в інтервалі АВ при постійному напруженні повзучості  $\sigma_{пов}$ , швидке розвантаження зі зменшенням напружень до нуля в точці С, релаксація деформації в інтервалі CD, стабілізація залишкової деформації в інтервалі DD'. Таким чином, при розвантаженні зразків м'яса на циклічній діаграмі  $\varepsilon = \varepsilon(\tau)$  можна виділити три характерних інтервали. На першому з них деяка частина деформації релаксується майже одночасно з навантаженням з дуже великою швидкістю, на другому, після розвантаження з часом релаксується ще деяка частина деформації, але зі значно меншою швидкістю, а на третьому деформація залишається незмінною, тобто має місце повністю залишкова деформація.

На схематичній діаграмі (рис. Д.2) максимальна величина пружної деформації  $\varepsilon_y$ , досягнута у випробувальному циклі відповідає відрізку BC. Інтервал CD характеризує високоеластичну деформацію  $\varepsilon_\beta$ , а інтервал DD' - залишкову  $\varepsilon_\psi$ .

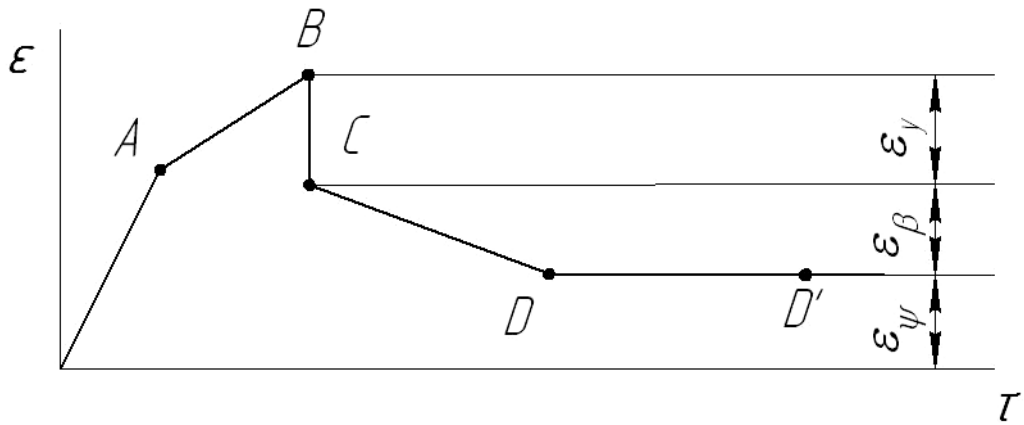


Рис. Д.2 – Типова діаграма деформування м'яса

Таким чином під дією навантажень м'ясо піддається сумарній деформації:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\gamma} + \varepsilon_{\beta} + \varepsilon_{\psi}, \quad (\text{Д.1})$$

Вид циклічної діаграми залежить від характеру процесу навантаження, величини досягнутих напружень у зразках, тривалості періоду повзучості тощо. Разом з тим, величина  $\varepsilon_{\gamma}$  при заданій температурі залежить тільки від максимальних напружень у навантажувальному циклі і трохи від швидкості деформування. Незалежно від передісторії розвантаження, найчастіше буде коректним співвідношення виду:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_{\gamma} \quad (\text{Д.2})$$

$E$  - коефіцієнт пропорційності (модуль пружності);

$\varepsilon_{\gamma}$  - максимальна величина пружної деформації у конкретному навантажувальному циклі.

Доцільно відмітити наступні експериментально встановлені характерні риси **пружної деформації** (ділянка BC на рис. Д.2):

- Пружна деформація м'яса  $\varepsilon_{\gamma}$  однозначно пов'язана лінійним законом з напруженням  $\sigma$ . Вона не залежить від умов деформування і є невід'ємною складовою сумарної деформації;
- Швидкість поширення пружної деформації від точки до точки м'ясного середовища не залежить від напружень і дорівнює швидкості звуку в цьому середовищі;
- Пружна деформація обумовлена зміною міжатомних відстаней, а тому її величина незначна;
- Підвищення температури призводить до зниження модуля пружності  $E$ .

Аналізуючи численні дані дослідів [1, 2, 4], відмітимо такі експериментально встановлені характерні риси **залишкової деформації** (ділянка DD' на рис. Д.2):

- Незворотна деформація, що залишається після розвантаження зразка м'яса, не змінюється при нагріванні. Швидкість деформації при напруженні, рівному нулю, тотожно дорівнює нулю;

- В процесі розвантаження зразка зв'язок між напруженням і деформацією близький до лінійного;

- Залишкова деформація є результат безповоротного перегрупування мікрочастинок зразка м'яса. Після усунення змін надмолекулярних структур, що часто супроводжують процес деформації, зразки м'яса в початковому стані і трансформованому по механізму залишкової деформації цілком ідентичні. В силу цього об'єм зразків м'яса при залишковій деформації практично не змінюється;

- Незалежно від режиму навантаження швидкість залишкової деформації є однозначною функцією напружень і температури. Ці залежності близькі до експоненціальних;

- У залишково деформованому м'ясі при постійній сумарній деформації напруження релаксуються до нуля, тобто деформація з часом повністю переходить у залишкову, але це можна спостерігати на практиці або при дуже великому терміні витримки зразка, або за підвищених температур.

Експериментально встановлені риси **високоеластичної деформації** (ділянка CD на рис. Д.2):

- Високоеластична деформація зразка м'яса практично повністю релаксує після розвантаження, але з часом, який істотно залежить від температури. Нагрівання зразків м'яса значно прискорює релаксацію деформацій.

- В процесі розвантаження зв'язок між напруженнями і деформаціями зразків м'яса тим більше відхиляється від лінійного, чим менша швидкість розвантаження. Лінія розвантаження на діаграмі розтягування - стискання у цьому випадку утворює криву, обернену опуклістю до вісі абсцис.

- Високоеластична деформація є результатом зміни конфігурації високомолекулярних структур.

- Швидкість високоеластичної деформації є функцією напружень і температури.

- Величина високоеластичної деформації м'яса і її доля в сумарній деформації залежить від температури біополімера. У найбільш чистому вигляді високоеластична деформація проявляється в інтервалі між температурою скловання полімеру і температурою текучості.

При температурі скловання і вищій кожному постійно діючому напруженню відповідає рівноважна високоеластична деформація, що лінійно з ним пов'язана. Коефіцієнт пропорційності для цієї залежності (рівноважний модуль високоеластичності) зростає з підвищенням температури.

За наявності високоеластичної деформації, у разі постійної сумарної деформації, напруження релаксують не до нуля, а до деякого рівноважного значення.

Діаграми розтягування м'язової тканини за температури 20°C (кімнатна) мають монотонний характер (рис. Д.3, а). Разом з тим, відсутність ділянки з пружною деформацією можна пояснити неточністю вимірювань [7, 8].

На рис. Д.3,б схематично показаний найбільш вірогідний вид діаграми. Для більшості біополімерних матеріалів характерна саме така залежність деформацій від напружень.

Ділянка I на схематичній кривій (рис. Д.3,б) відповідає пружним деформаціям, що підкоряються закону Гука. Ділянка II ілюструє високо еластичну деформацію, де малим змінам напруження відповідає інтенсивне збільшення деформації. На III ділянці незначній зміні деформації відповідає різке зростання напруження, що обумовлено зміною структури матеріалу (орієнтації макромолекул).

Найбільш характерні особливості механічної поведінки м'яса при стисканні виявляються в процесі його навантаження з постійною швидкістю деформації. У цьому режимі при стисканні призматичних зразків відбувається втрата стійкості, викривлення прямолінійної вісі, поява руйнувань. Подібне небажане явище, що веде до порушення однорідності напруженого стану, може бути виключене шляхом відповідного вибору співвідношень розмірів зразка, його гнучкості [6].

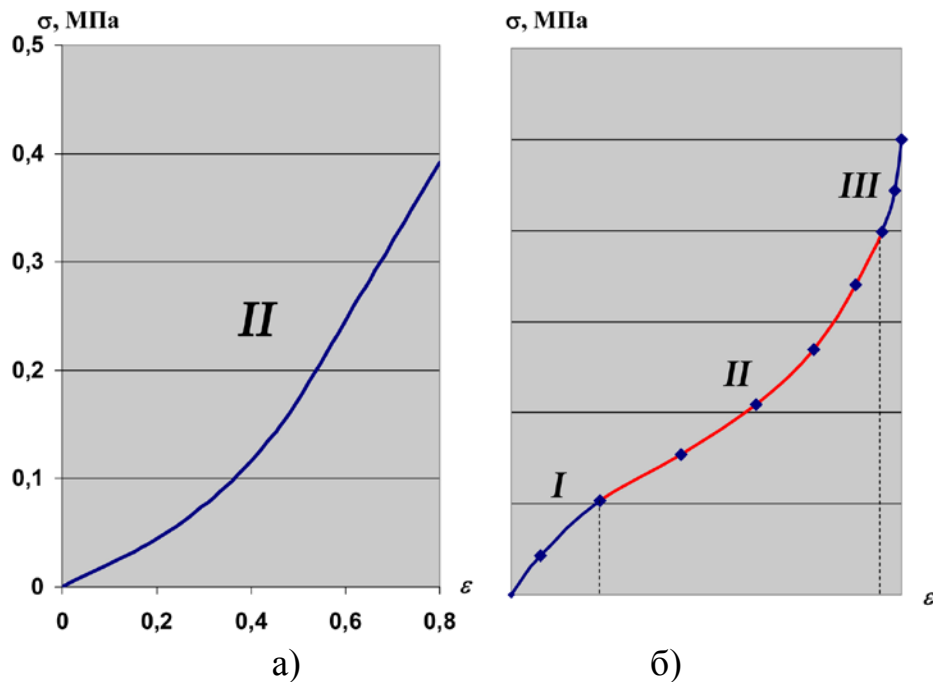


Рис. Д.3 – Діаграма розтягування м'язової тканини яловичини при кімнатній температурі: а – розтягування м'язової тканини уздовж волокон; б – типова схема діаграми.

Порушення однорідності поля напружень і деформацій можливе ще й у результаті впливу граничних умов, спричинених наявністю сил тертя на опорних поверхнях. Ці зусилля ускладнюють поперечні зміщення точок, розташованих на торцях зразка. В області пружних деформацій подібні зміщення обумовлені існуванням коефіцієнта Пуассона  $\mu$ , а в області пластичних деформацій – постійним об'ємом зразка при цих деформаціях. З вказаних причин виникає крайовий ефект, затухаючий лише на деякій відстані

від торцевих поверхонь. Величина сил тертя, зона крайового ефекту і характер деформованого стану зразка істотно залежать від фізико-механічних властивостей м'яса і умов тертя на торцях.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Александер Р. Биомеханика: Пер.с английского [Текст] / Р. Александер. - М.: И-во: МИР, 1980. - 340 с.
2. Баранов А.Ф. Исследование структурно-механических свойств мяса говядины: Дис... канд. техн. наук 05.18.12 [Текст] / А.Ф. Баранов. - М.: МТИММП, 1985. - 180 с.
3. Бранков Г. Основы биомеханики: Перевод с болг. В. Джупанова [Текст] / Георги Бранков. - М.: Из-во МИР, 1991. - 254 с.
4. Клименко М.Н. Исследование структурно-механических свойств мяса: [Текст] / М.Н. Клименко, А.И. Пелеев; Изв. Вузов СССР. - М.: Пищевая технология, 1966. - №2. - 310 с.
5. Кулешев Б.В. Исследование импульсного резания и структурно-механических свойств костной ткани с целью разработки соответствующего оборудования: Дис...канд. техн. наук 05.18.12 [Текст] / Б.В. Кулешев. - М.: МТИММП, 1989. - 194 с.
6. Нейберг Г. Теория концентрации напряжений в призматических стержнях, работающих в условиях сдвига, для любого нелинейного закона, связывающего напряжения и деформации: [Текст] / Г. Нейберг // Сб. переводов иностр. статей. - М.: Механика, 1981. - №4. - С.36-43.
7. Николаев Б.А. Исследование структурно-механических свойств мяса методом растяжения: [Текст] / Б.А. Николаев, А.Ф. Баранов // Мясная индустрия СССР. - М., 1986. - №6. - С.35-37.
8. Сухенко В.Ю. Механіка біополімерів м'яса: [Текст] / В.Ю. Сухенко // Науковий вісник НУБіП України. - К.: Вид-во НУБіП України, 2010. - Вип. 144 ч.3. - С.290-302.
9. Сухенко В.Ю. Моделювання процесів подрібнення м'яса і синтез технологічних машин: [Монографія] / В.Ю. Сухенко. - Київ: ТОВ ЦП "Компринт", 2013. - 227с.
10. Тиняков Г.Г. Гистология мясопромышленных животных: [Текст] / Г.Г. Тиняков. - М.: Пищевая промышленность, 1998. - 416 с.



### Огляд транспортувальних систем сучасних вовчків

За формою робочі шнеки вовчків бувають циліндричні і конічні, зі змінним або постійним кроком. Нарізка робочого шнека залежить від умов роботи, виду подрібнюваної сировини і розміру шматків. Основний напрям у вдосконаленні конструкцій робочого шнека пов'язаний з забезпеченням ним надійного рівномірного транспортування сировини до різального механізму. Для цієї мети, зокрема, виконують останній виток шнека з виступом, що є продовженням витка, який примикає до однієї з лопатей ножа (рис. Е.1). Наявність виступу сприяє інтенсивнішому подаванню продукту в ґратки, перешкоджаючи при цьому прокручуванню його навколо вала-шнека [9].

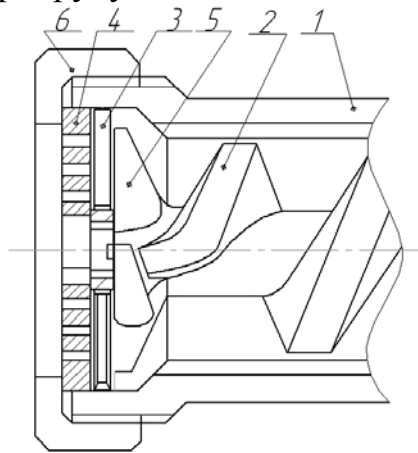


Рис. Е.1 – Різальний вузол: 1 - робочий циліндр; 2 - шнек; 3 - ніж-; 4 - ґратка; 5 - виступ; 6 - затяжна гайка

Для збільшення рівномірності транспортування сировини до робочих органів запропонований пристрій [9]. Усередині корпусу встановлений шнек зі змінним кроком, на валу якого прикріплені рухомі ножі, що чергуються з нерухомими ґратками. В останньому витку шнека виконані отвори. Крайки кожного отвору з боку подрібнювального пристрою виконані з гострими кутами заточування, різальні краї спрямовані у бік обертання шнека (рис. Е.2). При роботі сировина подається шнеком до різального механізму. Нерівномірні за об'ємом і масою шматки сировини, що знаходяться між витками шнека, підійшовши до подрібнювальних органів, частково подрібнюються. Одночасно, через нерівномірність шматків сировини, що потрапили між останнім витком шнека і плоскими ножами, частина маси входить в отвори шнека, де додатково подрібнюється на дрібніші шматки. Заздалегідь подрібнені шматки сировини суцільними витками шнека захоплюються знову та спрямовують до різального механізму. Такий цикл процесу з попереднім подрібненням повторюється до тих пір, поки не станеться повне розділення великих шматків, що покращує рівномірність транспортування сировини до різального механізму і забезпечує надійну роботу пристрою.

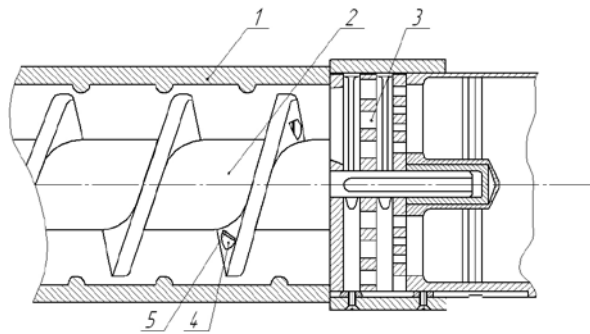


Рис. Е.2 – Робочий шнек попереднього подрібнення : 1 - корпус; 2 - шнек; 3 - різальний механізм; 4 - отвори; 5 - плоскі ножі

Перспективним виконанням транспортуючого механізму відрізняється конструкція запропонована в роботах [4, 3] (рис. Е.3). Вона включає корпус з бункером, шнек зі змінним кроком витків, багатоланкові ножі і ґратки, що чергуються з ними, робочий циліндр з гвинтоподібними загостреними ребрами і конусною частиною, що примикає до корпуса, підпирний елемент. Шнек з боку бункера має хвостовик, що входить в конусну частину, а підпирний елемент виконаний у вигляді вільно розміщеної навколо цього хвостовика спіралі, що має привід для обертання в напрямі, протилежному до напрямку шнека.

Протилежний напрям спіралі і шнека сприяє переміщенню продукту з корпуса до робочого циліндра без закручування по спіралі і під високим тиском. Описаний задум реалізований в конструкції вовчка ФВП-120.

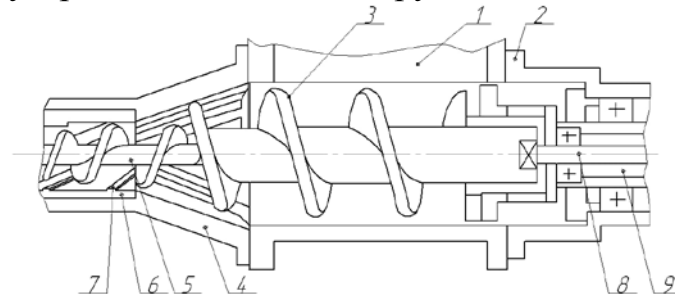


Рис. Е.3 – Пристрій для подрібнення м'яса : 1 - завантажувальний бункер; 2 - корпус; 3 - спіраль; 4 - хвостовик; 5 - шнек; 6 - робочий циліндр; 7 - ребра; 8 - вал; 9 - порожнистий вал

Оригінальним способом транспортування оброблюваної сировини до різального механізму відрізняється пристрій для подрібнення матеріалів, поданий на рис. Е.4 [6].

Транспортуючий шнек виконаний у вигляді стрічкової спіралі з кроком, що зменшується, закріпленій на внутрішньому витку з кроком, що збільшується у напрямі транспортування матеріалу. Причому, у зоні завантаження транспортуючий шнек і стрічкова спіраль утворюють принаймні один суцільний виток. При роботі великі шматки м'яса в міжвитковому просторі транспортуючого шнека навантажуються вигинаючими і зрізуючими силами. За рахунок зачеплення за реборди внутрішнього витка і різниці кроків гвинта та

стрічкової спіралі шматки руйнуються. У міру зменшення кроку стрічкової спіралі найбільш великі частки матеріалу витісняються в об'єм витків внутрішнього гвинта з кроком, що збільшується. Таким чином, процес попереднього подрібнення матеріалу здійснюється по усій довжині транспортуючого шнека. Суцільний виток, утворений на вході в нагнітальну частину корпуса, запобігає зворотному потоку матеріалу.

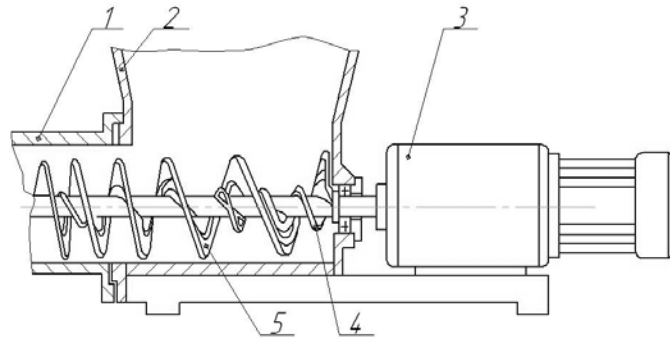


Рис. Е.4 – Транспортуючий механізм вовчка: 1 - корпус; 2 - бункер; 3 - привід; 4 - внутрішня навивка шнека; 5 - стрічкова спіраль

Для зниження енерговитрат, підвищення продуктивності та ефективності подрібнення запропонований пристрій [5], поданий на рис. Е.5. Він включає циліндричний корпус з ребрами на внутрішній поверхні і шнек. При цьому твірна конуса шнека складає з його поздовжньою віссю кут  $5-10^\circ$ . Витки шнека виконані з різальними крайками та нахилені до вісі на кут  $60-70^\circ$  у бік вивантаження. Ребра корпуса мають різальні крайки з протилежної до напрямку обертання шнека сторони. Кут між твірною робочою стороною ребра і дотичної до внутрішнього кола корпуса складає  $80-90^\circ$  [9].

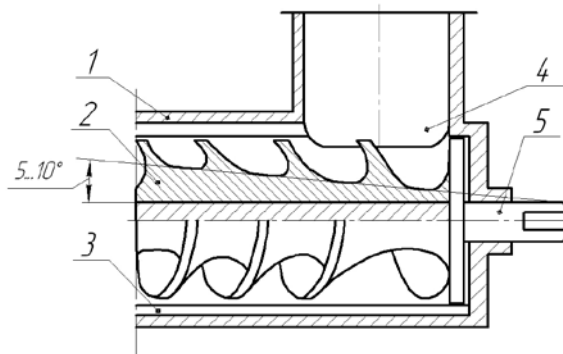


Рис. Е.5 – Пристрій для транспортування і подрібнення продуктів: 1 - корпус; 2 - шнек; 3 - ребра; 4 - завантажувальний бункер; 5 - вал

З розвитком м'ясопереробної промисловості до вовчків стали пред'являтися нові вимоги. Окрім здатності виконувати запрограмований технологічний цикл, сучасні конструкції здатні автоматично регулювати режим роботи машини під час обробки сировини. З цією метою здійснюється контроль параметрів в зоні різання і продавлювання, відповідно до яких встановлюється необхідна подача сировини, температура тощо [7].

Фірма MADO GmbH (Німеччина) запропонувала спосіб автоматичного регулювання транспортування м'яса до зони подрібнення [1]. Так, наприклад, відомий вовчок у якому розташовані транспортуючий і робочий шнеки, причому обидва шнеки переходять один в інший усередині циліндричного корпусу. Обидва шнека приводяться в дію електродвигуном, причому швидкість обертання транспортуючого шнека плавно регулюється в залежності від кількості завантаженої сировини оператором. Щоб робочий шнек завжди повністю завантажувався сировиною, транспортуючий шнек повинен створювати певний її надлишок.

Запропонована схема автоматичного регулювання подачі сировини (рис. Е.6) включає транспортуючий і робочий шнеки, причому транспортуючий шнек має більший діаметр, ніж робочий. Шнеки примикають співісно один до одного. Транспортуючий і робочий шнеки розташовані в циліндричних корпусах, сполучених між собою. Сировина поступає у завантажувальний бункер. У кінці робочого корпусу знаходиться камера подрібнення. Для приводу робочого шнека передбачений електродвигун з передавальним механізмом, причому кількість обертів робочого шнека може змінюватися в декількох режимах, залежно від виду сировини. Для приводу транспортувального шнека з порожнистим валом передбачені інший електродвигун, що з'єднується з редуктором через муфту вихрового струму та клинопасова передача. Вал робочого шнека і транспортувальний шнек змонтований в підшипниках співісного. Кількість обертів транспортувального шнека постійно вимірюється сканером за допомогою тахометра, який передає інформацію про кількість обертів по сигнальній шині на мікро ЕОМ, пов'язаний по керуючій шині з муфтою вихрового струму, що управляє нею. Мікро ЕОМ запрограмована таким чином, що робить постійною подачу напруги на муфту. При цьому її магнітне поле є функцією частоти обертання транспортувального шнека. Тобто, кількість обертів транспортувального шнека підвищується завдяки посиленню муфтою магнітного поля і, відповідно, при його послабленні, кількість обертів зменшується. При обертанні транспортувального шнека виконується подача сировини в область переходу між шнеками.

При цьому тиски, що виникають у цій області, можуть коливатися між значеннями, близькими до нуля, при незадовільному досиланні сировини, і до відносно великих значень, якщо транспортувальний шнек занадто швидко нагнітає сировину. Зміна тиску на продукт в області переходу сприяє тому, що кількість обертів транспортувального шнека за недостатньої подачі сировини підвищується, а за надмірної - знижується.

Керуюча змінна для мікро ЕОМ - це тиск на сировину або температура сировини в області переходу. Значення тиску і температури мають бути завчасно визначені та залежать від конкретного виду м'яса і його твердості. Вимірювання тиску може здійснюватися пристроєм, який має давач тиску в області переходу. Вимірювання температури - давачем температури [10].

Фірмою MADO GmbH також запропоновано додаткове пристосування для машин, що подрібнюють харчові продукти, зокрема для вовчка, яке

дозволяє окрім подрібнення сировини перемішувати її для отримання однорідної гомогенної маси на виході [2].

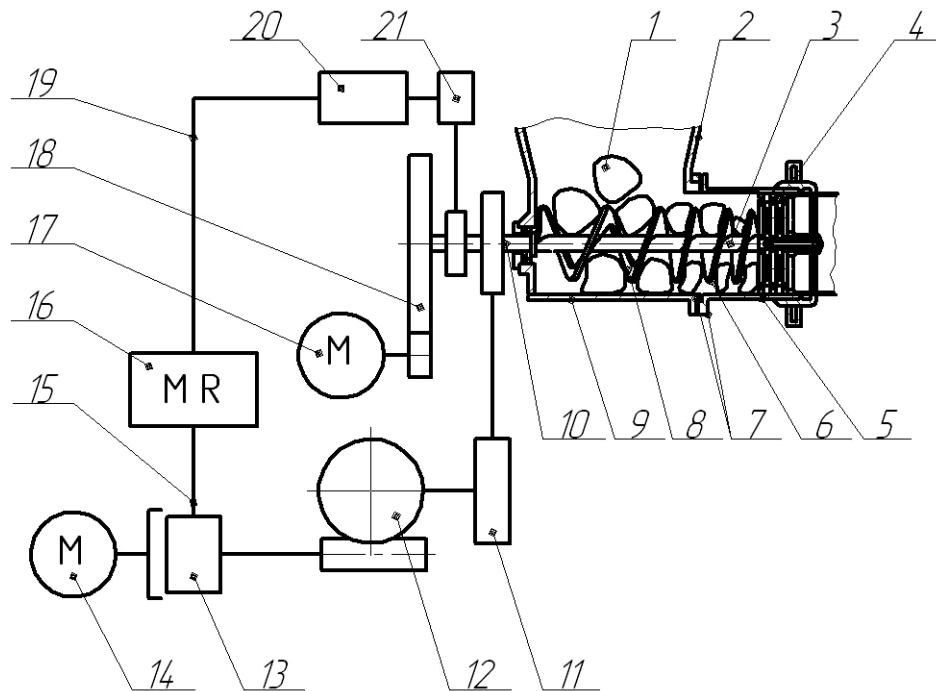


Рис. Е.6 – Схема автоматичного регулювання транспортування м'яса до зони подрібнення: 1 - сировина; 2 - завантажувальний бункер; 3 - вал; 4 - камера подрібнення; 5,9 - циліндричний корпус; 6 - робочий шнек; 7 - область переходу; 8 - транспортувальний шнек; 10 - порожнистий вал; 11 - клинопасова передача; 12 - редуктор; 13 - муфта вихрового струму; 14,17 - електродвигун; 15 – керуюча шина; 16 – мікро ЕОМ; 18 - зубчаста передача; 19 - сигнальна шина; 20 - тахометр; 21 - сканер кількості обертів

Такий пристрій дозволяє зменшити тиск на м'ясо за рахунок двократного подрібнення, істотно знижуючи підвищення температури, при виробництві м'ясного фаршу.

При протискуванні шнеком м'яса через різальний комплект попереднього подрібнення воно потрапляє в робочу камеру. Як показано на рис. Е.7, подрібнюваний продукт ковзає по гвинтовій поверхні уздовж вала (стрілка 6), при цьому частина продукту починає зісковзувати по цій поверхні до отворів.

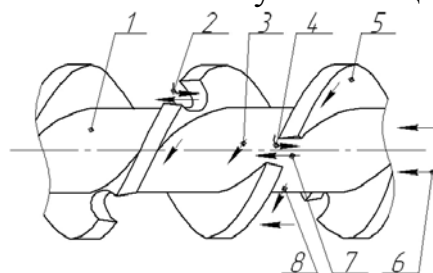


Рис. Е.7 – Схема переміщення робочим шнеком подрібнюваного продукту: 1 - робочий шнек; 2,3,6,7,8 - напрямки переміщення продукту; 4 - отвори; 5 – гвинтова поверхня

Далі відбувається розділення потоків. Одна частина продукту проходить через ці отвори і транспортується далі гвинтовою поверхнею (стрілка 8), тоді як інша частина перетікає через наскрізні отвори (стрілка 7).

Продукт у напрямі, вказаному стрілкою 7, поступає за виток і починає переміщуватись далі (стрілка 3). Після того, як продукт виявився на іншій стороні витка гвинтової поверхні, знову відбувається розділення потоків, при цьому одна його частина захоплюється і переміщується далі, а інша (стрілка 2) перетікає назад, зісковзуючи по гвинтовій поверхні через отвір.

Таким чином, різні види сировини, переміщаючись з подібним неодноразовим розділенням і зміною напрямку течії продукту під час процесу транспортування, неодноразово змішуються. Внаслідок цього виникає гомогенна суміш, що дуже вигідно впливає на якість кінцевої продукції [8].

## ЛІТЕРАТУРА

1. Europäische Patentschrift EP 0573759 B1, B02 C18/38. Groyinger, Horst Herbert; Haack, Eberhard. Zufuhrregelung eines Fleischwolfes. 02.07.1997.
2. Patentschrift DE 19637665 C2, B02 C18/30. Mossmer, Michael; Haack, Eberhard. Vorsatz- und Zusatzgerät für Zerkleinerungsmaschinen, 17.03.01.
3. А.с. № 967450. Устройство для измельчения мяса / М.Н. Клименко, А.И. Уоанов, В.И. Нечипоренко (Россия). -Опубл. 92, Бюл. № 39.
4. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович. - М.: Физматгиз, 1980.-343с.
5. Андрющенко А.Г. Исследование эксплуатационных и конструктивных параметров волчков малой производительности с целью их совершенствования: Дис. ...канд. техн. наук. [Текст] / А.Г. Андрющенко. - М.: МТИММП, 1989. - 159 с.
6. Баранов А.Ф. Исследование структурно-механических свойств мяса говядины: Дис... канд. техн. наук 05.18.12 [Текст] / А.Ф. Баранов. - М.: МТИММП, 1995. - 180 с.
7. Белухин В.А. Конструктивные особенности промышленных волчков / В.А. Белухин, С.Г. Юрков, СВ. Божьев // Мясная индустрия. -2006.-№8.-С. 37-43.
8. Максимов Д.А. Конструктивные особенности современных волчков / Д.А. Максимов, О.И. Якушев // Мясная индустрия. - 2007. — №11. -С. 404
9. Максимов Д.А. Разработка адаптированного подающего гибкого рабочего органа в волчках [Текст] Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13. М.: 132 с. с ил.
10. Политехнический словарь: [Текст] / Под ред. И.И. Артоболевского. - М.: Сов. энциклопедия, 1987. - 245 с.

### Сучасні конструктивні рішення різальних механізмів шнекових подрібнювачів м'яса

У приймальних гратках вовчків отвори виконуються круглими, квадратними, фасолеподібною (із скосами і без скосів) форми. У вихідних гратках отвори виконуються круглими [13], щілиновидними [16], причому останні не знайшли широкого застосування [8].

Діаметр отворів і їх кількість визначають швидкість виходу фаршу і ступінь подрібнення сировини. На продуктивність машини також істотний вплив має компонування різального механізму і кут нахилу отворів граток до різальної поверхні ножів. Встановлено, що при подрібненні сировини на вихідних гратках з діаметром отворів 3 мм, продуктивність максимальна при чотирьох різальних площинах і складає лише 30% від початкової при одній різальній площині. Пояснюється це тим, що швидкість витікання м'яса через гратки залежить не лише від тиску проштовхування, діаметра отворів, але і від ступеня попередньої деформації сировини [17].

З метою зменшення сили тертя подрібнюваного продукту по поверхні отвору, останні розташовують концентричними рядами з кутом нахилу до площини гратки у бік, протилежний до напрямку обертання ножа. Вісь кожного отвору одночасно нахилена під кутом  $\alpha$  до площини гратки, спрямованим у бік, протилежний напрямку обертання ножа і під кутом  $\beta$  до прямої, спрямованої у бік осі гратки. При цьому кут  $\alpha$  вибраний рівним:  $\alpha = 90^\circ - \varphi$ , де  $\varphi$  - кут внутрішнього тертя подрібнюваного вовчком продукту, а кут  $\beta$  визначений із співвідношення:

$$\beta = \text{arcctg}((\pi \cdot f \cdot d + t) / (\pi \cdot d - t)) \quad (\text{Ж.1})$$

де  $f$  - коефіцієнт тертя подрібнюваного продукту по останньому витку шнека;

$d$  - середній діаметр останнього витка шнека, мм;

$t$  - крок останнього витка шнека, мм.

На рис. Ж.1 зображені гратка з нахиленими отворами, на рис. Ж.2 – переріз А-А з схемою сил, діючих на продукт в отворі, а на рис. Ж.3 - переріз Б-Б з схемою дії останнього витка шнека на продукт.

Вісь кожного отвору одночасно нахилена до прямої в площині 3 (рис. Ж.2) гратки. Отвори спрямовані у бік, протилежний до напрямку 4 обертання ножа - кут  $\alpha$ , і до прямої, спрямованої у бік осі 5 (рис. Ж.3) гратки - кут  $\beta$ . Якщо припустити, що продукт 6 (рис. Ж.2), переміщуваний ножами, є ідеально сипким тілом з кутом внутрішнього тертя, а продукт в отворі 7 є твердим тілом - ядром, то на ядро при роботі вовчка діятиме сила нормального тиску  $P_n$ , спрямована паралельно вісі робочої камери вовчка, і сила тертя  $F_{тр}$  між частинками подрібнюваного продукту, спрямована уздовж площини гратки.

Рівнодіюча цих сил  $Q$  спрямована під кутом до прямої в площині 3 гратки у бік, протилежний до напрямку 4 обертання ножа. Отже, найменший опір

просуванню продукту через отвори буде тоді, коли кут нахилу вісі отворів, протилежний до напрямку обертання ножа, вибрати рівним  $\alpha$  [12].

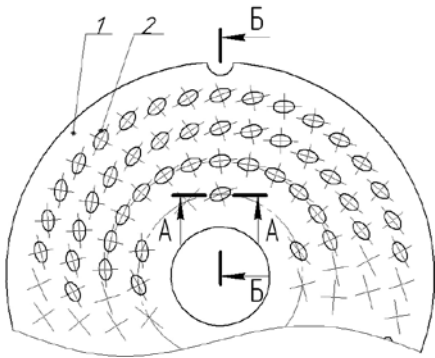


Рис. Ж.1 – Гратка з нахиленими отворами: 1 - тіло; 2 - отвір

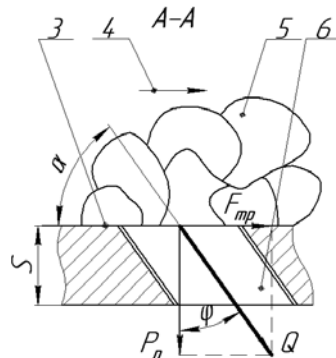


Рис. Ж.2 – Схема руху продукту в ножовому блоці: 3 - площина гратки; 4 - напрям руху ножа; 5 - подрібнюваний продукт; 6 - отвори перфорації.

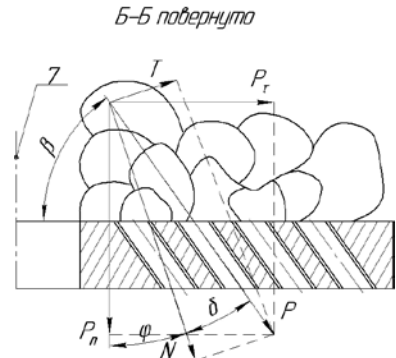


Рис. Ж.3 – Напрямки сил, діючих на сировину: 7 – центральна вісь гратки

З метою зниження потужності на подрібнення продукту завдяки зменшенню тертя по поверхні отворів у ножових гратках, отвори виконують у вигляді сопел, що прогресивно розширюються безпосередньо від торцевої поверхні граток, що взаємодіють з ножом (рис. Ж.4) [5]. Такий же ефект може бути досягнутий при ступінчастому виконанні отворів [21].

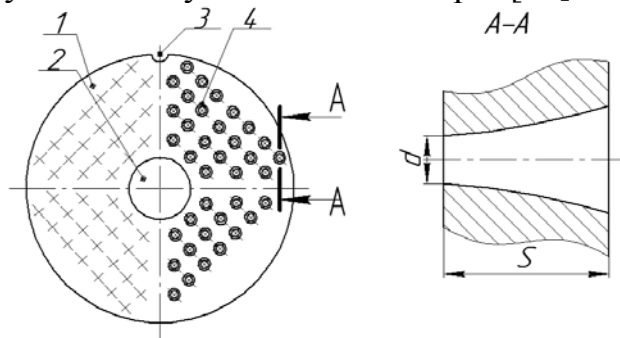


Рис. Ж.4 – Гратки з конусоподібними отворами: 1 - диск гратки; 2 - центральний посадочний отвір; 3 - фіксуючий паз; 4 - отвори у вигляді сопел.

З метою підвищення надійності приймальні гратки виконують з «живим» перерізом, що збільшується по ходу обертання ножа, причому задня крайка отвору з найбільшим перерізом виконана прямолінійною, а отвір з найменшим перерізом звернений до прямолінійної ділянки [4] (рис. Ж.5).

При проходженні м'ясної сировини через отвори 2 ніж притискає її до різальних крайок 4 і дугоподібних крайок 3, а потім перерізає. Виконання «живого» перерізу зростаючим дозволяє зменшити матеріаломісткість гратки



без зменшення міцності конструкції, збільшити продуктивність гратки і машини в цілому.

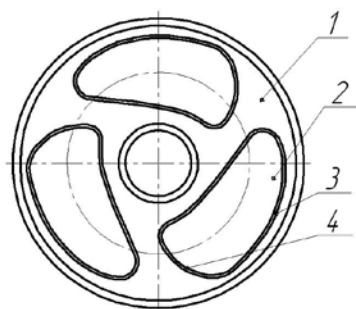


Рис. Ж.5 – Підрізні гратки: 1 - диск гратки; 2 - отвори; 3 - дугоподібні ділянки з різним «живим» перерізом, що збільшується по ходу обертання ножа; 4 - прямолінійна грань.

Після обвалки і жиловки у м'ясній сировині все ще міститься значна доля кісткових залишків, сполучно-тканинних і хрящових утворень, попадання яких в готовий продукт значно знижує його якість. Для видалення цих утворень на стадії приготування фаршу на вовчку доцільно застосовувати жиловочний комплект. Цей комплект складається з ножового блоку, жиловочного комплекту, системи регулювання ступеня жиловки і облаштування відведення твердих фракцій.

Найбільш поширена конструкція жиловочного комплекту, яка використовує властивість ножа-жиловщика спеціальної форми (тип Турбо) направляти до центру тверді компоненти м'яса.

Ножі вовчків виконують суцільними або складеними, причому продуктивність машини і витрати енергії багато в чому залежать від кута загострення леза [10].

Деякі дослідники рекомендують виконувати леза ножів криволінійними, із зубчастою формою самого ножа, але належного поширення такого роду конструкції не отримали через складність у виготовленні і деякому зменшенню площі вільного проходу м'яса в різальному механізмі [10].

Ефективним способом різання є спосіб віброрізання (рис. Ж.6), але належного поширення цей спосіб також не отримав, тому що вимагає додаткових енерговитрат для здійснення зворотно-поступального руху ножів. Крім того, ускладнюється конструкція різального механізму.

Нормальна робота різальних механізмів неможлива без щільного притискання ножів до граток, інакше при обертанні леза ножа сполучна тканина не розрізається, а намотується на інструмент. При цьому значно підвищуються витрати енергії, температура продукту і знижується продуктивність машини.

Заміна ножів гратками, що обертаються, неефективна через необхідність значного затягування затискних гайок [1].

Нормальний питомий тиск на контактні ножів і граток вовчків і емульсаторів коливається в межах від 1 до 10 МПа. При цьому витрати енергії на тертя ножів і граток досягають 90% від усіх витрат [1]. При такому

щільному притисканні ножів до ґраток в зоні їх контакту виділяється тепло. Теплова дія на сировину при механічній обробці здатна викликати зниження якості фаршу і готової продукції [7].

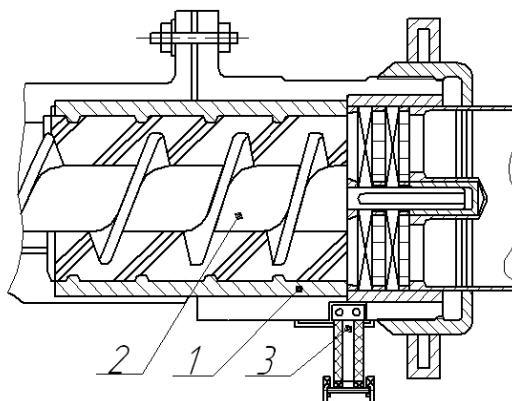


Рис. Ж.6 – Вовчок з пристроєм для віброрізання: 1 - корпус; 2 - шнековий вал; 3 - вібропривід

А.І. Пелесєв [15] відмічає, що при перервах в поданні сировини в різальний механізм, температура в ґратках вже через хвилину досягає 120°C, проте умови її вимірювання не описані.

Швидкість обертання ножів змінюється в межах від 100 до 300 об/хв, в залежності від технологічного призначення подрібнювача [80]. Останнім часом випускаються машини, в яких ніж здійснює 400 об/хв [11]. Автор роботи [20] вказує, що при невідповідності швидкостей обертання ножів і швидкості витікання м'яса основна маса сировини буде перетертою, а не розрізаною на дрібні шматочки, що призводить до значного зниження якості фаршу.

Найбільше поширення отримали конструкції, в яких ніж насаджений на палець шнека і має синхронну з ним кількість оборотів [14]. Проте, відомі вовчки, в яких ніж має підвищену, у порівнянні з шнеком, кількість обертів [2], а привід обертання ножа здійснюється додатковим валом, що проходить через порожнистий вал шнека. Відмічається [2] значне підвищення продуктивності таких машин.

Для підвищення ефективності процесу подрібнення за рахунок виключення намотування на ніж подрібнюваного продукту можна застосувати ніж з підпружиненими лопатями, що відхиляються [18]. Жила, що потрапила на різальну крайку, або хрящ починає ковзати по ній - спостерігається різання ковзанням, що призводить до швидкого перерізання твердої структури м'яса. Пружина ж швидко повертає лопать в початкове положення.

Сидоряк А.Н. стверджує, що однорідне подрібнення доцільно здійснювати не обертанням, а застосувавши спосіб зворотно-поступального руху ґратки в протифазі (рис. Ж.7) [19].

Для одноманітності при виготовленні ножів і ґраток було запропоновано замінити ножі ґратками, які обертаються, затискаючись між нерухомими ґратками. Проте таке технічне рішення не дало бажаного ефекту ні за продуктивністю машини, ні за витратами енергії. Останнє пояснюється тим, що для отримання необхідного ефекту різання м'яса, що має у своєму складі

сполучну тканину, необхідно створити в поверхні контакту достатній питомий тиск. Якщо леза мають різальну крайку малої ширини, то загальне зусилля зтягування невелике і втрати енергії на подолання тертя на контактуючих поверхнях, викликаних цим зусиллям, будуть невеликі. При великій поверхні контакту, що виникає при заміні ножів ґратками, потрібно значне зусилля зтягування, що і призводить до підвищення питомої витрати енергії. Найбільш розповсюджені різальні механізми вовчків, подані на рис. Ж.8 [9].

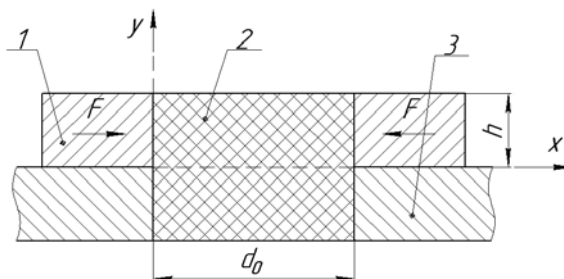


Рис. Ж.7 – Схема різання м'яса зворотньо-поступальним рухом: 1 – ніж-ґратка; 2 – видавлений з отвору ґратки продукт; 3 – приймальні ґратки з діаметром отворів  $d_0$

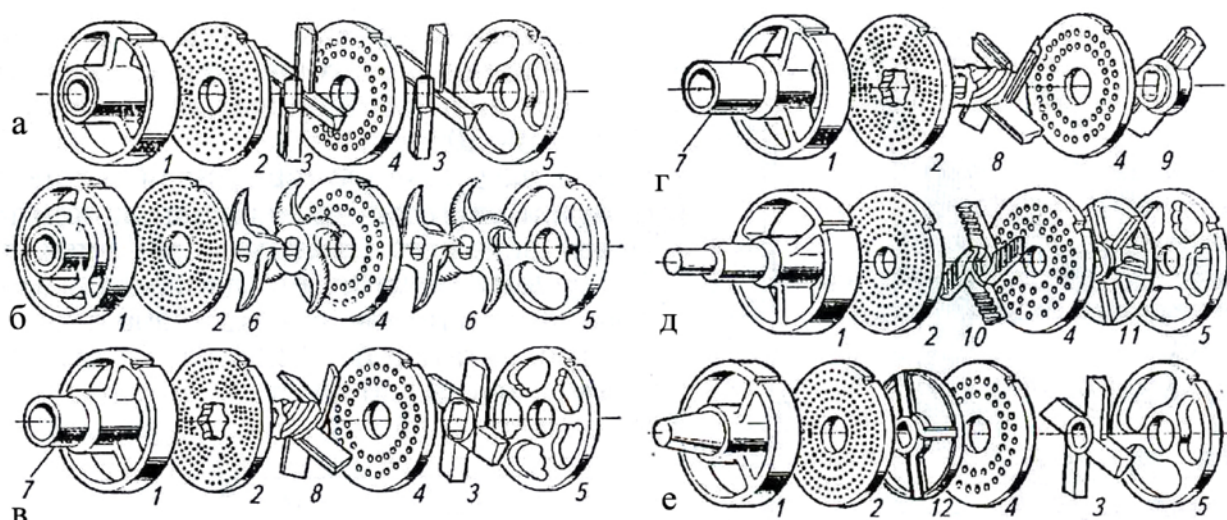


Рис. Ж.8 – Різальні механізми вовчків: а - К6-ФВЗП-200, б - К6-ФВП-160-2, в, г - фірми «Seydelmann» (Німеччина), д - фірми «Laska» (Австрія), е - фірми «Kramer + Grebe» (Німеччина): 1 - кільце-підпора, 2 - вихідні ґратки, 3 - чотиризубий ніж з прямолінійними різальними крайками, 4 - проміжні ґратки, 5 - приймальна ґратки, 6 - чотиризубий ніж з криволінійними різальними крайками, 7 - трубочаста насадка, 8, 10, 12 - жилочні чотиризубі ножі, 9 - двохзубий ніж, 11 - багатозубий ніж з обмежувальним кільцем.

Вовчки, які використовуються на м'ясопереробних підприємствах мають ще і такі недоліки. Недосконалість конструкції корпусу, робочий циліндр якого виконаний під притискну різьбову гайку, а різьбові з'єднання корпусу і гайки зношуються і піддаються корозії. Різальний механізм часто доводиться розбирати для переточування і видалення сполучної тканини. Складання і

розбирання його за наявності гайки досить ускладнене, тому що затягування різального комплексу вимагає значного фізичного зусилля. Маса гайки на промислових типах вовчків досягає значних величин (МП-1-160 - 21 кг, К6-ФВЗП-200 - 34 кг), що є травмуючим чинником при нещасних випадках, пов'язаних з експлуатацією і ремонтом обладнання. Вовчки існуючих конструкцій можна запуснути навіть за відсутності різального механізму чи затискної гайки через відсутність захисного блокування приводу, що може стати причиною нещасних випадків. Суттєвим недоліком існуючих вовчків є відсутність регулювання зусилля затягування різального механізму. Безконтрольність складання спричиняє підвищений знос різальних пар, приводу, збільшення витрат електроенергії і зниження якості фаршу.

У МДУХБ розроблені нові, досконаліші конструкції вовчків для забезпечення оптимальних умов подрібнення м'ясної сировини [6].

Вовчок (рис. Ж.9, а) працює таким чином. Після складання різального комплексу відкидна планка вільним кінцем ставиться в опорну скобу. Затискач упирається в стакан, фіксуючий ґратку та ніж на хвостовику живильника.

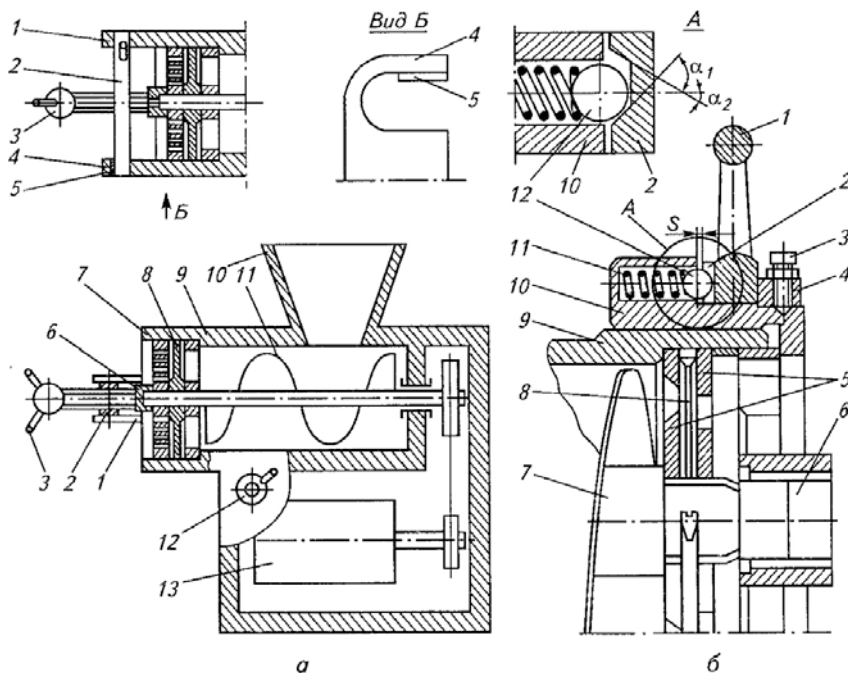


Рис. Ж.9 – Конструкція вовчків МДУХБ: а - з давачем тиску: 1 - опорний кронштейн; 2 - відкидна планка; 3 - затискач; 4 - опорна скоба; 5 - давач тиску; б - стакан; 7 - ґратка; 8 - ніж; 9 - корпус; 10 - завантажувальний бункер; 11 - живильник; 12 - важіль; 13 - привід; б - з підпружиненим робочим елементом: 1 - штурвал; 2 - змінні кільця; 3 - гвинти; 4 - стопорне кільце; 5 - набір ґраток; 6 - вал; 7 - шнек; 8 - ніж; 9 - корпус; 10 - гайка; 11 - пружина; 12 - робочі елементи [6]

При обертанні затискача різальний механізм попередньо затягнеться. Поворотом важеля керування замикається електричний ланцюг приводу, але машина не включається, тому що відсутнє необхідне зусилля затягування різального механізму, що фіксується давачами тиску. Обертанням затискача

забезпечується необхідний питомий тиск в зоні контакту гратки і ножа, про що свідчить включення вовчка в роботу. У разі перевищення тиску робота приводу блокується сигналом давача і вовчок відключається.

Для включення його в роботу необхідно обертанням затискача у зворотну сторону ослабити тиск в зоні контакту різальних пар до визначеної величини. Система блокування виключає самовключення або помилкове включення вовчка в неробочому стані, оскільки відсутнє зусилля притискання відкидної планки до давача.

Вовчок, що дозволяє оптимізувати зусилля затягування, показаний на рис. Ж.9, б. При затягуванні гайки на корпусі вовчка за допомогою штурвала виникає крутний момент, який передається через бічну стінку змінного кільця на підпружинені робочі елементи. При зростанні крутного моменту до необхідної величини, підпружинені робочі елементи, долаючи зусилля пружини, виходять з упадин і змінне кільце та штурвал повертаються відносно корпусу гайки до наступної западини. При обертанні гайки вовчка в зворотному напрямку вона відгвинчується. Кут нахилу робочих сторін упадин різний. Відношення кута нахилу поверхонь западин ( $\alpha_2 < \alpha_1$ ) дозволяє збільшити зусилля відгвинчування ( $T_2 > T_1$ ) при заклинюванні гайки під час роботи механізму.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Doll W. Untersuchungen zum Bruchvorgang von verschieden molaren Polymethylmethacrylat / W. Doll. - Freiburg: Institut für Festkörpermechanik, 1994. - 200 s.
2. Kapsalis J. G. Texture Stud: [Текст] / J.G. Kapsalis, T.E. Walker, M.I. Wolf. - 1990. - № 1. - 464 p.
3. Yamada Y. High Speed Cutting Performance of (Al, Ti)N Coated Endmills, Proc. 3rd Int. Conf. // On Progress of Cutting and Grinding Nov. 19-22. - 1996- P. 211-216.
4. А. с. СССР № 1058607, МКИ кл. В 02 С 18/30 Приёмная решётка / Филиппов В. С.-1989.
5. А.с. №686765. П.Ф. Михайленко, В.В. Пукас И.В. Петко / Режущий блок шнековой мясорубки. - Опубликовано 25.09.99 г. Бюл. Открытия изобретения, № 33. - с. 7.
6. Горбатов А.В. Реология мясных и молочных продуктов: [Текст] / А.В. Горбатов. - М.: Пищ. пром-сть, 1999. - 384 с.
7. Журавская Н.К. Исследование и контроль качества мяса и мясопродуктов / Н.К. Журавская, Л.Т. Алехина, Л.М. Отряшникова. - М.: Агропромиздат, 1985. - 296 с.
8. Комиссаров С.С. Исследование процесса измельчения мясного сырья в волчках и разработка ножевых головок : [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.18.12. / С.С. Комиссаров. - М., 2003. - 159с.
9. Кузьмин В.В. Совершенствование процесса резания мясного сырья на основе математического моделирования формы режущих инструментов [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12. С-Петербург.: 2008 с. 129 с ил.

10. Партон В.З. Механика упругопластического разрушения / В.З. Партон, Е.М. Морозов. - М.: Наука, 1995. - 504 с.

11. Пат. 2284862 Российская Федерация МПК7 В 02 С 18/36. Нож к устройству для измельчения мясopодуктов / Лобанов В. И., Жуков М. В., Трапеев Д. О.; заявитель и патентообладатель Лобанов В. И. - № 2005105479/03; заявл. 2005.02.28; опубл. 2006.10.10. - 3 с: ил.

12. Пат. № 2136371 Российская Федерация МПК7 В 02 С 18/36. Решетка для мясорубки. / Рудик Ф.Я., Богатырев С.А., Гутуев М.Ш; заявитель и патентообладатель Рудик Ф.Я., Богатырев С.А., Гутуев М.Ш - опубл. 5. 10. 1999.-5 с: ил.

13. Пелеев А.И. Износ инструмента в процессе резания мяса: [Текст] / А.И. Пелеев, М.Н. Клименко; ЦИНТИпищепром // Мясная и птицеперерабатывающая пром-сть: Науч.-техн. информ. - М., 1986. - Вып.5. - С.4-7.

14. Пелеев А.И. Исследование процесса резания мяса лезвием, установленным под углом / А.И. Пелеев, М.Н. Клименко; ЦИНТИпищепром // Мясная и птицеперерабатывающая пром-сть: Науч.-техн. информ. - М., 1986. Вып. 6. - С. 2-5.

15. Пелеев А.И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности: [Текст] / А.И. Пелеев. - М.: Пищевая промышленность, 1971. - 519 с.

16. Регель В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. - М.: Наука, 1994. -560 с.

17. Резник Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов: [Текст] / Н.Е. Резник. - М.: Машиностроение, 1995. - 311 с.

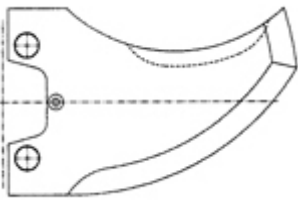
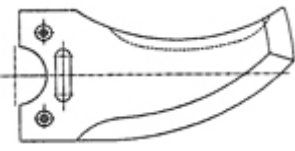
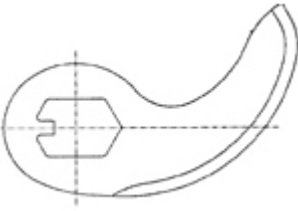
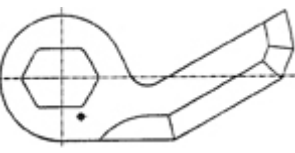
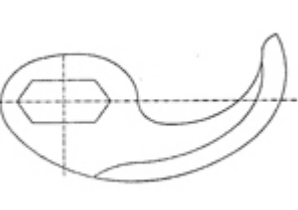

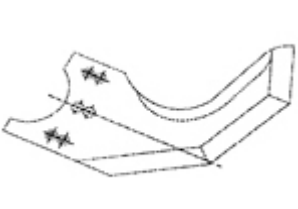

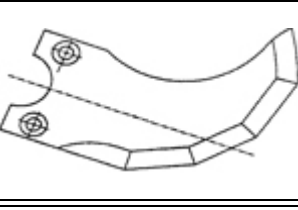

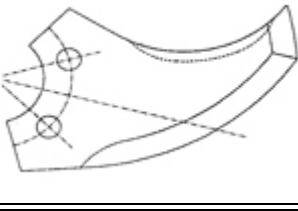
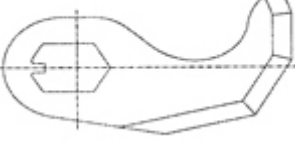
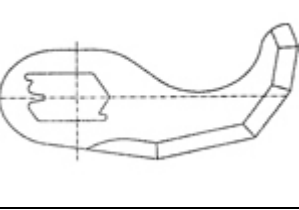

18. Сидоряк А.Н. Основные допущения, используемые для разработки математической модели нового способа измельчения мясного сырья / А.Н. Сидоряк, Р.И. Шевляков, О.И. Якушев // Теоретические и практические аспекты применения методов инженерной физико-химической механики с целью совершенствования интенсификации технологических процессов пищевых производств: сборник научных трудов. — М.: МГУПБ, 2002. — С.

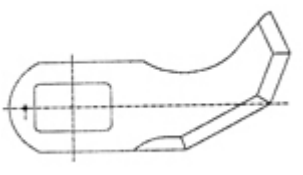
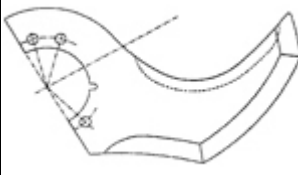
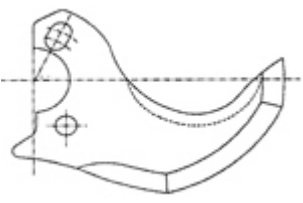
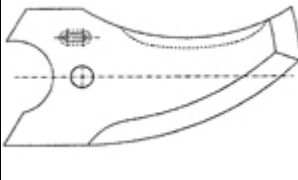


19. Сидоряк А.Н. Улучшение структурно-механических свойств мяса за счет нового способа измельчения / А.Н. Сидоряк, Р.И. Шевляков, О.И. Якушев // Теоретические и практические аспекты применения методов инженерной физико-химической механики с целью совершенствования и интенсификации технологических процессов пищевых производств. — М.: МГУПБ, 2002. - С. 57-60.

20. Соколовский В.В. Теория пластичности: [Текст] / В.В. Соколовский. - М.: Высш. шк, 1989. - 608 с.

21. Юрков С.Г. Куттерование - динамический процесс / С.Г. Юрков, А.В. Бесидский, С.В. Божьев // Повышение энергоэффективности техники и технологий в перерабатывающих отраслях АПК: Сборник научных трудов. - М.: МГУПБ, 2004. - С. 284-286.

Види кутерних ножів

Назва ножа	Схема ножа	Назва ножа	Схема ножа
1	2	3	4
Відкритий ніж		Відкритий ніж	
Закритий ніж із упорним виступом		Закритий ніж	
Закритий ніж		Відкритий ніж	
Відкритий ніж Meicssner		Закритий ніж із упорним виступом	
Відкритий ніж		Закритий ніж	
Відкритий ніж ALPINA		Закритий ніж із упорним виступом Seydelman	
Закритий ніж із упорним виступом Seydelman		Закритий ніж CRI	

Назва ножа	Схема ножа	Назва ножа	Схема ножа
1	2	3	4
Закритий ніж CRI		Відкритий ніж Laska	
Відкритий ніж Laska		Відкритий ніж Laska	
Відкритий ніж		Відкритий ніж ALPINA	



## Характеристика інших подрібнювачів

### II.1. Конструкції дезінтеграторів і відцентрових подрібнювачів

Для подрібнення м'ясопродуктів також використовують дезінтегратори, в яких регулювання ступеня подрібнення і продуктивності регулюють зміною торцевого проміжку між дисками. На рис. II.1 приведений дезінтегратор, що складається з приймального бункера 1, горловини 2, що вставляється в стакан 3, нерухомого диска 4, забезпеченого зубами, і зубчастого диска 5, що обертається, змонтованого на втулці 6, яка закріплена на валу 7 електродвигуна 8. Диски розташовані в камері подрібнення 9, прикріплені до фланця 10 корпусу машини. Камера подрібнення забезпечена відкидною кришкою 11 з маховичком 12. Зубчастий диск 5 обертається на втулці 6, яка закріплена на валу 7 електродвигуна 8. Диск 4 нерухомий і має зуби, які взаємодіють з зубами диска 5. Диск 5 має три лопатки 15. Кришка 11 відкидається за допомогою маховичка 12. Диск 4 прикріплено до фланця 10 корпусу машини. Диск 5 прикріплено до втулки 6, яка закріплена на валу 7 електродвигуна 8. Диск 5 обертається, а диск 4 нерухомий. Диск 5 має зуби, які взаємодіють з зубами диска 4. Диск 5 має три лопатки 15. Кришка 11 відкидається за допомогою маховичка 12. Диск 4 прикріплено до фланця 10 корпусу машини. Диск 5 прикріплено до втулки 6, яка закріплена на валу 7 електродвигуна 8. Диск 5 обертається, а диск 4 нерухомий. Диск 5 має зуби, які взаємодіють з зубами диска 4. Диск 5 має три лопатки 15. Кришка 11 відкидається за допомогою маховичка 12.

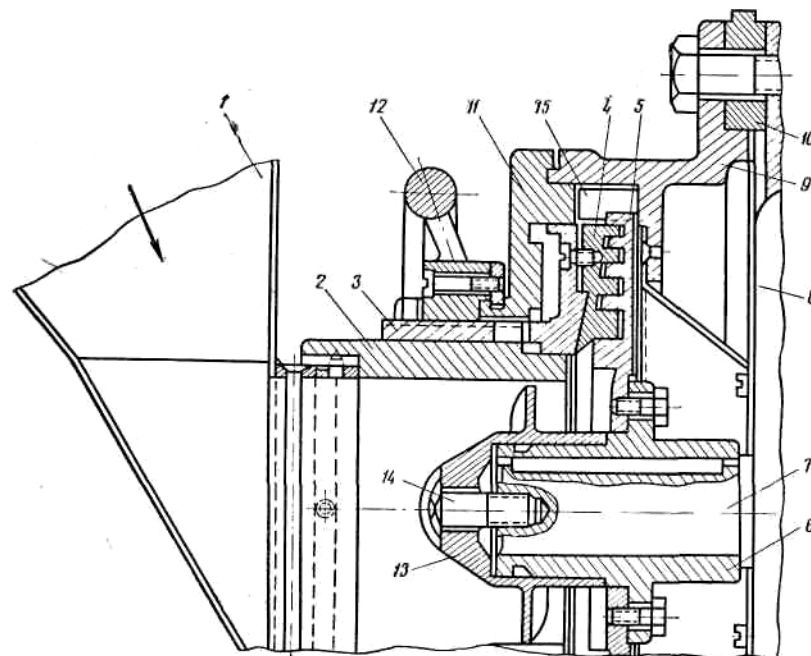


Рис. II.1 – Дезінтегратор (Чеська республіка).

Продукція, що подається в приймальний бункер 1 за допомогою шнека 13, закріпленого гвинтом 14 на валу 7, спрямовується в зону між дисками 4 і 5, де під дією ударів і зсуву між зубами дисків відбувається її подрібнення та інтенсивне перемішування. Відцентровою силою маса відкидається від центру до краю дисків. По периферії диска, що обертається, закріплені три лопатки 15, що виштовхуються подрібнену масу у відповідний рукав.

Дезінтегратор застосовується при подрібненні заздалегідь пропущеного через вовчок чи кутер м'яса і перемішуванні його з добавками. Він простий за конструкцією, малогабаритний, має високу продуктивність, але при подрібненні спостерігається значне перетирання і нагрівання продукції. Відмічається у складність у ремонті зубчастих дисків.

Відцентрові подрібнювачі отримали широке застосування при дрібному і тонкому подрібненні м'ясопродуктів. Це пояснюється простотою конструкції їх

робочих органів і відсутністю спеціальних механізмів для подання і відведення продукції. Подрібнення в них здійснюється ножами з парною різальною деталлю, виконаною у вигляді циліндричного, конічного або складної форми перфорованого барабана. Ножі встановлені всередині або поза барабаном та обертаються з більшою кількістю обертів, ніж барабан, або закріплені нерухомо.

Такі машини успішно застосовуються при подрібненні жирової сировини, поєднаному з випларкою жиру, при дефібринуванні крові та ін. При подрібненні м'яса відсутність постійної сили притискання ножів до ґратки і наявність проміжку між ними знижують ефективність машин.

У відцентровому подрібнювачі з перфорованим барабаном (Німеччина) в нерухомому корпусі 1 (рис. И.2) змонтований порожнистий вал 2 з провідним диском 3. На диску встановлені нерухомі осі 5, а на них шарнірно закріплені ножі 4, які притискаються відцентровою силою до внутрішньої стінки перфорованого барабана 6. До порожнистого валу прикріплені лопатки 7, що відкидають продукцію, що поступає, від центру до барабана 6. Порожнистий вал 2, лопатки 7, ножі 4 і диск 3 складають ротор машини, що обертається з більшою кутовою швидкістю, ніж барабан 6, при цьому створюється ковзання ножів по барабану і відбувається перерізання продукції. Шматочки її, відрізані ножами, протискуються через отвори в стінках барабана 6 і лопатками 8, прикріпленими до стінки барабана, видаляються у відповідний рукав 9.

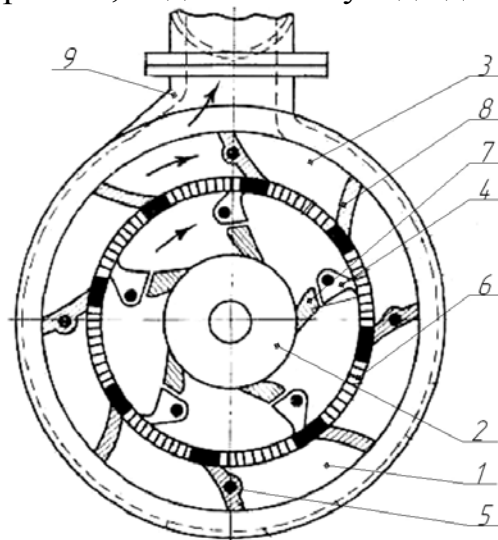


Рис. И.2 – Відцентровий подрібнювач

Відцентрова сила, що притискає ножі до ґратки, практично не залежить від величини зносу леза ножа і ґратки. Величину її, що припадає на одиницю довжини леза, можна змінювати, міняючи для цього профіль ножа, збільшуючи або зменшуючи величину активної площі його перерізу. Отже, практично забезпечується постійність умов подрібнення без зупинки машини і розбирання робочих органів для компенсації зносу. Разом з тим, при такому способі різання, ступінь подрібнення не можна регулювати на ходу машини, а потрібно замінювати барабан.

## И.2. Конструкції колоїдних млинів та емульситаторів

Колоїдні млини застосовують для обробки м'якої м'ясної сировини. Сировину в різальний механізм подають вручну, вона може поступати самопливом, за допомогою насосів або під вакуумом. Подрібнений продукт витісняється деталями різального механізму або переміщається дисками, що обертаються, лопатями, шнеками.

Наприклад, різальний механізм колоїдного млина «Кошта» (Німеччина) є горизонтальні корундові круги. Корунд - матеріал, по твердості перевершуючий алмаз. Нижній розмельний круг (ротор) обертається з частотою  $50 \text{ с}^{-1}$ , а верхній (статор) залишається нерухомим. Сировина подається через живильну лійку і, під впливом відцентрової сили, поступає до периферії розмельних кругів, де подрібнюється. Подальша обробка відбувається в зонах завихрення під впливом кавітаційних сил [5].

Колоїдний млин К6-ФКМ (рис. И.3) призначений для тонкого подрібнення м'якої м'ясної сировини. Він складається із завантажувального бункера 1, гвинтової лопатки, накидної гайки 7, подрібнюючого механізму 2, патрубку і привода. Завантажувальний бункер 1 має конусоподібну форму. Накидна гайка 7 з'єднує завантажувальний бункер 1 з подрібнюючим механізмом, 2, який складається з ротора і статора. Ротор включає верхній, середній і нижній диски.

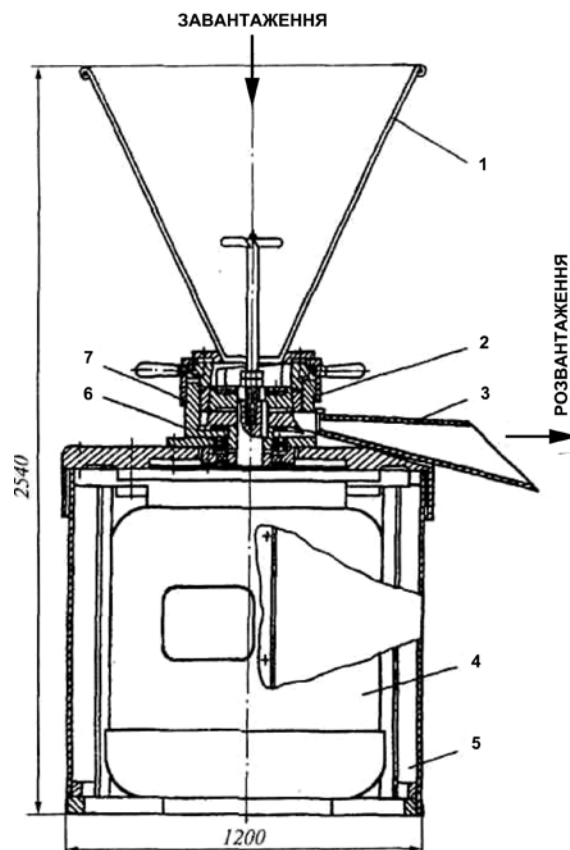


Рис. И.3 – Колоїдний млин К6-ФКМ

На станині 5 встановлений також розвантажувальний бункер 3 і корпус подрібнювача 6. Продуктивність млина залежить від ступеня подрібнення сировини. Її регулюють, змінюючи кільцевий проміжок між ротором і

статором. Межі регулювання зазору між ротором і статором складають 0,05... 1,50 мм. Привід здійснюється від електродвигуна 4. Продукт завантажують у бункер. Під дією сили тяжіння він потрапляє в різальний механізм, проходить через проміжок між ротором і статором, подрібнюється і, через патрубок, вивантажується [5].

Емульситатори та інші машини для тонкого подрібнення, призначені для подрібнення м'яса і м'ясопродуктів, перетворюючи їх в однорідну гомогенну масу, що має певні структурно-механічні властивості. Сировину, як правило, попередньо подрібнюють на вовчках та кутерах.

Подрібнювач системи ANCO (США) складається з привідної та робочої частини (рис. И.4). Перша включає в себе електродвигун 1, закріплений на плиті 2, що опирається на стійку 3. Електродвигун через клинопасову передачу 4 приводить в обертання порожнистий вал, через який проходить штанга 5. Порожнистий вал встановлений у підшипниках, закріплених у корпусі 6. На вільному кінці порожнистого валу змонтовано різальний механізм, що складається з ножів та ґраток.

Робоча частина машини включає в себе приймальний бункер 7 и горловину 8, вони з'єднані між собою через муфти 9, що спираються на дві направляючі 10. Горловина своїм торцевим зрізом підходить впритул до фланця корпусу 6, а ущільнення на поверхні їх прилягання забезпечується важелем 11, що переміщає робочу частину по направляючих 10. Обертовий ніж захоплює продукцію із завантажувальної горловини, ріже і проштовхує її через нерухому ґратку з маленькими отворами. Зі сторони виходу продукту передбачений трьохкінцевий витискач, що виштовхує продукцію в розвантажувальний рукав 12. Загальний вигляд завантажувального бункера та зубчастих робочих органів емульситатора поданий на рис. И.5.

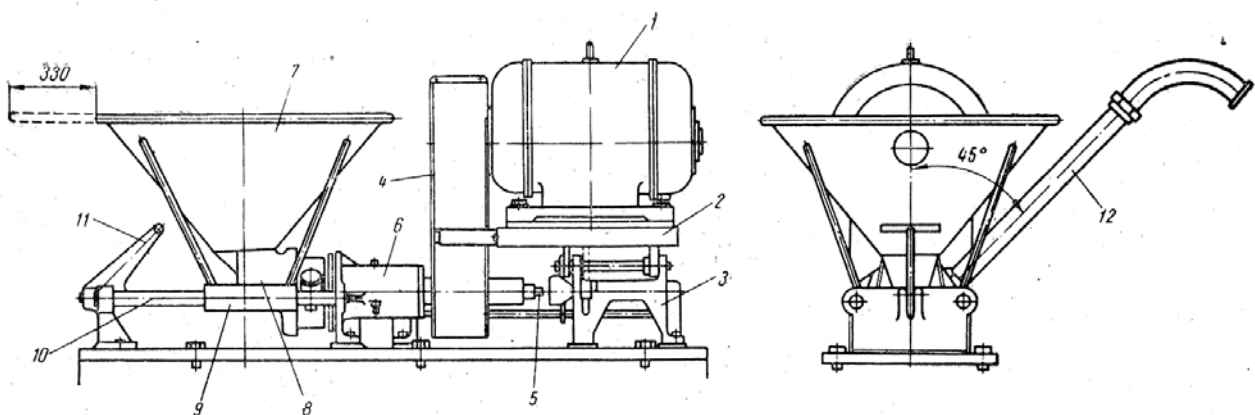


Рис. И.4 – Схема емульситатора ANCO: 1 – електродвигун; 2 – плита; 3 – стойка; 4 – клинопасова передача; 5 – штанга; 6 – корпус; 7 – приймальний бункер; 8 – горловина; 9 – муфти; 10 – направляючі; 11 – важіль; 12 – розвантажувальний рукав

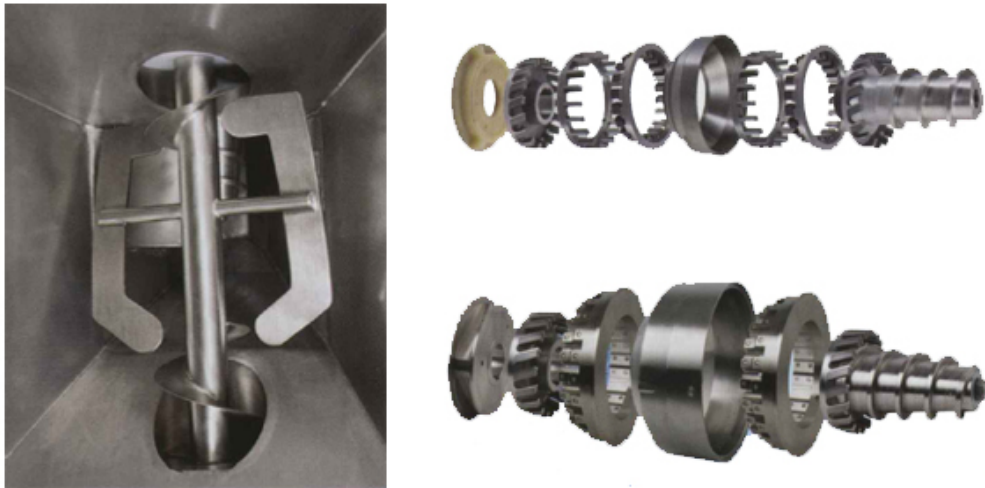


Рис. И.5 – Загальний вигляд завантажувального бункера та зубчастих робочих органів емульситатора.

Машина К6-ФИ2-М (рис. И.6) призначена для тонкого подрібнення фаршу при виробництві сосисок, безструктурних варених ковбас, консервів, а також для подрібнення субпродуктів при виготовленні ліверних ковбас.

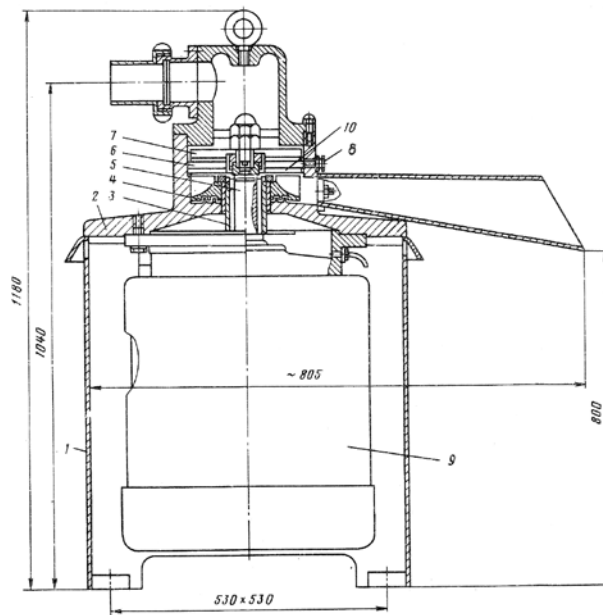


Рис. И.6 – Емульситатор К6-ФИ2-М: 1 - станина; 2 - циліндричний корпус; 3 - маточина; 4 - розвантажувальний диск; 5 - вал електродвигуна; 6 - нерухома ножова гратка; 7 - рухомий ніж; 8 - фіксуючий гвинт; 9 - електродвигун; 10 - підпорка

М'ясна сировина, попередньо подрібнена на вовчку з діаметром отворів ножової гратки 3мм і змішана зі снігом та холодною водою (температурою не вище 6°С), насосом накопичувача подається у робочу камеру машини, в якій розміщується різальний механізм. Зазор між рухомим ножем та нерухомою граткою регулюється за допомогою прокладок і гайок кріплення ножа.

Емульситатор АТИМ-1 (рис. И.7) – це машина вітчизняного виробництва. Складається він з вертикального корпусу 7 з розташованим у ньому спеціальним електродвигуном 6 типу АВ 71-12 потужністю 28 кВт і кількістю обертів 2960 за хвилину, на кінці вала 11 якого закріплений різальний механізм, що складається з нерухомої ґратки 3 з отворами діаметром 1,5мм і рухомого ножа 10.

Для регулювання зазору між ножем та ґраткою слугує спеціальний механізм 8, що приводиться в рух від ручного маховичка (лімба).

Різальний механізм розташований в закритій головці 1, яка має вхідний патрубок, через який в головку подають м'ясо. Подрібнене м'ясо забирається лопаткою 9 і подається до розвантажувального лотка 4.

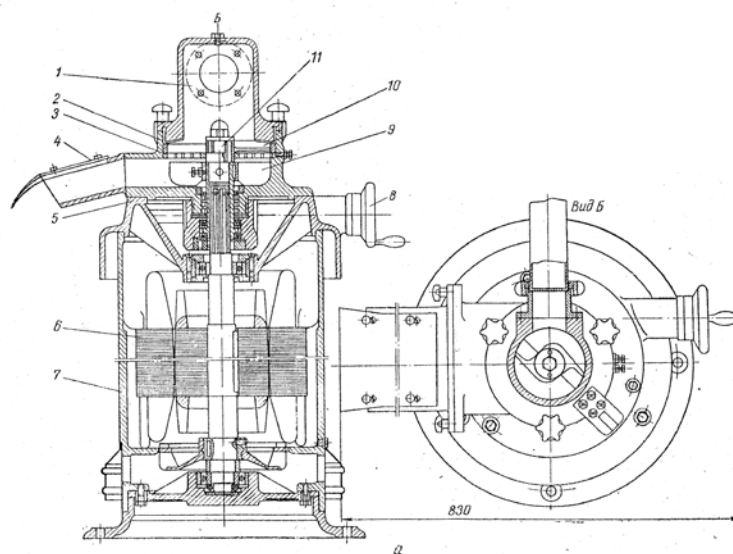


Рис. И.7 – Емульситатор АТИМ-1: 1 – завантажувальна головка; 2 – опірне кільце; 3 – нерухома ґратка; 4 – вивантажувальний лоток; 5 – головка станини; 6 – електродвигун; 7 – вертикальний корпус; 8 – регулятор зазору; 9 – лопатка для вивантаження; 10 – рухомий ніж; 11 – вал

### И.3. Комбіновані та інші подрібнювачі м'ясопродуктів

За останній час все більшого поширення набувають м'ясорізальні апарати, що дозволяють виконувати дві суміжні технологічні операції: подрібнення і перемішування. Випуском таких машин зайнялися багато підприємств і фірм [7, 1, 2].

Фахівцями НВО «Ленмясомолмаш» (Росія) створений ряд моделей агрегатів, на яких виконується подрібнення жилованого м'яса і перемішування його з інгредієнтами посолів. На базі вовчка К6-ФВП-160 був створений агрегат Я2-ФХ2Т. До такого ж типу м'ясорізальних агрегатів відносяться вовчки фінського виробництва типу LM-82/К і LM-22/К.

Вовчки в комплексі зі змішувачами серії LM, в які м'ясо потрапляє автоматично, дозволяють подрібнення і змішування здійснюється одночасно, за рахунок оснащення живильного вала гвинтовими лопатями [2].

Вовчки німецького виробництва фірми «KILIA G-160 і U-200», окрім подрібнювального і перемішувального пристроїв мають сепарувальний і розділюючий пристрої. Особливою перевагою цієї комбінованої машини є окремий отвір для матеріалів змішувача, що дозволяє обережно розвантажувати нижні продукти [3].

Лопаті змішувачів розташовуються в приймальній лійці, що дозволяє інтенсивно перемішувати її вміст. Під час перемішування транспортуючий шнек працює у зворотному напрямі. За рахунок сепарувального пристрою сухожилля, хрящі, частинки кісток та інші тверді фракції акуратно відділяються, що значно покращує якість подрібненої сировини, спрощує проходження крізь різальний пристрій, що значно подовжує термін експлуатації різального механізму.

До такого ж класу відносяться вовчки-автомати німецької фірми «Зайдельманн КГ» [7]. Вовчок-змішувач обладнаний чашею, місткістю від 100 до 600 кг сировини, і дозволяє спочатку перемішувати м'ясо різних сортів, а потім робити його рівномірне подрібнення до отримання маси необхідної структури і консистенції.

Видалення твердих включень, хрящів і дрібних кісточок здійснюється за допомогою спеціальних жиловочних ножів. Конструкції таких ножів різні, але загальним є те, що за допомогою нахилу леза або виконання на ньому канавок, частки, що видаляються, нагнітаються або до центру, або до периферії ножа.

У першому випадку, коли тверді частки нагнітаються до центру, їх видалення здійснюється через патрубок, що встановлюється в центрі ґратки, а в другому випадку - через бічний отвір робочого циліндра. За першим принципом працюють сортувальні пристрої фірми «Зайдельманн» [7], «Ласка» [1], за другим - обладнання фірми «Кремер-Греббе» [4]. Нині вовчка такого типу випускаються і на Полтавському заводі «Продмаш» марки ФВП-200, на Свердловському машинобудівному заводі (Росія).

Вовчок-змішувач виробництва фірми «K+G Wetter» дозволяють робити подрібнення сировини з попереднім перемішуванням неоднорідної м'ясної сировини з додаванням ряду інгредієнтів. Перевагами комбінації вовчка зі змішувачем є скорочення тривалості робочого циклу і виключення мішалки із складу технологічної лінії. Перемішування продукту виконується валом змішувача з лопатями, розташованими над подавальним шнеком. При перемішуванні подавальний шнек обертається в напрямку, протилежному до робочого, що дозволяє підвищити ефективність перемішування. Після перемикання на подрібнення змінюється напрям обертання вала змішувача і подаючий шнек передає оброблюваний матеріал на розташований нижче робочий шнек, який підводить матеріал до різальної насадки.

Німецька фірма «Risko» виготовляє вовчок-наповнювач RS70, інтегрований з вакуумними шприцями RS3005 і RS5005. Можливість виконання операцій подрібнення, порціонування, перекручування і клипсування в одній машині перетворює вовчок в універсальну машину. Для поліпшення якості фаршу подрібнення може виконуватись в середовищі двоокису вуглецю.

Вовчок «Ultra MEW726» фірми «Maschinenfabrik Dornhan GmbH» (Німеччина) оснащується системою перемішування у великооб'ємній завантажувальній чаші, розташованій перед камерою наповнення. Продуктивність - 1,4 т/год при застосуванні ґраток діаметром 114 мм. Привід м'ясорубки - двошвидкісний з можливістю реверсу. У виробничу програму цієї фірми входять вісім моделей автоматичних вовчків серії «Ultra». Базова модель MEW 620 має одну постійну швидкість для подавального і робочого шнеків. Продуктивність моделей, що випускаються, складає від 1 до 8 т/год.

Вовчки фірми «Bizibera» (Німеччина) ФFW-N32 і FW-N98 випускаються у вигляді настільних або пересувних підлогових установок. Продуктивність - від 350 до 1100 кг/год. Для роботи в торгових залах, супермаркетах або на міні-виробництвах фірма виготовляє вовчки моделей FW-N22 і FW-N82 з місткістю чаші 8 і 13 л.

Особливий інтерес представляють вовчки-змішувачі виробництва німецької фірми «Kilia», оснащені автоматичною системою миття.

Розміщені в кришці машини сопла мають кут розпилення 120°, що забезпечує доступ до всієї внутрішньої поверхні чаші. Корпус шнека очищується за допомогою стержня, забезпеченого соплами. Залежно від ступеня забрудненості можна вибрати різні програми чищення.

Установка управляється за допомогою комп'ютерної програми, що регламентує очищення і дозволяє робити документування, що важливо для сертифікації відповідно до стандарту ISO 9000.

На ринку м'ясопереробного устаткування є вовчки, що виконують переробку м'яса з охолодженням. В процесі обробки температура фаршу збільшується під впливом тертя і тиску, що негативно впливає на органолептичні властивості, гігієнічність, поживну цінність продукту і його збережуваність.

Італійська фірма «La Minerva» випускає вовчки з системою охолодження. У цих вовчках м'ясо в процесі переробки і транспортування торкається тільки холодних поверхонь (температура від 1 до 5°C), що забезпечує збереження органолептичних властивостей і поживної цінності м'яса, а також підвищує гігієнічність технологічного процесу.

Для ковбас усіх сортів призначені змішувачі німецького підприємства «Stork & Herrmann». Фірма «Tielen Metaalbewerking» виготовляє пересувні змішувачі ряду «Desa NL» з чашами місткістю 64 і 100 л. Вони застосовуються для виробництва м'ясних фаршів, салатів, фрикадельок. Машини дозволяють виконувати маринування, обробку спеціями м'яса, риби, птиці, креветок і можуть застосовуватися для масажування окостів, шинкових виробів, яловичих язиків.

У комбінованих подрібнювачах застосовують робочі органи двох типів: одиночні ножі і ножі, що мають парну різальну деталь, виконану у вигляді плоских, циліндричних або конічних ґраток, ножів, пристроїв кавітації або дезінтеграторів [8].

Комбінований подрібнювач Зайцева складається із завантажувального бункера 1 (рис. И.8, а), циліндра 2 з шнековим живильником 3, який



закінчується циліндричною вставкою 4, що торкається хрестоподібного нерухомого ножа 5, по якому ковзає двухперий серповидний ніж 6 (перша різуча пара, що здійснює початкове подрібнення). Ніж 6 монтується на валу 7 електродвигуна 8. На валу 7 встановлена втулка 9 барабана 10, бічні стінки якого перфоровані. До внутрішньої стінки барабана притиснутий нерухомий ніж 11 (друга різальна пара), а до зовнішньої - прикріплена конусна обичайка 12, що зміщує масу до вивантажувального лотка 13 кожуха 14. Для повного звільнення обичайки від подрібненої маси передбачений шкребок 15. Один з двох електродвигунів машини приводить різальний механізм, інший – живильник через редуктор і варіатор швидкості.

У кутері-вовчку того ж винахідника змонтовані три різальні пари: у кінці шнека змонтовані упорна гратка, зв'язана із зубчастим ножем (перша пара, що здійснює грубе подрібнення кускового м'яса). Далі на швидкообертovому валу встановлені серповидні ножі з одностороннім заточуванням (друга пара для середнього подрібнення), а у кінці - двухперий ніж, спарений з нерухомою плоскою решіткою (третья пара для тонкого подрібнення) [8].

Випробування цієї моделі показали задовільну роботу при подаванні разом з кусковим м'ясом снігу. Проте відмічена підвищена витрата енергії: при продуктивності машини 800 кг/год потужність електродвигуна до різального механізму 28 кВт, а до живильника — 1 кВт (питома витрата енергії близько 36 кВт·год/т).

Комбінований подрібнювач марки ФІЛ (рис. И.8,б) побудований з використанням поодиноких серповидних ножів і різальної пари, складеної з двох зубчастих дисків.

Корпус шнекового живильника 1 машини приєднаний до відкидної кришки 2 кожуха 3 машини. Кришка 2 несе нерухомий зубчастий диск 4. На валу 5 електродвигуна 6 закріплена втулка 7, яка має зубчастий диск, що обертається, 8 і серповидні ножі 9. Сировина, що подається шнековим живильником 1, спершу поступає під серповидні ножі 9 для попереднього подрібнення, а потім спрямовується в проміжок між дисками 4 і 8 і тонко подрібнюється їх зубцями. Досягши периферії дисків вона, по рукаву 10 відводиться в транспортувальну тару або машину для подальшої обробки.

Комбінований подрібнювач з трьома послідовно працюючими ножами приведений на рис. И.8,б. Він призначений для тонкого подрібнення кускового м'яса. Машина складається з шнекового живильника 1, кінець якого встановлений у корпусі 2, що включає зовні фланець 3 з нерухомим диском 4, а всередині розташовані грати 5, що є опорою для кінця вала шнека 1. Поряд з граткою 5 змонтований плоский ніж 6, а за ним двухперий ніж із зубчастим лезом 7. Ніж 7 і диск 8, що обертається, змонтовані на днищі барабана 9, закріпленого на валу 10 електродвигуна за допомогою болта 11. Днище барабана несе на собі перфоровану стінку, до внутрішньої поверхні якої притиснутий нерухомий ніж 12. Барабан розташований в корпусі 13, який через фланці відкидними болтами 14 прикріплений до проміжної стійки 15. Між фланцями передбачені прокладки 16. До зовнішньої поверхні барабана

приварена гвинтова поверхня 17, що зміщує подрібнену продукцію до розвантажувального рукава 18 [8].

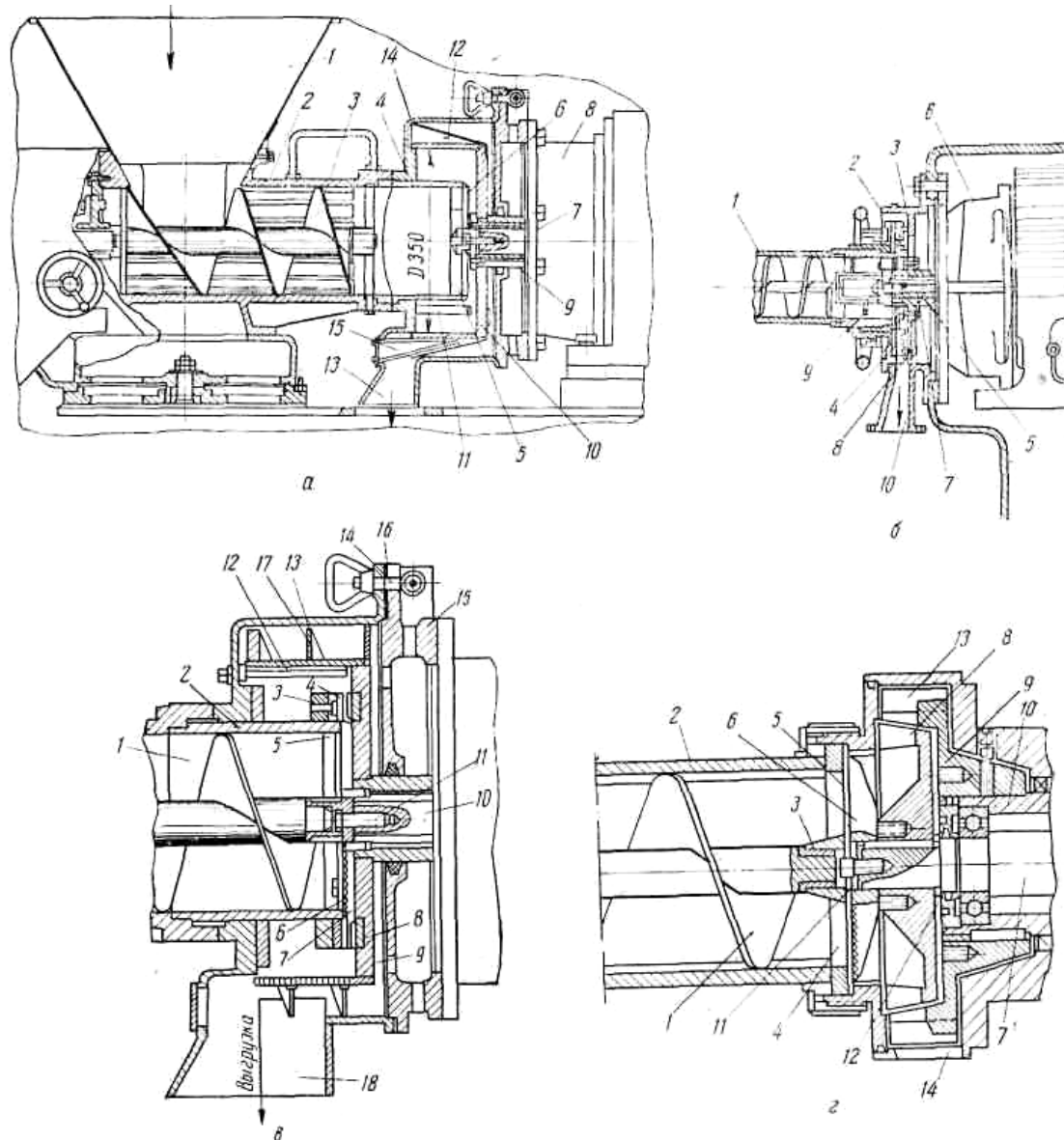


Рис. И.8 – Комбіновані подрібнювачі.

Робоча частина комбінованого швидкісного подрібнювача (авт. свід. № 168138) зображена на рис. И.8, г. Живильний шнек 1 машини знаходиться в корпусі 2. Вільний кінець вала шнека, що спирається на втулку 3 і опорні диски 4, спарений з нерухомим пластинчастим ножом 5. Поряд з останнім розташований ніж 6, який швидко обертається, із зубчастим лезом. Деталі 5 і 6 призначені для попереднього подрібнення кускового м'яса, причому ніж 6 змонтований на валу 7, який одержує обертання від окремого електродвигуна. На валу 7 змонтована чашоподібна корончаста різальна головка 8 спеціальної конструкції, забезпечена вставними гострозаточеними лезами. Парною деталлю до неї є друга корончаста чашоподібна головка 9, закріплена на полуму валу 10, та на валу 7, який обертається зустрічно 7. З метою отримання гарантованого

зазору між лезами ножів корончастих головок і компенсації їх зносу між головками передбачені прокладки 11 і 12. Корончасті головки мають виступи для установки ножів. Між ними передбачені радіальні канали для переміщення фаршу. До зовнішньої корончастої головки 9 прикріплена лопать 13, яка викидає подрібнену масу в розвантажувальний рукав 14.

Ця машина принципово відмінна від усіх розглянутих вище як по компонованню, так і по конструкції різального механізму, виконаного у вигляді двох прилеглих паралельних твірних конусів з регульованим за допомогою прокладок гарантованим зазором між ними. Зустрічне обертання головок помітно збільшує різальну здатність механізму, а гарантований зазор виключає взаємний контакт деталей різального механізму, що повинно привести до зниження втрат енергії на подрібнення і, відповідно, до зменшення нагрівання фаршу при подрібненні.

Аналіз конструкцій машин для тонкого подрібнення м'яса і досвід їх експлуатації дозволяє зробити висновок, що поєднання в одній машині попереднього і остаточного подрібнення м'яса з наданням фаршу остаточної консистенції призводить до істотного ускладнення конструкцій робочих органів і, природно, до значного підвищення питомих витрат енергії. При цьому виключається посол м'яса після його попереднього подрібнення, який в свою чергу прискорює дозрівання.

Облаштування машини одинарними серповидними ножами, запропоноване Бобильовим, показано на рис. И.9, а [8].

Барабан 1 обертається від порожнистої цапфи 2, всередині якої розміщений шнека 3, забезпечений завантажувальним бункером 4. На стороні подавання сировини у барабані встановлений відбійний щит 5 з кільцем 6, що направляє продукцію в робочу зону барабана. Гребінка 7 з направляючими пластинами служить для переміщення і осьового зміщення фаршу. Вона закріплена на утримувачі 8, вільний кінець якого забезпечений гвинтом 9, що регулює розташування гребінки. У нижній частині барабана розташований вал 10, який обертається в дію безпосередньо від електродвигуна 11, або через проміжну передачу. На валу 10 закріплені ножі 12. За час проходження продукції уздовж осі барабана вона має бути достатньо подрібнена. Шкребок 13 направляє її у лоток 14.

Очевидно, що така машина має бути великогабаритною, з малим коефіцієнтом активного використання об'єму барабана та значною площею тертя металевих деталей, продукти зносу яких потрапляють у фарш.

Схема ножового подрібнювача, запропонованого Неведомским і Кравченком, приведена на рис. И.9,б. У циліндричному корпусі 1 змонтований вал, що обертається від електродвигуна 2, з серповидними ножами 3 і шкребок 4, призначеним для очищення вихідної стінки корпусу, забезпеченої лотком 5 для видачі подрібненої маси. Сировину подають в завантажувальний бункер 6. Фарш переміщується уздовж осі корпусу під дією ножів 3 з одностороннім заточуванням. Тривалість і ступінь подрібнення регулюють зміною площі вихідного отвору в передній стінці 7, на якій передбачені дві засувки, що зміщуються по напрямних [8].

Розглянуті машини прості за своєю конструкцією, але в них відсутнє організоване переміщення продукції, автоматичне регулювання тривалості і гарантованого ступеня подрібнення.

На рис. И.9, в даний поздовжній розріз багатоножового подрібнювача Грачева. Барабан 1, що безперервно обертається, має усередині шість циліндричних виточок 2, в кожній змонтований вал 3, що несе серповидні ножі з одностороннім заточуванням 4, які отримують планетарний рух. Усі виточки попарно з'єднані каналами 5, що забезпечують послідовне проходження сировини через увесь комплект різальних механізмів. Барабан 1 отримує обертання від електродвигуна 6 через клинопасову передачу 7 (у останніх конструкціях веденим шківом є сам барабан). Сировина по трубі 8 нагнітається в першу виточку, звідки, пройшовши подрібнення, по каналу 5, спрямовується в наступну виточку і т.д., причому остання по ходу руху продукції виточка має вікно 9, через яке подрібнена маса поступає в розтруб барабана і шкребком 10 видаляється з машини.

Для подання в робочу частину розсолу передбачена центральна труба 11; труба 12 призначена для відсмоктування повітря із зони роботи ножів і підтримки там вакууму. Ножові вали 3 отримують планетарний рух через шестерні 13 і 14.

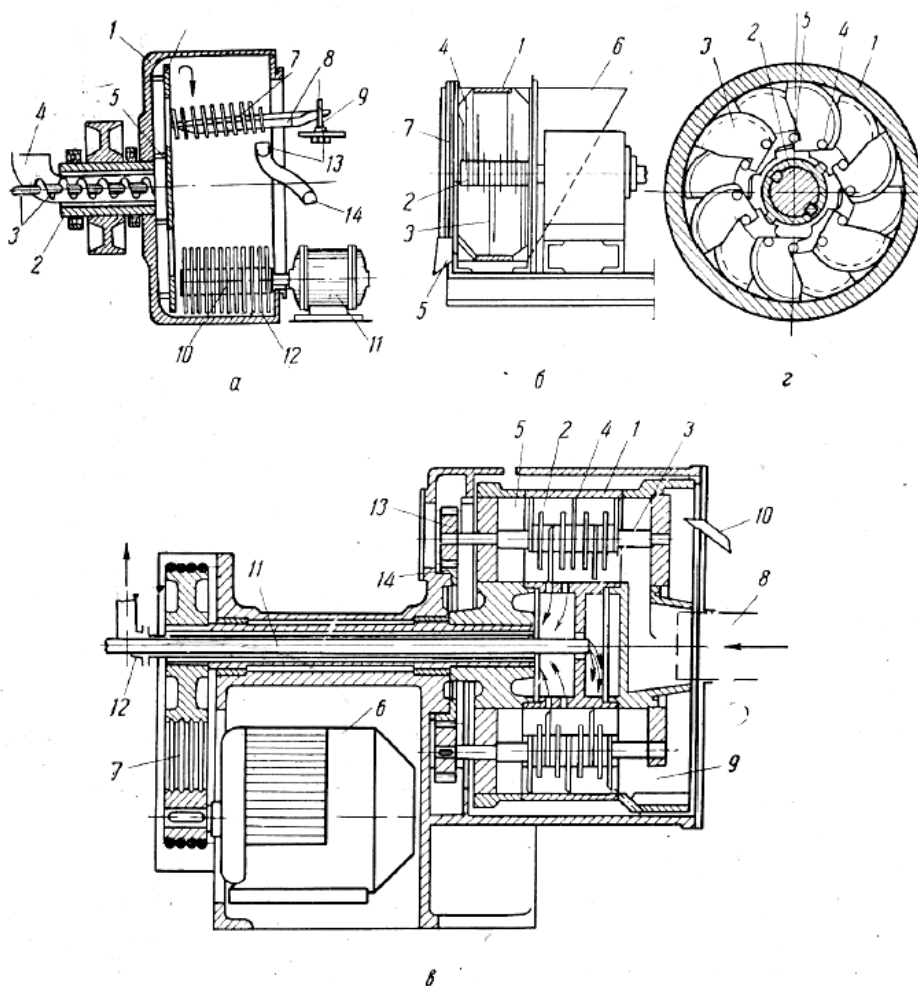


Рис. И.9. Ножові подрібнювачі безперервної дії

Ця машина досить компактна, проте складна і важко піддається санітарній обробці. При зупинці в її барабані і подавальній трубі залишається значна кількість фаршу з різною мірою готовності, яка потребує обробки іншими машинами або залишається до подальшого пуску машини. Складні складання, розбирання і контроль за правильністю установки ножів; відсутність обмежувачів переміщення маси при різанні її ножами призводить до зайвого її перетирання і нагрівання. Наявність вакууму в робочій зоні ускладнює переміщення і вивантаження фаршу у відкритий простір [8].

Вакуумний вертикальний подрібнювач (патент США № 3095022) складається із закритого корпусу 1 (рис. И.9, г) з валом 2, на якому закріплені більше 100 ножів 3, встановлених по шість в ряд. Кожен ніж забезпечений віссю повороту 4 і обмежувачем 5, що виключає ковзання леза ножа по корпусу. Переміщення сировини відбувається під дією гравітаційної сили і вакууму, а вивантаження під дією власної ваги.

Подрібнювачі «Пук-Викозатор» (Німеччина) мають два змінні різальні механізми: один - для кутерування і другий - для роботи за принципом дезінтегратора. У першому випадку використовуються ножі і ґратки, в другому - механізм, за конструкцією близький до механізму мікрокутера марки МС-12.

Запропоновані подрібнювачі, виконані у вигляді ексцентриковолопатевого витискувачів (автори Андрєєв і Кожелякіна), в яких обертальний барабан, забезпечений лопатями, що закінчуються гострими лезами, ковзаючими по ґратчастому вставному циліндру, розділеному на дві частини. На стороні завантаження сировини отвори в циліндрі великі і через них м'ясо поступає в міжлопатево-простір і відсікається ножами, що рухаються, тобто відбувається попереднє подрібнення. Далі сторона завантаження сировини перекривається і, зі зменшенням об'єму міжлопатевого простору, вона витісняється у зону нагнітання. На стороні всмоктування передбачений канал, що сполучає її з вакуумною лінією і забезпечує краще заповнення міжлопатевого простору. У цих машинах прийнятий той же принцип різання, що і у вовчках і подрібнювачах, забезпечених різальною парою (в даному випадку лопать є ножем, а корпус - циліндричною ґраткою) [8].

Кавітаційний подрібнювач, що має також дві різальні деталі циліндричної форми, запропонований Скрипником (авт. свід. № 128319). Він складається з швидкообертового ротора, що має виточку з наскрізними отворами в торцевій стороні і зубці на зовнішній поверхні. Ротор установлений всередині нерухомого порожнистого циліндра з поздовжніми канавками і відвідним рукавом. Продукція подається в приймальний бункер, звідки спрямовується у виточку ротора. Для видачі подрібненої маси передбачені лопатки, що обертаються разом з ротором, і розвантажувальний шнек [8].

#### **И.4. Конструкції формуютьовальних різальних машин**

Процес приготування шпику для ковбасного виробництва складається з таких операцій: зняття шкурки, пластування і подрібнення шпику. Зняття шкурки зі шпику й обрізків свинини, отриманих при розбиранні свинячих туш, оброблених методом обшпарювання — обпалювання, є однією з найбільш

трудомістких і мало механізованих операцій. При використанні спеціальних шкуркознімальних машин значно підвищується продуктивність праці, зменшується кількість прорізів на знятій шкурці, зростає вихід шпику і поліпшується зовнішній вигляд його поверхні. Нині для знімання шкурки зі шпику застосовують машини продуктивністю від 300 до 960 кг/год (залежить від складності конфігурації відрубу).

При виготовленні фаршированих ковбас із складним малюнком часто використовують шпик у вигляді пластини або шнура (прямокутного або квадратного перерізу). Щоб їх отримати шматки шпику (як правило, хребтового) розрізають вручну або на машині на пластини (шари) необхідної товщини. Цю операцію називають пластуванням. За потреби шари розділяють на окремі шнури. Шпик, грудинку, яловичий і баранячий жири, які вводять до ковбасного фаршу шматочками певної форми і розмірів, подрібнюють на шпигорізці. У деяких випадках (наприклад, при виробництві сирокочених ковбас із підмороженого м'яса) шпик подрібнюють на кутері на заключній стадії кутерування фаршу.

Схема облаштування робочої частини шпигорізки, які використовують в промисловості для нарізування шпику або вареного м'яса на кубики, локшину та ін., приведена на рис. И.10 [8].

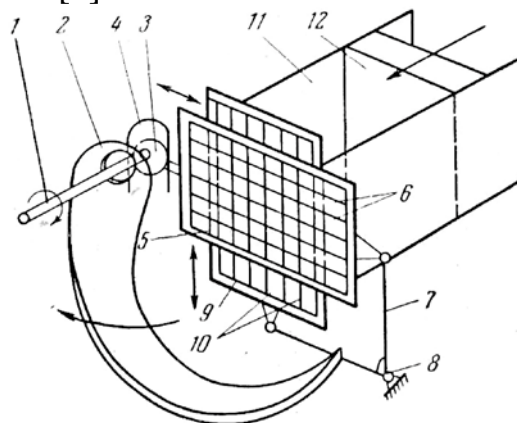


Рис. И.10 – Схема робочого механізму шпигорізки

Залежно від розташування живильника шпигорізки бувають горизонтальними і вертикальними; ножі в перших двох площинах розділення можуть бути дискові або пластинчасті. На виході шпику встановлюють серповидні ножі з внутрішньою різальною крайкою. Пластинчасті ножі потребують установки живильного механізму, а дискові забезпечують самовтягування шпику.

Робоча частина шпигорізки включає приводний вал 1 з серповидним ножом 2 і ексцентриковим кулачком 3, розташованим в захваті вилки 4. Остання з'єднана з рамкою 5, несучою плоскі ножі 6, а через кутовий важіль 7, що коливається навколо осі 8, пов'язана з іншою рамкою 9, забезпеченою ножами 10. Різальний механізм встановлений у коробі 11, в якому переміщується штовхач 12, який отримує безперервний або пульсуючий рух від механізму подачі. Два розміри нарізаних шматочків визначаються відстанню

між плоскими ножами, встановленими у рамках; третій - величиною подачі на один оберт серповидного ножа. Найменша товщина шматочка 4 мм [8].

У вертикальній шпикорізці з гідравлічним живильником (рис. И.11) гідроциліндр і шток штовхача пов'язані з пластиною 1, а для виключення перекосу штока 2 штовхача до пластини прикріплений стрижень 3, який ковзає у напрямних. У силовому циліндрі 4 розміщені поршень і шток 5. Штовхач входить в робочу секцію поворотного короба 6, коли друга його секція знаходиться під завантаженням; короб обертається вручну навколо вісі 7.

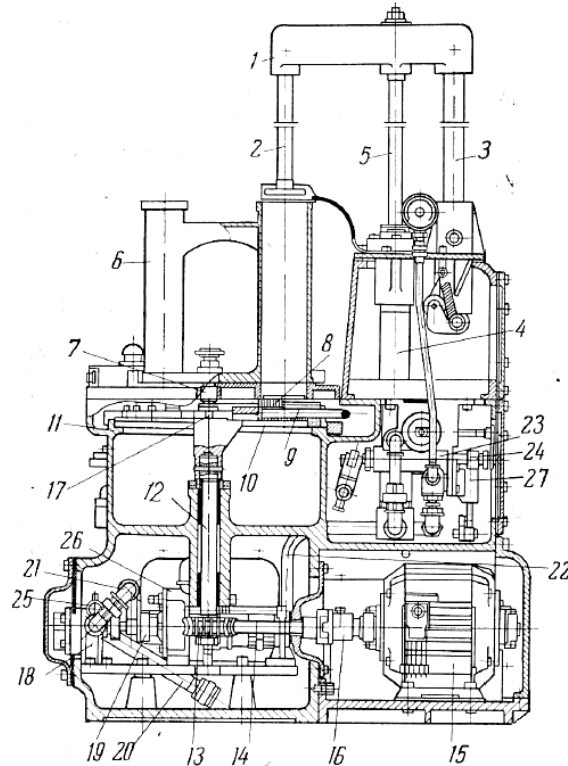


Рис. И.11 – Вертикальна шпикорізка марки ФШГ

Різальний механізм складається з верхньої 8 і нижньої 9 рамок з плоскими ножами і серповидного ножа 10, вільний кінець якого забезпечений сухарем, що ковзає по напрямних 11. Серповидний ніж встановлений на валу 12 черв'ячного колеса 13, зв'язаного з черв'яком, змонтованим на валу 14, що обертається від електродвигуна 15 через муфту 16.

Рамки приводяться в дію ексцентрично встановленим на валу 12 пальцем 17. Олива в систему нагнітається насосом 18, який отримує обертання від вала 14 через муфту 19. До насоса підключені всмоктуюча 20 і нагнітаюча 21 і 22 труби, на яких передбачені золотник 23, регулюючий корковий кран 24, і два запобіжні клапани 25 і 26. Крім того, машина забезпечена рукояткою для включення системи і перемикачем 27.

Горизонтальна шпикорізка марки ФШМ (рис. И.12,а) складається із станини 1, живильного короба 2, приводного вала 3 з серповидним ножем 4, рамок 5, електродвигуна 6 з передаточним механізмом, розташованим в кожусі 7. Машина забезпечена автоблокуванням автомата 8, що виключає пуск, при відкритому кожусі 9, що закриває робочі деталі. При роботі штовхач короба



подається вперед механічно; у початкове положення його повертають вручну за допомогою ручки. Подрібнена продукція приймається в таз 11 [8].

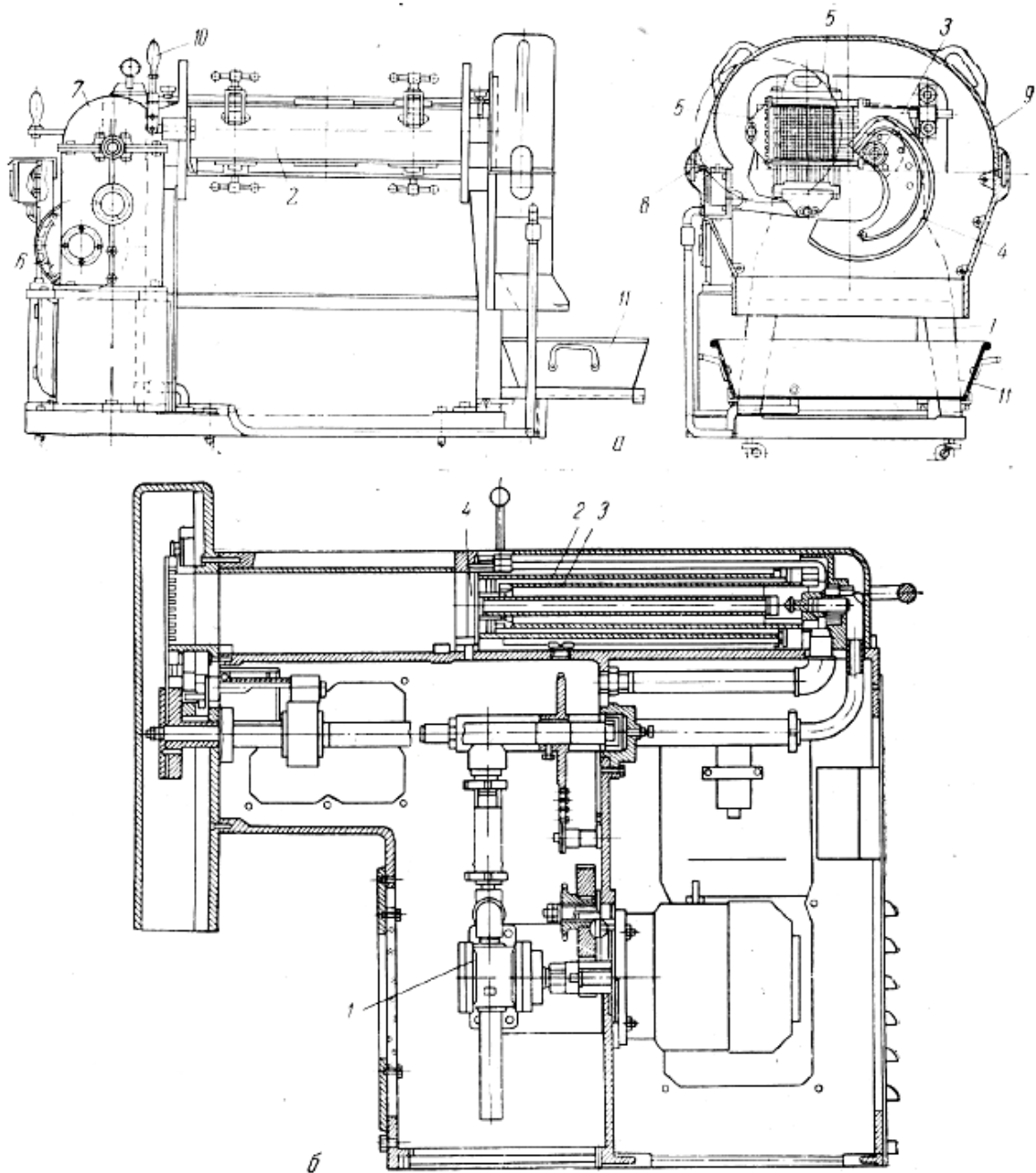


Рис. И.12 – Горизонтальні шпикорізки.

Також у вітчизняній промисловості випускаються горизонтальні шпикорізки марки ГШМ-2 з механічним приводом.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Cox R.H. Comparison of linearized wave propagation models for arterial blood flow analysis, Y. Biomach, 2, № 3, 1989 r.
2. Messen und Ausstellung (YFFA - Forum - 86) || Die Fleischerei, 1996. BD 37 № 5.



3. Tander K., Kulmbach. Tenderzen und Entwicklungen fur die Fleischwirtschaft || Die Fleischwirtschaft, 1991, Heft t.S.1085 - 1118.
4. ZM - 22A, ZM - 98/A, ZM - 130/A, ZM - 42/A. Проспект фирмы «Koneteollisuns» (Финляндия) 1992г. - 8 с.
5. А.Г. Бареян Особенности резания лезвием и анализ силового воздействия на контакте лезвий / Вестник серия «Естественнонаучная» № 1(16) с. 50-58
6. Машины и аппараты пищевых производств. В 2 кн. Кн. 1: Учеб. для вузов/ СТ. Антипов, И.Т. Кретов, А.Н. Остриков и др.; Под ред. акад. РАСХН В.А. Панфилова.—М.: Высш. шк., 2001.— 703 с: ил.
7. Новое мясное дело. Специализированное издание по вопросам производства, техники и менеджмента в мясной промышленности. Из-во Hans Holzmann. Германия, 2006, №1 – 6.
8. Пелеев А.И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности: Учебник / А.И. Пелеев. - Москва: Пищевая промышленность, 1991. - 519с.

## Методи і засоби оцінки фізико-хімічної механіки взаємодії деталей м'ясоподрібнювальних машин з технологічними середовищами

### К.1. Дослідження корозійно-механічного спрацювання робочих органів подрібнювачів м'яса потенціостатичним методом

Багато вузлів тертя обладнання м'ясопереробної промисловості, знаходяться у безпосередньому контакті з технологічними середовищами-електролітами, до яких відносяться різні кислоти і лужні середовища, сольові нейтральні розчини, вода з різним хімічним складом, харчові продукти і напівфабрикати [20, 21].

При терті металів в розчинах електролітів двофазна (метал-розчин) або трьохфазна (метал 1 - розчин - метал 2) системи повинні розглядатися як специфічні електрохімічні, до яких можна використати відповідні електрохімічні закони і методи дослідження. Тому методика дослідження корозійно-механічного зношування деталей м'ясоподрібнювального обладнання повинна враховувати електрохімічний механізм процесу, що може бути основою для розробки методів підвищення працездатності трибоспряжень обладнання галузі.

Особливість тертя металів в рідких електропровідних харчових середовищах полягає в тому, що цей процес залежить від електродних потенціалів  $\phi$  їх поверхонь, вимірених по відношенню до деякого електроду порівняння, - фундаментальної характеристики електрохімічних систем [7, 16]. Саме ця обставина (аналогічно тому, як це було зроблено при виділенні з хімії електрохімії) дозволяє об'єднати усі випадки тертя і корозійно-механічного зношування в технологічних рідких електропровідних харчових середовищах в самостійну область. Для вивчення таких процесів потрібно залучення з одного боку, сучасних знань, накопичених в трибології, а з іншої - понять і методів електрохімії. Такий підхід привів до виникнення нового напрямку, що народився на межі трибології і електрохімії і є розділом фізико-хімічної механіки матеріалів.

Взаємодія зовнішніх середовищ з поверхнею металу розглядається зазвичай з точки зору утворення граничних плівок, адсорбційного зниження міцності і пластифікування металу, який деформується, хімічного модифікування поверхневих шарів. Відомо, що хімічні властивості більшості кристалічних матеріалів визначаються поведінкою дислокацій. Отже, вплив середовища на механічні властивості твердих тіл може бути пов'язаний з його взаємодією з дислокаціями на поверхні [17, 23]. Особливості умов, що створюються на межі твердого тіла, визначаються наявністю вільної поверхневої енергії. Нині загальноприйняте уявлення про міцність твердих тіл як про величину, пропорційну їх поверхневій енергії. Саме пониження поверхневої енергії лежить в основі відомого ефекту Ребіндера. Вплив середовища на процес деформації металів зазвичай розпочинається зі зменшення поверхневої енергії при фізичній адсорбції, що є первинним актом

[4, 7, 17]. Надалі на цей процес накладаються вторинні явища - хімічні, електрохімічні, фізичні та ін. Для їх реалізації потрібна певна енергія активації, яка, в свою чергу, залежить від специфіки процесу. У разі деформації і руйнування металів в корозійно-активних середовищах (корозія під напруження, до якої відносять корозійне розтріскування, корозійна втома і корозійно-механічне зношування) особливу роль грає механічна і електрохімічна активація. Пластична деформація твердих тіл сприяє проявленню механохімічного ефекту [11, 13], що полягає в полегшенні хімічних реакцій між зовнішнім середовищем і металом. Коли ці процеси відбуваються в середовищах - електролітах, велику роль грають електрохімічні явища в системі метал-розчин електроліту. Металевий електрод, занурений в електроліт, електрично заряджається відносно розчину, що призводить до виникнення різниці потенціалів. Згідно з рівнянням Гіббса-Ліппмана,  $\sigma$  може бути визначена з виразу [1]:

$$d\sigma = -\varepsilon d\varphi - \sum \Gamma_i d\mu_i \quad (K.1)$$

де  $\sigma$  - вільна енергія поверхні електрода;

$\varepsilon$  - електричний заряд одиниці поверхні електрода;

$\Gamma_i$  - адсорбція  $i$ -го компонента розчину;

$\mu_i$  - хімічний потенціал розчину.

При  $\varphi = \text{const}$  приведені рівняння перетворюється в адсорбційну формулу Гіббса

$$\sigma = - \sum \Gamma_i d\mu_i, \quad (K.2)$$

на основі якої і пояснюється зниження вільної енергії поверхні, що призводить до проявлення ефекту Ребіндера. При постійному складі розчину отримуємо рівняння Ліппмана

$$d\sigma = - \varepsilon d\varphi, \quad (K.3)$$

яке описує форму електрокапілярних кривих і встановлює зв'язок між поверхневою енергією, потенціалом і зарядом. З рівняння (K.3) видно, що зміни  $\sigma$  можна добитися зміною  $\varphi$  незалежно від присутності поверхнево активних речовин (ПАР) в розчині. Відповідно до рівняння (K.3) в чистому розчині поверхнева енергія максимальна при нульовому заряді поверхні електрода ( $d\sigma/d\varphi = 0$ ).  $\varphi_0$  називається потенціалом нульового заряду і грає велику роль в процесах адсорбції. У роботах [1, 2] показано, що адсорбція органічних сполук на електроді може відбуватися тільки поблизу  $\varphi_0$ . При зміщенні потенціалу електрода від  $\varphi_0$  або при адсорбції ПАР твердість металу знижується.

Величини  $\varphi$  при терті можуть значно відрізнятись від  $\varphi$ , виміряних в статичних умовах. По-перше, це пов'язано з механічним видаленням поверхневих плівок (процес зачистки) [13, 19], по-друге, при терті утворюються вторинні структури, що також зміщують  $\varphi$  в позитивну або негативну область [8]. І, нарешті, великий вплив на зрушення  $\varphi$  може зробити пластична деформація. Різниця у величині  $\varphi$  на дислокованих атомах і атомах досконалої кристалічної ґратки склала 0,11-0,22В [3].

Вплив  $\varphi$  на тертя металів може успішно вивчатися за допомогою потенціостатів - приладів, що автоматично підтримують  $\varphi$  на заданому рівні

або змінюють його за певною програмою. Потенціостатичні дослідження тертя металів в середовищах електролітів дозволяють вивчати вплив  $\varphi$  на механічні характеристики тертя (знос, коефіцієнт тертя та ін.), знімати поляризаційні криві, що дозволяють отримувати істотну інформацію про кінетику електрохімічних процесів при терті. На рис. К.1 подані загальний вигляд і схема установки, яка нами використана для потенціостатичних досліджень. В даному випадку застосована схема торцевого тертя, коли зразок 1 обертається відносно притиснутого до нього з навантаженням  $P$  нерухомого циліндричного зразка 2.

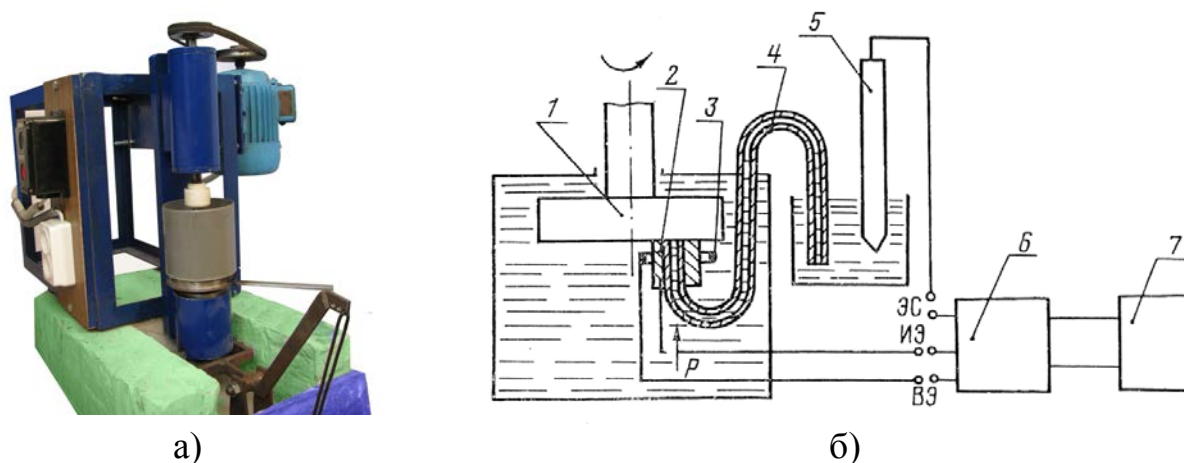


Рис. К.1 – Загальний вигляд (а) і схема (б) установки для дослідження процесу тертя металів в електропровідних харчових середовищах потенціостатичним методом

Поляризація системи і електрохімічні вимірювання виконувались за допомогою електрохімічної комірки, що є трьохелектродною системою. Вона складалася з досліджуваного (робочого) електрода (РЕ) - зразка 2 (чи 1), електрода порівняння (ЕП) (наприклад, хлорсрібного), по відношенню до якого вимірювався  $\varphi$ , і допоміжного платинового електрода 3 (ДЕ), що утворював з ДЕ ланцюг поляризації. Вимірювались  $\varphi$  і знімалися поляризаційні криві за допомогою потенціостата 6 (наприклад, марки П-5827М) і потенціометра 7 (КСП-4). Система забезпечена динамометром для вимірювання моменту тертя (на рисунку не показаний). З методичної точки зору в таких дослідженнях дуже важливе правильне підведення ЕП. Як показники проведені нами дослідження, найбільш достовірні результати можуть бути отримані при підведенні ЕП безпосередньо до поверхні тертя через наскрізний отвір в досліджуваному зразку, що і було зроблено за допомогою пластмасової трубки 4. Для отримання порівнянних результатів при використанні методу необхідно обов'язково підтримувати постійною величину розгортки потенціалу.

Якщо замість верхнього металевого зразка поставити шліфувальний круг або абразивну шкірку, то буде реалізований широко відомий метод зачистки поверхні металу під розчином [11, 13]. З його використанням вимірювався потенціал зачистки  $\varphi_z$ , тобто  $\varphi$  ювенільної поверхні металу, звільненого від плівок. Зіставлення  $\varphi_z$  і потенціалу тертя  $\varphi_{тр}$  характеризує поведінку плівок, що утворюються на поверхнях тертя. Якщо  $\varphi_{тр}$  наближається до  $\varphi_z$ , то це свідчить

про видалення плівок під впливом тертя, що може призвести до схоплювання поверхонь. Навпаки, збільшення різниці між  $\varphi_{тр}$  і  $\varphi_3$  вказує на наявність захисних плівок, що запобігають схоплюванню і спричиняють зниження інтенсивності зношування. На основі цього можна стверджувати, що при підборі пар тертя різниця ( $\varphi_3 - \varphi_{тр}$ ) має бути максимальною. Потенціали зачистки і тертя вивчалися в різних умовах [8] і було показано, що при терті металів в електролітах вони є такою ж важливою характеристикою, як твердість або межа міцності при оцінці механічних властивостей металів.

Істотну інформацію про кінетику електродних процесів при терті металів можна отримати за допомогою поляризаційних кривих. Такі криві при терті знімалися у ряді робіт [8, 13, 21]. Як відомо [2], будь-який електродний процес складається з ряду послідовних стадій, а його швидкість визначається швидкістю найбільш повільної з них, з якою і пов'язано виникнення електродної поляризації. Встановлення природи поляризаційних кривих уповільненої стадії (транспортування учасників реакції, їх розряд або ін.) є одним з головних завдань електрохімічної кінетики при терті металів. Для її вирішення з успіхом може бути використаний метод зіставлення поляризаційних кривих, знятих при зачистці і без зачистки поверхні, що дозволяє отримати корисну інформацію про її стан і про характер гальмівних стадій електродного процесу [14, 16]. Оновлення поверхні зазвичай усуває гальмування процесу, яке викликане утворенням адсорбційних і фазових плівок, і значно впливає на електродну стадію передачі заряду. Стосовно проблем зношування цей метод має бути доповнений вивченням механічних характеристик металів поверхонь тертя, що дозволить встановити зв'язок між електрохімічними і механічними параметрами тертя.

На рис. К.2 приведені анодні поляризаційні криві, зняті для відпрацювання методики досліджень при шліфуванні з різною швидкістю сталі 45 в середовищі 1 н.  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (харчова добавка Е 514 і мийний засіб) з мікроподачею шліфувального круга  $s=5$  мкм/хв.

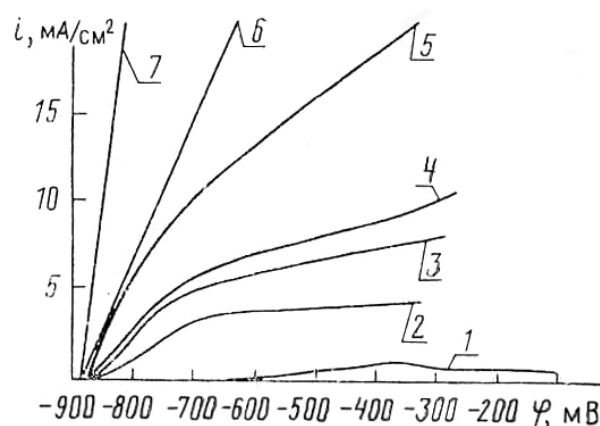


Рис. К.2 – Вплив швидкості зачистки поверхні на характер анодних поляризаційних кривих: 1 - без зачистки; 2 -  $v = 0,4$  м/с; 3 - 0,8; 4 - 3,2; 5 - 4,8; 6 - 6,4; 7 - 11 і 12

Ці досліді дозволили встановити критичну швидкість ( $v = 11$  м/с), перевищення якої вже не призводить до подальшого зміщення поляризаційних

кривих. При  $v < 11$  м/с кінетика електродних процесів багато в чому визначається швидкістю утворення плівок, що особливо помітно в зоні швидкостей 0,4-3 м/с. При збільшенні частоти обертання шліфувального круга швидкість оновлення поверхні поступово починає перевершувати швидкість утворення плівок і кінетика електродних процесів визначається стадією передачі заряду. Аналогічним шляхом можна визначити критичне навантаження при різних її поєднаннях із швидкістю процесу.

Оскільки тертя завжди супроводжується перемішуванням рідини, необхідно знімати поляризаційні криві і при перемішуванні, що дозволить виявити його вклад в характер електродних процесів на фрикційному контакті. Для правильного вибору зносостійких матеріалів, працюючих в умовах корозійно-механічного зношування, а також для вивчення природи цього процесу велике значення має визначення дійсної швидкості корозії при терті. Перша спроба оцінити корозійні втрати при терті була зроблена в роботі [12] за допомогою поляризаційних кривих. Точнішим є метод лінійної екстраполяції реальних поляризаційних кривих [5, 6, 15], знятих при терті. Сутність методу зводиться до того, що катодні і анодні поляризаційні криві знімають безпосередньо на зразку, корозія якого вивчається. Потім їх будують в напівлогарифмічних координатах і екстраполюють лінійні (тафелевські) ділянки до точки перетину (точки А, В, С на рис. К.3), абсцисою якої буде стаціонарний потенціал, а ординатою - логарифм густини струму електрохімічного саморозчинення металів (струм корозії). Добрі результати отримані нами в умовах тертя (рис. К.3). Видно, що швидкість корозії, в порівнянні зі швидкістю корозії в статичних умовах, зросла при перемішуванні приблизно в 19, а при терті - в 30 разів. Недоліком методу є трудність знаходження лінійних ділянок, що визначає точність екстраполяції.

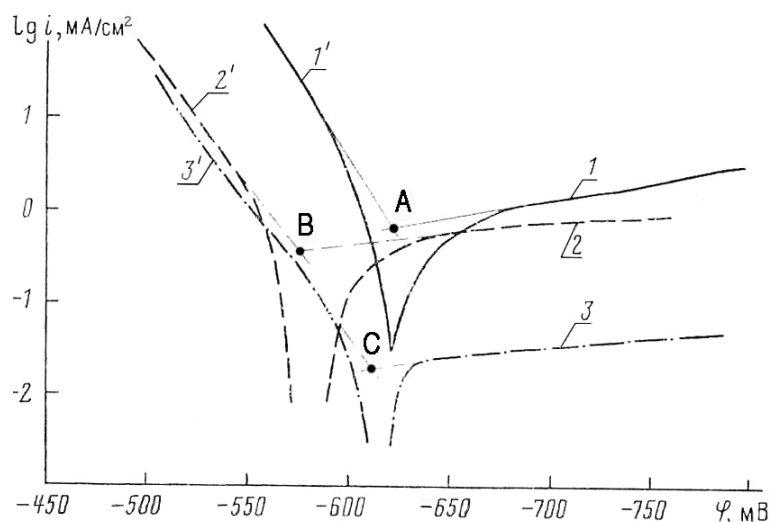


Рис. К.3 – Визначення швидкості корозії екстраполяцією лінійних ділянок анодних (1', 2', 3') і катодних (1, 2, 3) поляризаційних кривих для пари тертя сталь Р18 - сталь 45 в 0,5 н.  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ :1, 1' - тертя ( $p=0,2$  МПа,  $v=0,8$  м/с); 2,2' - перемішування ( $v=0,8$  м/с); 3,3' - статика (зразки в контактi під тиском  $p=0,2$  МПа)

У роботі [18] вивчався вплив  $\phi$  на дислокаційну структуру поверхні тертя в слабокислому середовищі. Катодна поляризація сприяла зменшенню сили тертя і збільшенню ширини деформованої зони. Хоча середня щільність дислокацій при цьому дещо зменшилася, розміри дислокаційних колоній і щільність дислокацій в них збільшилися, що свідчить про неоднорідність деформації. У лужному середовищі також було встановлено вплив поляризації на пластичну деформацію. Поляризація, впливаючи на процеси еволюції дислокаційної структури, викликає зміну опору реології фрикційного контакту і його жорсткості, що є причиною зміни співвідношення між пружною і пластичною складовими, що викликають деформації, а також амплітудночастотного спектру автоколивань і енергосилових характеристик процесів зношування. Хоча приведені пояснення поляризаційних ефектів вимагають перевірки, не викликає сумніву, що ми маємо прямий доказ впливу  $\phi$  на процеси пластичної деформації при терті ковзання в електролітах, якими є багато середовищ м'ясопереробних виробництв. З врахуванням виконаного аналізу можна константувати наступне:

- Корозійно-механічне зношування металевих матеріалів в технологічних середовищах-електролітах м'ясопереробних виробництв має електрохімічну природу і повинне вивчатися з використанням потенціостатичного методу і методу поляризаційного опору.

- При підборі пар тертя для роботи в технологічних середовищах-електролітах м'ясопереробних виробництв необхідно щоб різниця потенціалів зачистки і тертя була максимальною.

- Для правильного вибору зносостійких матеріалів для устаткування м'ясопереробної промисловості, працюючих в умовах корозійно-механічного зношування, визначати швидкість корозії при терті треба з використанням методу екстраполяції реальних поляризаційних кривих, знятих безпосередньо на зразках, поміщених в реальні або модельні технологічні м'ясопереробні середовища.

- Електродні потенціали поверхонь тертя - фундаментальні характеристики електрохімічних систем, які визначають інтенсивність корозійно-механічного зношування харчового і переробного устаткування.

- Поляризація фрикційного контакту впливає на процеси еволюції дислокаційної структури поверхонь тертя матеріалів в м'ясних середовищах і може використовуватися для управління енергосиловими характеристиками процесів зношування.

Проаналізуємо можливі випадки контактної корозії при терті за допомогою схематичної корозійної поляризаційної діаграми рис. К.4. Точка 1 перетину кривих  $K_1$  і  $A_1$  відповідає струму саморозчинення в контактній корозії [6]. При терті відбувається зміщення потенціалу анода в точку  $\phi_{\text{Атр}}$  і зміна характеру поляризаційної кривої. Якщо анод зберігає схильність до пасивації, то анодна крива має вигляд, подібний до кривої  $A_2$ . Проте частіше анод при терті знаходиться в активному стані і поляризаційна крива має вигляд, подібний до кривої  $A_3$ . При незмінному катодному процесі струм саморозчинення при терті

зростає (перехід від точки 1 до точки 4). Якщо ж тертя підвищує ефективність катода (криві  $K_2$  і  $K_3$ ), то корозійний струм пари сильно росте (точки 5 і 6). У разі, коли пасивність при терті зберігається, корозія збільшується не суттєво (точки 3 і 7) і практично не залежить від катодного процесу (точки 7, 8). Якщо ж пасивність при терті порушується, то відбувається максимальний ріст струму саморозчинення (точки 3 і 6).

Корозійний струм буде тим більшим, чим вища початкова різниця потенціалів  $\varphi$ , чим менше поляризуємість електродів і омичний опір і чим більша площа катода. При корозійно-механічному зношуванні велику роль грає вільна поверхня, яка найчастіше і є катодом. Дуже добре вплив вільної поверхні на інтенсивність зношування повзуна  $U_2$  і напрямної  $U_1$  при терті у морській воді представлений в роботі [14]. Показано, що збільшення відношення їх площ  $F_2 / F_1$  від 0 до 8 сприяло приблизно трьохразовому росту  $U_1$ , в той же час інтенсивність  $U_2$  підвищилася лише на 18%. Збільшення вільної поверхні  $F_2$ , тобто макрокатода, підвищує швидкість корозії напрямної, що протікала дуже інтенсивно, оскільки продукти корозії безперервно руйнувалися і відділялися рухомим повзуном. В той же час повзун кородував у меншій мірі через малий доступ середовища в проміжок між елементами пари тертя. Автори роботи [10] встановили, що корозійний чинник визначає інтенсивність зношування тільки при малих тисках.

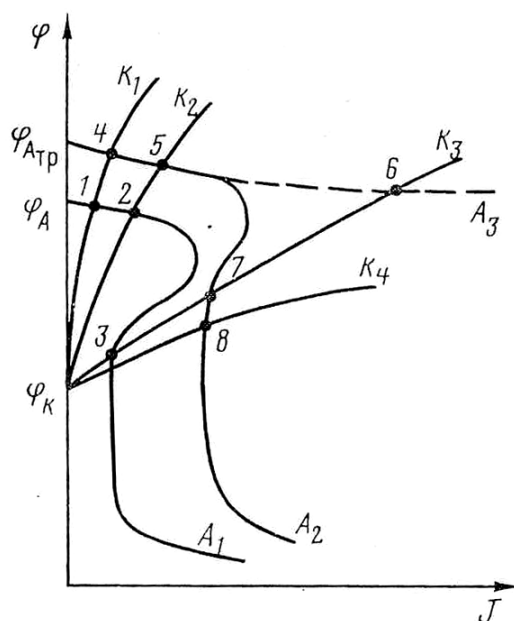


Рис. К.4 – Корозійна діаграма при терті металів :  $K_2, K_3, K_4, A_2, A_3$  - катодні і анодні поляризаційні криві при терті; 1 - 8 - точки перетину відповідних катодних і анодних кривих

Для вивчення електродних процесів нами застосована комірка (рис. К.5), яка вигідно відрізняється від комірки, що випускається промисловістю, типу ЯСЕ-2 [20, 22]. В ній запресований у фторопластову оправку знімний зразок досліджуваного електрода, що дає можливість підготувати його поверхню і досліджувати її властивості до і після випробувань поза коміркою.



Конструкція комірки розбірна і дозволяє використання стандартних електродів, що спрощує проведення вимірювань. Габарити комірки  $\sim 100 \times 100 \times 100$  м, маса  $\sim 0,8$  кг.

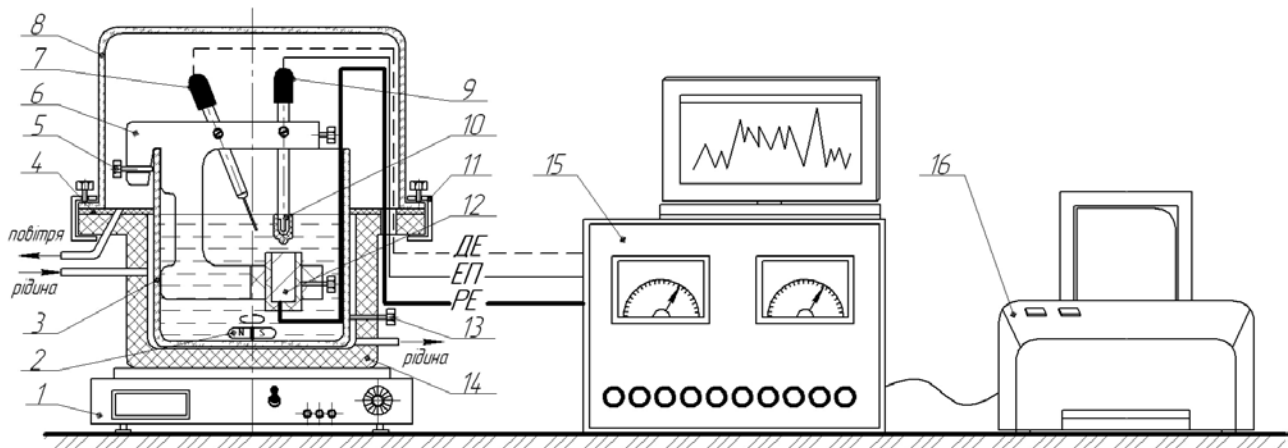


Рис. К.5 – Схема комірки для дослідження електрохімічної корозії металів.

Вона складається з досліджуваного (робочого) електрода (РЕ), електрода порівняння (ЕП), по відношенню до якого вимірюється електродний потенціал  $\phi$ , і допоміжного платиного електрода (ДЕ), що створює з ДЕ ланцюг поляризації.

В скобі 6 з чотирма гвинтами, виконаними з фторопласту, закріплюються ДЕ – 7, ЕП – 9 і РЕ – 12. Скобу розташовують у склянці 3 і закріплюють гвинтом 5. На ЕП встановлюють наконечник 10, наповнений агар-агаром, щоб уникнути потрапляння іонів  $KSCN$  в досліджуване середовище. Накривається комірка скляною кришкою 8, яка встановлюється на прокладку 4 з наповненої фторопластом гуми. Склянка-кожух 14 забезпечує термостатування комірки. Склянка 3 фіксується у просторі трьома підпружиненими гвинтами 13. Кришка і стакан-кожух з'єднуються скобами 11. Комірка може встановлюватися на магнітній мішалці 1, що дозволяє за допомогою вертушки 2 перемішувати середовище. Виводи електродів 7, 9, 12 під'єднуються до потенціостата 15, та в подальшому здійснюється друк даних на принтері 16. Через трубки виходу повітря (В) комірка вакуумується. Конструкція розбірна і передбачає використання стандартних електродів, що спрощує проведення вимірювань. Зразок (РЕ) знімний, що дає можливість підготовлювати поверхню ( $\sim 1$  см<sup>2</sup>) і досліджувати її властивості до і після випробувань поза коміркою.

Перед кожним дослідом досліджувана поверхня зразка ретельно зачищалася на абразивній шкурці і промивалася у спирті, а потім у дистильованій воді. Шорсткість її у всіх дослідах була  $Ra \cong 0,32$  мкм.

Досліджувались: 1 – залежність струм – потенціал в умовах спокою (статичі) при 20 °С, при перемішуванні робочої рідини при 20 °С і при перемішуванні робочої рідини, нагрітої до 80 °С; 2 – вплив технологічного середовища на швидкість електрохімічної корозії металів за температури 20-80 °С. Поляризаційні криві знімалися зі швидкістю розгортки потенціалу 10 мВ/хв.

Дослідним шляхом знаходилась оптимальна відстань між РЕ і ЕП. Стабільні результати, з похибкою вимірювання  $\sim 5\%$  були отримані при відстані 4-6 мм. Криві будувалися за результатами 3-5 дослідів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Антропов Л.И. Ингибиторы коррозии металлов: Монография [Текст] / Л.И. Антропов, Е.М. Макушин, В.Ф. Панасенко. – К.: Техніка, 1981. – 183 с.
2. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. - М.: - Высшая школа, 1989. – 509 с.
3. Герасимов В.В., Герасимова В.В. Коррозионное растрескивание аустенитных нержавеющей сталей. – М.: Металлургия, 1986. – 176 с.
4. Голубець В. Захисні властивості і зносостійкість вакуумних йонно-плазмових покриттів [Текст] / В. Голубець, О. Гасій, Я Щуйко. – Львів: Логос, 2008. – 104 с.
5. Дзюб А.Г., Кузнецов В.А., Прейс Г.А. Исследование скорости коррозии при трении. - В сб.: Проблемы трения и изнашивания, 1980. вып.17. – С. 20-23.
6. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 472 с.
7. Карпенко Г.В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов: Монография. – К.: Наукова думка, 1986. – 126 с.
8. Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И. Механохимические процессы при граничном трении. – М.: Наука, 1982. – 170 с.
9. Крагельский И.В. Основы расчета на трение и износ: Монография: [Текст] И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
10. Круман Б.Б. Коррозионно-механический износ: Монография: [Текст] / Б.Б. Круман, В.А. Крупицина. – М.: Машиностроение. 1978. – 104 с.
11. Лазарев Г.Е. Исследование процесса коррозионно-механического изнашивания [Текст] / Г.Е. Лазарев, Н.Н. Афанасьев, Н.И. Гамазов // Трение и износ. – Минск: Наука и техника, 1984 – Том V. - № 5 – С. 889-895.
12. Мачевская Р.А., Турковская А.В. Трение и износ сталей в агрессивных средах. – Химическое и нефтяное машиностроение, 1985, №4. - С.32-35.
13. Прейс Г.А., Дзюб А.Г. Электрохимические явления при трении металлов. Трение и износ, Т.1, №2, 1980.-С.217-235.
14. Ромашов Н.Д., Вершинина Л.П. Исследование кинетики и механизма электродных процессов методом непрерывного обновления поверхности металла под раствором. - В кн.: Новые методы исследования коррозии металлов. – М.: - Наука, 1983. – 300 с.
15. Стечишин М.С. Кінетика змін потенціалу композиційних електролітичних покриттів трибо технічного призначення [Текст] / М.С. Стечишин, Ю.М. Білик, Ю.І. Парайко, Н.М. Стебелецька // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2009. – Вип. 51. С. 63-71.

16. Сухенко В.Ю. Зносостійкість евтектичних покриттів під впливом соляного розчину [Текст] / В.Ю. Сухенко, Ю.Г. Сухенко, Ю.І. Бойков, В.В. Мануїлов // Продовольча індустрія АПК: наук.-практ. Журнал. – К.: 2013 - № 1 – С.6-9.
17. Сухенко В.Ю. Обґрунтування основ забезпечення зносостійкості м'ясорізальних інструментів. Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб.- К.: НАУ, 2012. - Вип. 57. - С.76-92.
18. Сухенко В.Ю. Прогнозування впливу терміну автолізу м'яса на зносостійкість деталей подрібнювальних машин / Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2013.- Вип. 59 – С.70-85.
19. Сухенко Ю.Г. Дослідження електрохімічних процесів під час корозійно-механічного зношення іонно-плазмових покриттів [Текст] / Ю.Г. Сухенко, О.Г. Дзюб, В.М. Голубець, О.Б. Гасій // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2007. – Вип. 47. – С. 67-74.
20. Сухенко Ю.Г. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв: Підручник. / Ю.Г. Сухенко, О.А. Литвиненко, В.Ю. Сухенко; під ред. професора Ю.Г. Сухенка.- К: НУХТ, 2010. - 547с.
21. Сухенко Ю.Г. Технологічні методи забезпечення довговічності обладнання харчової промисловості: Монографія. /Ю.Г. Сухенко, О.І. Некоз, М.С. Стечишин. - К.: Елерон, 1993. – 108 с.
22. Тищенко Г.П. Интенсификация процессов и защита оборудования пищевых производств: Монография [Текст] / Г.П. Тищенко, Н.Д. Хоменко, В.Ю. Сухенко, П.П. Ермаков, Ю.Г. Сухенко; под ред. профессора Ю.Г. Сухенко. – К.: ДІА, 2006. – 224 с.
23. Хирт Дж. Theory of dislocations [Текст] / Дж. Хирт, И. Лоте – перевод с англ.. под. ред.. Э.М. Надгорного и Ю.А. Осипьяна. – М.: Атомиздат, 1982. – 600 с.
24. Сухенко В.Ю. Структурно-механічне моделювання м'яса: [Текст] / В.Ю. Сухенко // Продовольча індустрія АПК. - К.: ВП "Паралель", Вип. 1. 2012. - С.30-32.
25. Сухенко В.Ю. Защитные эвтектические покрытия пищевого оборудования и влияние солей на их износостойкость [Текст] /В.Ю. Сухенко, Вестник молодежной науки – 2013: сборник научных статей студентов, аспирантов и молодых ученых. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2013. – С. 335-340.

## **К.2. Засоби дослідження впливу м'ясних середовищ на субмікроструктуру і зносостійкість деталей подрібнювальних машин**

Плівки вторинних структур, бар'єрні і сорбовані шари на металах, що у подавляючій більшості випадків вирішально впливають на характер деформування і руйнування поверхонь тертя різальних інструментів, мають напівпровідникові властивості [1, 2, 3], причому багато оксидів мають ГЦК структуру, як і монокристали кремнію та фториду літію [3], які були використані в дослідженнях.

Для цих матеріалів, як і для інших твердих тіл подібної кристалічної структури, характерні найбільші значення напружень Пайєрлса-Набарро та енергії дефектів упаковки [4]. Таким чином, за їх використання практично виключається вплив границь зерен, випадкових деформацій і релаксації дислокаційної структури після розвантаження зразків.

Перед випробуванням зразки монокристалів кремнію і фториду літію полірували алмазними пастами і оксидами хрому до  $Ra=0,08...0,16$  мкм, відпалювали, відповідно, при  $1100^{\circ}\text{C}$  протягом 10-ти год. і при  $600^{\circ}\text{C}$  протягом 6-ти год., а потім піддавали хімічному поліруванню для повного зняття наклепаного шару. Вихідна щільність дислокацій в монокристалах не перевищувала  $10^3$  см<sup>-2</sup>. У всіх описаних випадках субмікроструктуру деформованої зони виявляли селективним травленням на дислокації [5]. Монокристали фториду літію були вибрані для досліджень завдяки простоті їх обробки і доброму виявленню дислокацій методом хімічного травлення.

Для створення напруженого стану зразки монокристалів перед дослідом стискали в струбчині у напрямках  $\{100\}$  і  $\{010\}$ . Зусилля стискання контролювали тензOMETричним методом. У такому стані монокристали деформували в мікротрибометрі, описаному нижче, по свіжосколотих площинах  $\{001\}$ , паралельно і перпендикулярно до стискаючих напружень. У першому випадку дотичні (стискаючі, розтягуючі) і нормальні напруження, у напрямку прикладення попередніх стискаючих напружень, обумовлюють плоско-напружений стан деформованої зони. У другому випадку ці зусилля діють у трьох взаємно перпендикулярних напрямках, створюючи нерівномірний об'ємно-напружений стан поверхневого шару зразків. Експерименти проводили при стискаючих напруженнях, відповідаючих середині першої ділянки залежності «напруження-деформація» монокристалів фториду літію (1,92 МПа) поблизу критичного зсувного напруження (4,1 МПа) [6]. Вибір цих значень пояснюється тим, що деформація в межах першої ділянки деформаційної кривої мало залежить від стану поверхні монокристала. У цьому випадку щільність дислокацій пропорційна прикладеному напруженню. Деформація при напруженнях, відповідаючих другій ділянці кривої, залежить від умов на поверхні, а дислокації вихідної структури майже не впливають на її характер [6].

Досліди проводили при терті індентора по зразку без змащування, у дистильованій воді (рН 7,0), яка є основою у хімічному складі м'яса, а також у

м'ясному соку, відпресованому з одного зразка мускульної тканини парної телятини 2-ї категорії через 2 години після забою (рН 7,4) і через 240 годин (після повного завершення автолізу при температурі 0°C (рН 5,5) [7]. Перед використанням у дослідах м'ясний сік піддавали трьохразовому фільтруванню через бельтингову тканину і попередньо промитий та калібрований на ситах річний пісок.

Хімічний склад м'яса (табл. К.1) і кислотнo-лужний баланс (рН) м'ясного соку був визначений в Українській лабораторії якості і безпеки продукції АПК НУБіП України.

Робочі рідини заливались в електрохімічну комірку дослідної установки (мікротрибомера) відразу після приготування і набрання ними температури 18-20°C (кімнатної, яка регулювалась кондиціонером).

На мікротрибометрі [8], запропонованому О.Є. Новицьким і М.А. Сологубом (НУХТ), було проведено вивчення впливу властивостей м'ясного соку, природи і структури монокристалічних і полікристалічних матеріалів, їх плоско- та об'ємно-напруженого стану на механо-фізичні та електрохімічні процеси при терті ковзання, а також на дислокаційну структуру деформованої зони (рис. К.7). В конструкції приладу передбачене мінімальне тепловиділення на ковзаючому контактi та виключення впливу реологічних властивостей робочих середовищ за рахунок дуже малої швидкості відносного переміщення поверхонь, які труться, і точкової схеми фрикційного контакту.

Таблиця К.1 – Хімічний і вітамінний склад телятини 2-ї категорії на 100 г продукту

Вода, г	Білки,	Жири,	Зола, г	Na,мг	K,мг	Ca,мг	Mg,мг	P,мг	Fe,мг	B1,мг	B2,мг	PP,мг	A	C
78,0	20,4	0,9	1,1	112	357	13	25	213	3	0,15	0,24	6,0	Сл.	Сл.

Мікротрибометр (рис. К.7,а) включає електрохімічну комірку, змонтовану на предметному столику 1, навантажувальні вузли, системи вимірювання сили тертя та електродних потенціалів зразків і привід, які об'єднані на загальній основі 4 [8].

У наскрізьному отворі столика, встановленого на трьох опорах закріплена електрохімічна комірка 2 з діелектричного матеріалу (органічного скла). Переміщення столика разом з коміркою здійснюється за допомогою електродвигуна РД-09 та пасової передачі. Навантажувальні вузли розташовані на важелі 8, зв'язаному шарніром зі стійкою 9. На важелі 8 закріплені плоско-паралельні пружні пластини 7 і стандартний мікрометричний гвинт 5, який упирається вимірювальною площиною на кульку, розміщену в корпусі 3. На кінцях пружин 7 закріплена траверса з навантажувальним вузлом 13, за конструкцією аналогічним навантажувальним вузлом серійного мікротвердоміра ПМТ-3. Закріплений на важелі 8 індуктивний датчик 10 слугує

вимірювачем тангенційного зусилля. На навантажувальному вузлі 13 встановлені дві пластини 12, які забезпечують вимірювання глибини впровадження індентора емнісним способом за допомогою моста типу Р5010. Конструкцією приладу передбачене використання конічних, кулькових і пірамідальних інденторів. Величина тангенційного зусилля фіксується з використанням індуктивного датчика і самозаписуючої системи 212 заводу «Калібр» (Росія).

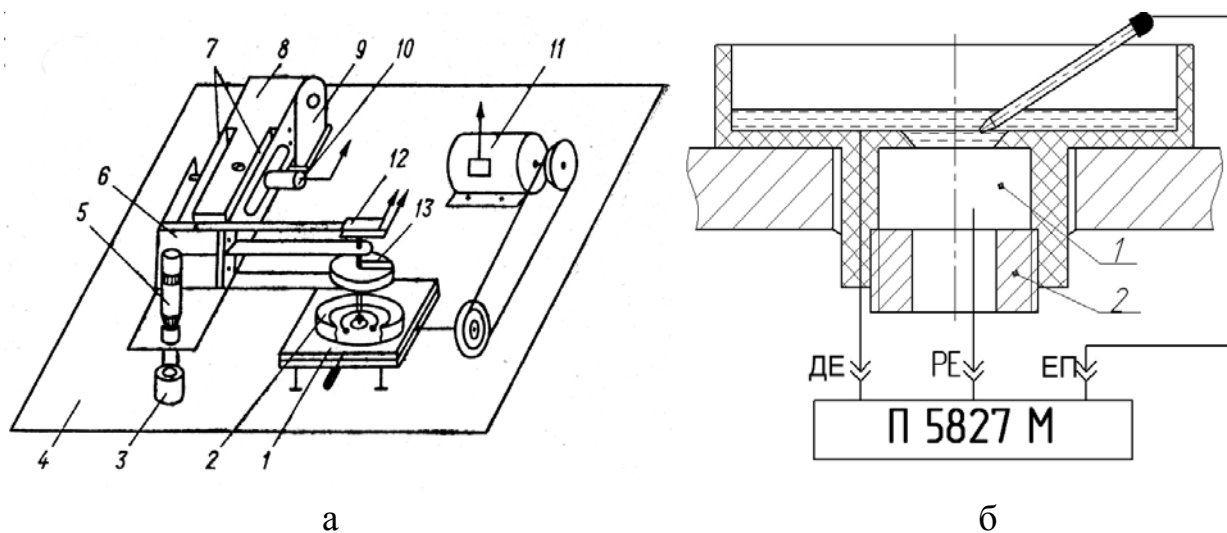


Рис. К.7 – Мікротрибометр: а – принципова схема, б – електрохімічна комірка.

Випробовуваний циліндричний зразок 1 (рис. К.7,б) фіксується гвинтом 2 у електрохімічній комірці зі збереженням горизонтального розташування досліджуваної поверхні, а отвір у дні комірки забезпечує постійний його контакт з робочою рідиною.

Електрохімічні процеси при терті і деформуванні індентором зразка досліджувались за допомогою електрода порівняння ЕП, допоміжного платиного електрода ДЕ і робочого електрода РЕ (досліджуваний зразок 1), які були підключені до потенціостата П5827М [3, 9].

В якості контртіла (Т) був використаний сферичний індентор із сталі ШХ15 СГ (HRC<sub>c</sub> 65) Т-1,5 з радіусом при вершині 1,5 мм і алмазний конічний індентор КТ-0,15 з радіусом при вершині 0,15 мм. При терті індентор притискався до зразка з зусиллям, пропорційним установленому на ньому вантажу. Максимальна чутливість схем з тензопідсилювачем 8АНЧ-4м та осцилографом Н-700 складала 1,2 сН/мм, а з мілівольтметром Р39-4 мН/мм при відносній похибці вимірювання, відповідно, 8 і 6%. Швидкість відносного переміщення контактуючих поверхонь складала  $5 \times 10^{-4}$  м/с. Для створення відповідного напруженого стану зразки перед дослідом стискали в струбціні.

Відомо чимало методів виявлення тонкої структури кристалів [9]. При їх порівнянні стає зрозумілим, що дозволяюча здатність фігур травлення у 3-8 разів вища, ніж при застосуванні інфрачервоної мікроскопії, рентгенографії, авторадіографії. В результаті визначення максимально можливої щільності дислокацій виявилось, що найбільш досконалими є метод фігур травлення і просвічувальна електронна мікроскопія, але остання має ряд недоліків, які

знижують її можливості та цінність. До цих недоліків відноситься релаксація напружень, перерозподіл і анігіляція дислокацій в процесі виготовлення тонких фольг, складність проведення досліджень. Виявлення дислокацій селективним травленням не має цих недоліків. Простота і доступність, висока дозволяюча здатність і точність, можливість проводити спостереження безпосередньо на масивних зразках була беззаперечним аргументом на користь вибору цього метода досліджень.

Для вивчення дислокаційної структури в монокристалах кремнію були застосовані реактиви СР-4А і Деша, а для хімічного полірування зразків – реактив Сіртла [9]. Монокристали фториду літію хімічно травили в 10%-ному розчині хлорного заліза. Для отримання недеформованих поверхонь їх розколнували при температурі рідкого азоту.

Щільність дислокацій на досліджуваних поверхнях монокристалів розраховували за співвідношенням:

$$N_d = \frac{n_{cp} \cdot M^2}{S_M}, \quad (K.1)$$

де  $N_d$  - щільність дислокацій, см<sup>-2</sup>;

$n_{cp}$  - середня кількість ямок травлення на матовому склі приладу (фотографії);

$M$  - збільшення приладу;

$S_M$  - площа матового скла приладу (фотографії), см<sup>2</sup>

Вимірювання шорсткості зразків виконували на подвійному мікроскопі МИС-11 і профілографі-профімометрі мод.201 заводу «Калібр» (Росія). Їх твердість визначали на твердомірах ТШ-2 і ТК.

Інтенсивність процесів зміцнення деталей вузлів тертя і механічні властивості оксидів оцінювали за величиною мікротвердості, яку вимірювали на мікротвердомірі ПМТ-3 на поверхні зразків, скошених шліфах і темплетях. Перед кожного серією дослідів мікротвердомір юстували на монокристалах хлористого натрію. Мікротвердість конструкційних та інструментальних сталей визначали на структурних складових.

Глибину зміцненого шару визначали за методом П.Є. Дяченка [10]:

$$h = k \cdot P,^{**} \quad (K.2)$$

де  $h$  - глибина зміцненого шару, мкм;

$k$  - емпіричний коефіцієнт;

$P$  - навантаження, відповідаюче точці перегину кривої «навантаження-мікротвердість», сН.

$$k = 0,17 \cdot \operatorname{tg} \alpha H_{СК}, \quad (K.3)$$

де  $\alpha$  - кут при вершині алмазної піраміди (136°);

$H_{СК}$  – середньоквадратична шорсткість поверхні, мкм.

\*\* Формулу можна застосовувати при шорсткості поверхні від  $R_a=0,016$  мкм до  $R_a=10$  мкм.

Вплив КАС на розвиток пружньо-пластичних деформацій у сталях при терті ковзання визначали методом фотопружності на зразках із відпаленої сталі 65Г, яка є перспективною для виготовлення м'ясорізальних інструментів, за методикою П.В. Назаренка [11]. Досліди проводили при терті без змащування, у дистильованій воді, а також у кислому рН 5,5 і лужному 7,4 середовищах м'ясного соку при відносній швидкості ковзання  $2 \times 10^{-3}$  м/с і нормальному навантаженні на зразки 60Н на лабораторній установці (рис. К.8), побудованій на базі металографічного мікроскопа МИМ-7, в якій передбачена можливість зміни у широких межах тиску на фрикційному контакті, а також реєстрації сили тертя тензометричним методом.

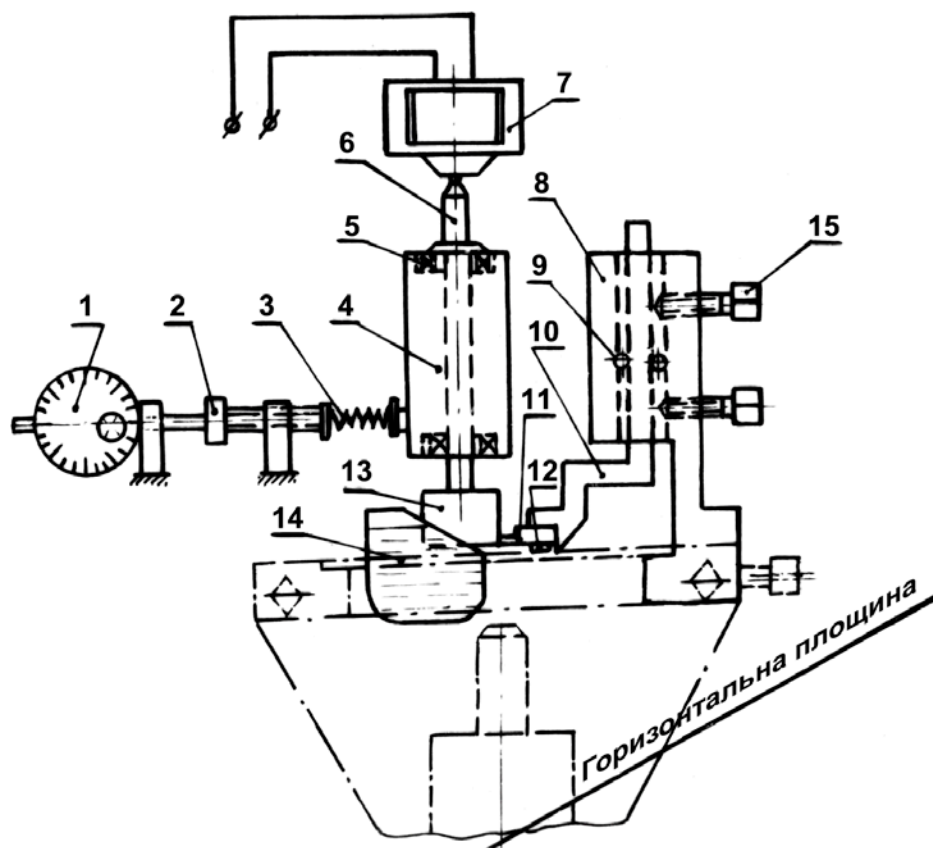


Рис. К.8 – Схема установки для визначення пружньо-пластичних деформацій в металах полярizaційно-оптичним методом в умовах тертя ковзання.

Циліндричне контртіло 13 діаметром 20 мм було виготовлене зі сталі ШХ15СГ (HRCe 63-65). Призматичні зразки зі сталі 65Г (5x10x20 мм) і товщиною в зоні тертя 0,5 мм, закріплювались 11 гвинтами 12 в утримувачі 10, який, разом зі стійкою 8, може здійснювати в профільній площині зворотно-коливальний рух навколо горизонтальної вісі. Обертання утримувача у напрямку обертання контртіла обмежує тензобалка, величина прогину якої пропорційна силі тертя.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Сухенко В.Ю. Обґрунтування основ забезпечення зносостійкості м'ясорізальних інструментів: [Текст] / В.Ю. Сухенко; НАУ // Проблеми тертя та зношування: наук. -техн. зб. - К.: НАУ, 2012. – Вип. 57 - С.76-92.



2. Боуден Ф. Влияние электрического потенциала по поверхности на трение [Текст] // Сборник "Трение и граничная смазка". - М.:, 1973. - С.67-73.: с ил.
3. Сухенко В.Ю. Моделювання процесів подрібнення м'яса і синтез технологічних машин: Монографія /В.Ю. Сухенко – К.: ЦП «Компринт», 2013. – 227 с.
4. Фридель Ж. Дислокации: [Монография] / Ж. Фридель; Перевод с английского под редакцией А.Л.Ройтбурда. - М.: Мир, 1987. - 648с.: с ил.
5. Амелинкс С. Методы прямого наблюдения дислокаций: [Монография] / С. Амелинкс; Перевод с английского В.М.Кардонского. - М.: Мир, 1978. - 440с.
6. Набарро Ф.Р.Н. Пластичность чистых монокристаллов [Текст] / Ф.Р.Н. Набарро, З.С. Базинский, Д.Б. Холт. Пер. с англ. - М.: Металлургия, 1977. - 216 с. с ил.
7. Заяс Ю.Ф. Качество мяса и мясопродуктов [Текст]: Publisher / Ю.Ф. Заяс. - М.: Легкая и пищ. пром-сть, 1981. - 480с.
8. Новицкий А.Е. Микротрибометр для исследования электрохимических процессов при деформации поверхностного слоя металлов [Текст] / А.Е. Новицкий, М.А. Сологуб; Мин. высш. и ср. спец. обр-ния // Проблемы трения и изнашивания: Респ. межвед. научн.-техн. сб. - К.: Техніка, 1981. - Вып.19, 1-109. - С.58-60.
9. Хирт Д.П. Теория дислокаций: [Учебник] / Д.П. Хирт, И. Лотте; Под ред. д.ф.-м.н. Э.М. Надгорного и д.ф.-м.н. Ю.А. Осипьяна. - М.: Атомиздат, 1982. - 600с.: с ил.
10. Дьяченко Е.В. Метод определения глубины наклепанного слоя металла без разрезания изделия : [Текст] // сб. «Качество поверхности деталей машин», М.:, изд-во АН СССР, 1971, Л.1, С.87-102.
11. Назаренко П.В. Исследование влияния упруго-пластических деформаций и структурных изменений на процессы внешнего трения и износостойкость. Автореферат дисс...докт. техн. наук. – К.: КИИГА, 1973. – 49 с.

### К.3. Засоби оцінки силової взаємодії різальних інструментів з м'ясопродуктами

Сили різання м'яса і м'ясопродуктів характеризують не лише структурно-механічні характеристики сировини але і конструктивну досконалість подрібнювальних машин і, зокрема, різальних інструментів.

Для дослідження впливу коефіцієнта ковзання різальної крайки робочого органу на величину сил подрібнення м'ясопродуктів використовувались спеціально розроблені установки, схеми яких представлені для статичних і перехідних режимів подрібнення на рис. К.9 і для динамічних режимів на рис. К.10.

Для дослідження впливу коефіцієнта ковзання при перехідних режимах була застосована установка, схема якої подана на рис. К.9. Вона складається зі станини з двома стійками 1. На стійках шарнірно закріплені важіль 4. На вільному кінці важеля установлений вантаж і змінний ріжучий орган 3. В якості різального інструменту використовувались пластинки, лезо яких мало кути нахилу в діапазоні  $\pm 60^\circ$  до вісі важеля 4.

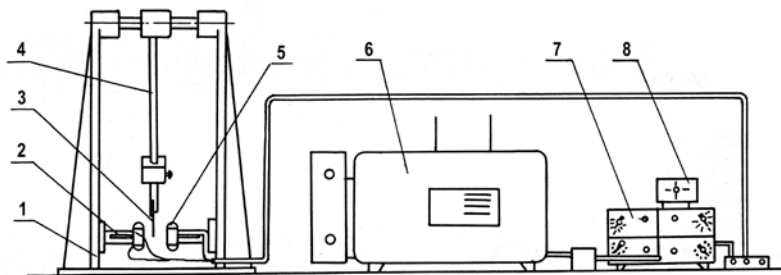


Рис. К.9 – Установка для вимірювання сил різання при перехідних режимах різання: 1 – стійка, 2 – тензобалка, 3 – ніж; 4 – важіль; 5 – оправа; 6 – осцилограф; 7 – підсилювач; 8 – тарувальний пристрій

Зразок м'яса діаметром 2,0 см закріплюється в спеціальних оправках з голками. Давачі сили з пружним елементом у вигляді труби однією стороною защемлені на стійках 1, а на другій (вільній стороні) пружного елемента закріплена оправа 5 для зразка. Зразок одночасно закріплюється на двох давачах сил. Між оправками 5 передбачений зазор для проходження різального інструмента.

Перед установкою зразка в оправки важіль 4 відхиляється на необхідний кут і фіксується. Після установки зразка важіль звільняється і ніж перерізає продукт. Зусилля, яке виникає при перерізанні зразка, а саме, вертикальна і горизонтальна його складові, фіксуються за допомогою підсилювача на реєструючому осцилографі.

Для вимірювання сил подрібнення м'ясопродуктів при динамічних режимах була виготовлена спеціальна установка, схема якої зображена на рис. К.10 [1].

Установка складається зі станини 1, по напрямних якої зміщується платформа 2 з приводом. Ножовий вал 4 отримує рух від електродвигуна 3 привода за допомогою клинопасової передачі.

В ножовому валу закріплюється змінна ножова головка 17 з ріжучим ножом 16 і противагою 13. Різальні ножі змінні і мають різну конфігурацію ріжучої кромки (рис. К.10).

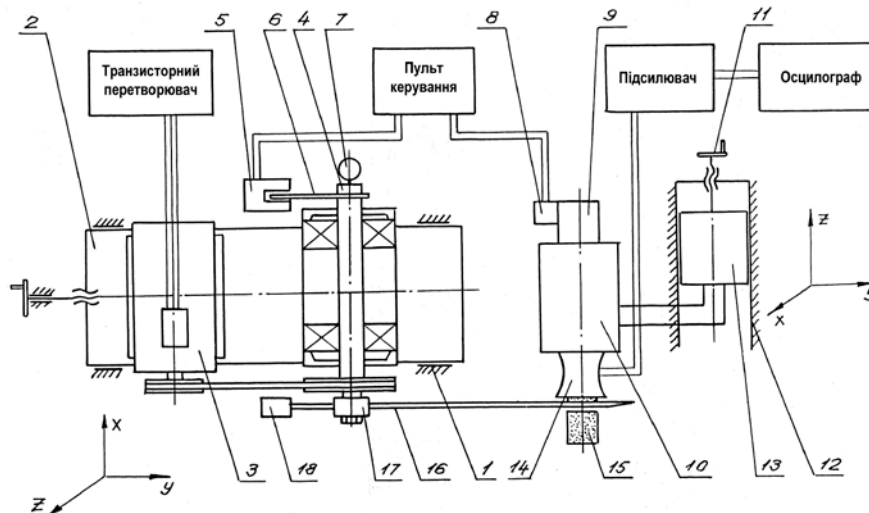


Рис. К.10 – Установка для вимірювання зусиль різання

Швидкість подрібнення регулюється зміною частоти обертів ножового вала або радіуса обертання різальної крайки. Кількість обертів ножового вала змінюється за допомогою тиристорного перетворювача частоти електричного струму або, при встановленні двигуна постійного струму, зміною напруги на обмотці збудження двигуна.

Радіус обертання різальної крайки змінюється при зміщенні по станині платформи 2 відносно зразка, що перерізається, 15 і зміни висоти зразку на стойці 12.

Враховуючи, що привод, завдяки силам інерції, не може швидко набрати необхідну кількість обертів, необхідну для отримання заданої швидкості подрібнення, в установці передбачене пристосування для введення зразка в зону подрібнення (рис. К.11). Воно складається з втулки 27, в яку встановлюється зразок. Всередині втулки розміщений рухомий поршень 26 з гострим гачком для фіксації зразка. Втулка може мати у перетині будь-який профіль. Поршень закріплений на штоці 19. За допомогою гайки 21 і пружин 20, що закріплені одним кінцем симетрично по периферії гайки, а другим кінцем на станині 12 стійки, шток з поршнем можуть швидко зміщатися вздовж осі втулки і виштовхувати зразок м'яса з зону подрібнення.

Управління рухом штока здійснюється з допомогою безконтактного шляхового перемикача 5 серії БВК і електромагніта 8 серії ЕМ (див. рис. К.10.).

Давач сил – це собою увігнуті пружні пластини 16 з наклеєними на них тензорезисторами 17. Форма пружних елементів давачів сил і їх перетин розраховувались за методиками, викладеними в [2] (рис. К.11.).

Пластини жорстко і симетрично до осі давача закріплені на двох круглих фланцях 14 і 18. Зовнішній фланець 14 слугує одночасно для кріплення прямої втулки 27, через яку на давач сил передається зусилля подрібнення. Фланець 18 призначений для кріплення давача сил до станини.

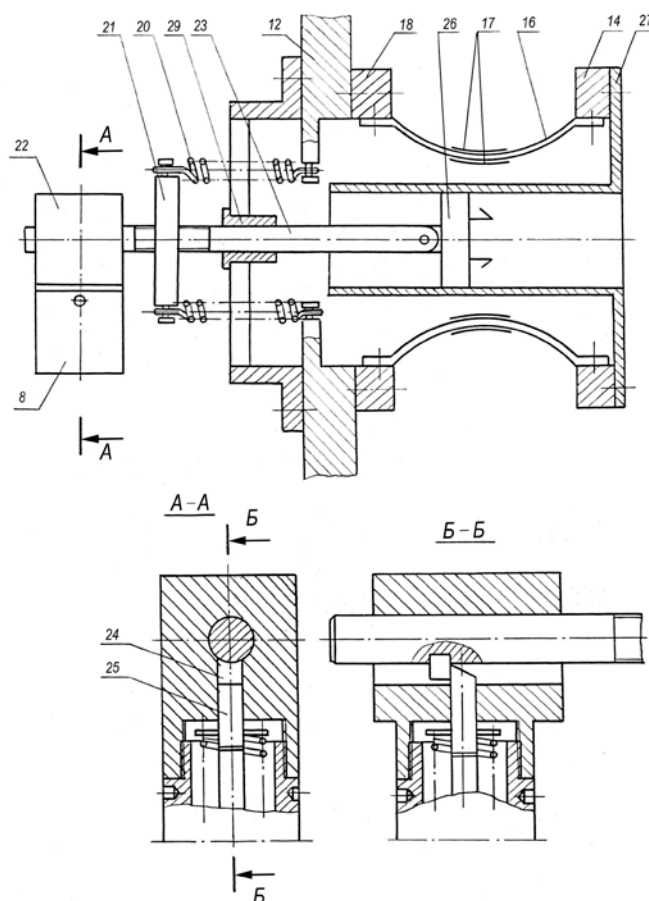


Рис. К.11 – Пристрій для введення зразка м'яса у зону різання

Для здійснення процесу подрібнення під різними кутами зустрічі з продуктом (кутами ковзання) каретка 10 зі зразком виконана рухомою. У вертикальних напрямних 12 у вигляді хвоста ластівки, за допомогою гвинтової передачі 11, переміщається каретка 13 з закріпленим на ній пристроєм для подачі зразка в зону подрібнення. У необхідному для проведення досліду положенні каретка 10 і станина 2 фіксуються.

Вимірювання зусиль подрібнення здійснюється у двох напрямках: горизонтальному і вертикальному. Для цього термостатований зразок м'яса 15, довжиною близько 40 мм, встановлюється в напрямну втулку 27 пристрою. Попередньо пристрій ставиться в положення «введення» (крайне ліве). Потім, за допомогою привода і тахометра, встановлюється частота обертання ножової головки 17, необхідна для експерименту, з попередньо закріпленим на ній і збалансованим різальним лезом заданої конфігурації.

Після стабілізації частоти обертів ножового вала на пульті керування натискається кнопка SB<sub>2</sub> «пуск» (рис. К.12). При цьому, через проміжне реле К<sub>1</sub>, напруга подається на контактний перемикач SQ<sub>1</sub> (нами використовувався перемикач серії БВК 231-24). При черговому проходженні пластини 6 (див. К.10) через щілину якоря перемикача 5, останній замикає котушку реле К<sub>2</sub> (рис. К.12). Через нормально відкритий контакт К<sub>2</sub> цього реле напруга подається на котушку електромагніта 8 (див. рис. К.11) серії ЕМ-36. Сердечник електромагніта з'єднаний з підпружиненим фіксатором 25 і утоплює його. При

цьому шпонка 24 штока поршня 26 вивільняється розтягнутими пружинами і шток подає заготовку 15 в зону подрібнення (див. рис. К.10).

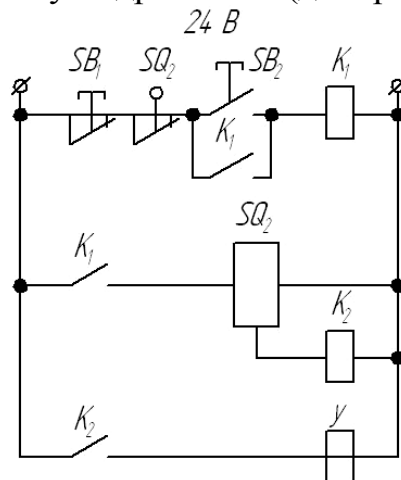


Рис. К.12 – Блок-схема керування установкою для вимірювання сил різання

Положення пластини 6 на валу 4 залежить від частоти обертання вала і визначається часом затримання спрацювання елементів у ланцюгу пристрою для подачі зразка, що розрізається, в зону подрібнення. За незначних швидкостей подрібнення (до 5 м/с) вісь пластини встановлюється під кутом близько  $90^\circ$  до вісі, що з'єднує центр ножового вала і точки різальної крайки ножа, що проходить через центр заготовки, в сторону випередження перерізання. При підвищенні швидкості величина кута збільшується з тим, щоб час спрацювання електромагніта і механічної системи подачі зразка в зону подрібнення був меншим від часу повороту ножа на кут між вказаними вісями.

При подрібненні виникають зусилля, які через втулку 27 передаються на давач сил. Сигнал з давача сил через підсилювач передається на реєструючий пристрій.

Для вимірювання сил подрібнення за швидкості руху леза від 0,2 до 10 м/с застосовувалася установка, схема якої зображена на рис. К.13. По двох циліндричних направляючих 1 пересувається каретка 4. До каретки прикріплений силувимірювальний давач 5 типу ГСП 1778 ДСТ. До давача прикріплений ріжучий ніж 11.

Продукт встановлюється в обойму 8, яка закріплена на силувимірювальному давачі 5. Швидкість подрібнення вимірюється за допомогою постійного магніта 6, закріпленого на рухомій каретці, і двох герконів 7 типу КЕМ-3, які закріплені на відомій відстані один від одного на стояку 9 (рис. К.13).

Нижній геркон закріплений на рівні початку контакту ножа з продуктом. Час зміщення каретки між герконами фіксується за допомогою вимірювача часових інтервалів І2-26. По відстані між герконами і часу проходження її кареткою визначається швидкість подрібнення. За допомогою електромагнітів 3 серії ЕМ-36 здійснюється пуск каретки з заданої висоти. Для прискорення руху каретки передбачений пневмоциліндр 2 із запірним пристроєм, який відкривається за допомогою електромагніта 3 типу ЕМ-36.

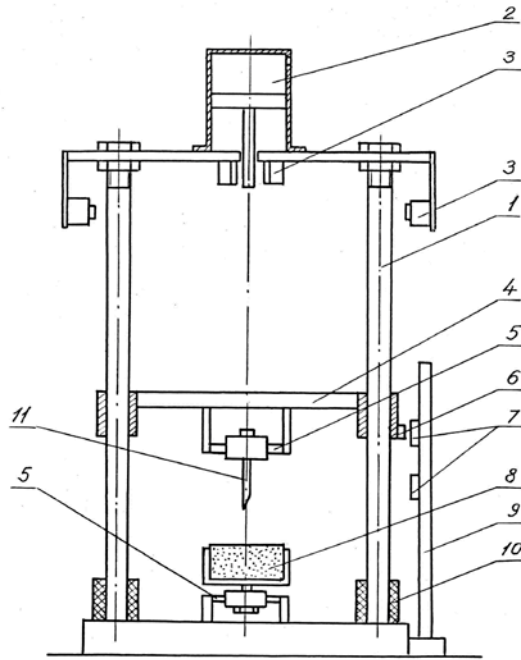


Рис. К.13 – Установка для вимірювання сил різання при перехідних режимах різання

Тензодавачем силовимірювачів 5 з'єднані зі шлейфами осцилографа, або з багатоканальним запам'ятовуючим осцилографом Н071. Запуск осцилографа здійснюється за допомогою нижнього геркона 7 в момент входження ножа в продукт. Амортизатори 10 обмежують хід каретки. Тарування давачів і розшифровка показників пристрою здійснювалась загальновідомим способом [3].

Для визначенні сил зовнішнього тертя м'ясопродуктів по поверхнях конструкційних матеріалів використовувались пристрої, схеми яких представлені на рис. К.14. і К.15.

Пристрій (рис. К.14) складається зі станини 1 з циліндричними напрямними 5, каретки 4 з приводом, давача сил 7, жорсткої тяги 8 з касетою 10 і нерухомої змінної поверхні тертя 11.

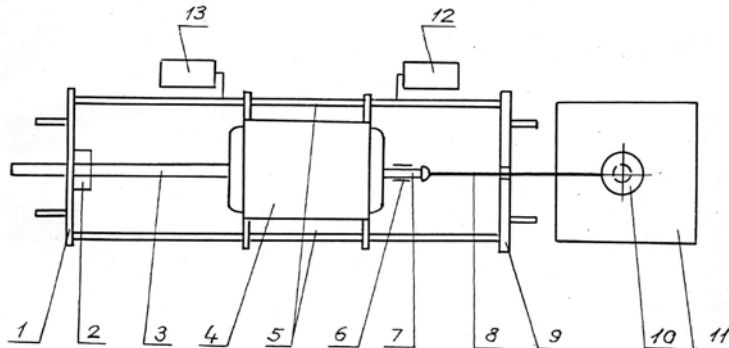


Рис. К.14 – Схема пристрою для визначення величини питомої сили тертя м'яса і м'ясопродуктів по поверхнях конструкційних матеріалів

Давач сил складається з пружного елемента 7 з наклеєними на нього тензорезисторами 6. Він закріплений на каретці 4. За допомогою жорсткого

важеля 8 давач сил з'єднаний з касетою 10 для установки зразка і передає на неї зусилля під час руху. Тверда поверхня змінна і мала розміри 60×80 мм.

Зусилля притискання продукту до твердої поверхні здійснюється за допомогою пуансона касети і вантажів, встановлюваних на нього. Діаметр отвору в касеті 10 дорівнював 20 мм.

При вимірюванні сили тертя привод за допомогою гвинтової пари 2-3 зміщує каретку по напрямних 5. За допомогою важеля 8 зміщується касета 10 зі зразком, притиснутим нормальною силою до поверхні тертя. Сила тертя, що виникає при цьому, через давач сил перетворюється в електричний сигнал і, через підсилювач, поступає на реєструючий прилад. На станині встановлені два кінцевих вимикача 12 і 13, які обмежують переміщення каретки.

При дослідженні величин сил тертя м'ясопродуктів по твердих поверхнях на статичних режимах ковзання використовувався пристрій, схема якого зображена на рис К.15. Він складається зі станини 1 з напрямними у вигляді хвоста ластівки 13, рухомого стола 2 з поверхнею тертя 6, вертикальної стійки 10 і привода 15.

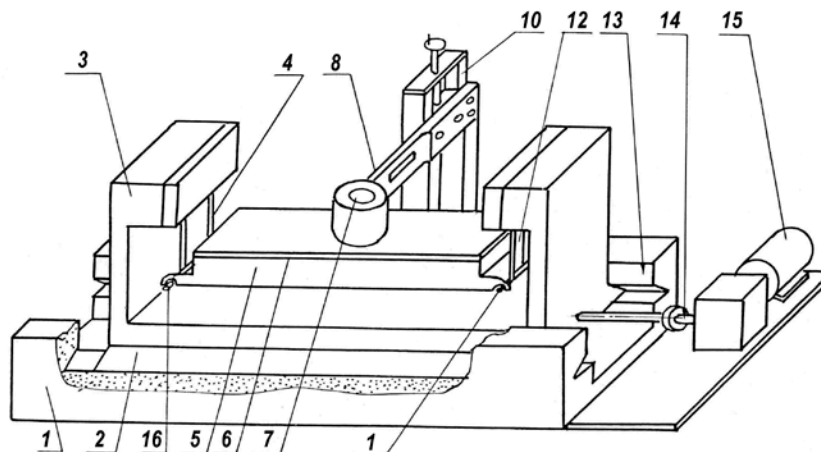


Рис. К.15. Схема пристрою для вимірювання сил тертя на статичних режимах ковзання

На вертикальних стійках 3 рухомого стола закріплені вертикально гнучкі пластини 4 і гнучкий елемент давача сил 12. На нижніх вільних кінцях пластин 4 і гнучкого елемента жорстко закріплені вісі 16.

Каретка 5, за допомогою спеціальних пазів, встановлюється шарнірно на вісі 16 так, щоб поверхня тертя 6 була горизонтальною.

Гнучкі пластини 4 виготовлені з тонкої сталеві стрічки і призначені для підтримання каретки 5 у підвішеному горизонтальному стані. В той же час, вони не чинять опору зміщенню каретки в горизонтальній площині. Отже, зусилля, необхідне для зміщення каретки з площиною тертя 6, сприймається тільки давачем сил 12.

Стійка 10 має вертикальні пази, в яких, за допомогою гвинтової передачі 9, може переміщатися каретка 11. На каретці жорстко закріплений один кінець пружного елемента давача сил 8. На другому вільному кінці давача закріплена касета 7 з вертикальним отвором діаметром 0,02 м для встановлення зразка. За допомогою гвинтової передачі 9 можна встановити необхідний зазор між



поверхнею тертя 6 і горизонтальною площиною касети 5. Навантаження на продукт здійснюється за допомогою вантажів і пуансона, що входить в отвір касети.

Привод 15 з регульованою кількістю обертів, за допомогою гвинта 14, зміщує рухомий стіл 5 в напрямних 13 зі швидкістю до 1 м/хв. Сила тертя, виникаюча в зоні контакту м'ясопродукту з поверхнею тертя 6, передається від касети 7 на давач сил 8, а від твердої поверхні 5 на давач сили 12. Сигнали від давачів сил через тензопідсилювач поступають на реєструючий прилад.

Для вимірювання сил тертя при динамічних режимах зміщення м'ясопродуктів використовували спеціальний стенд (рис. К.16).

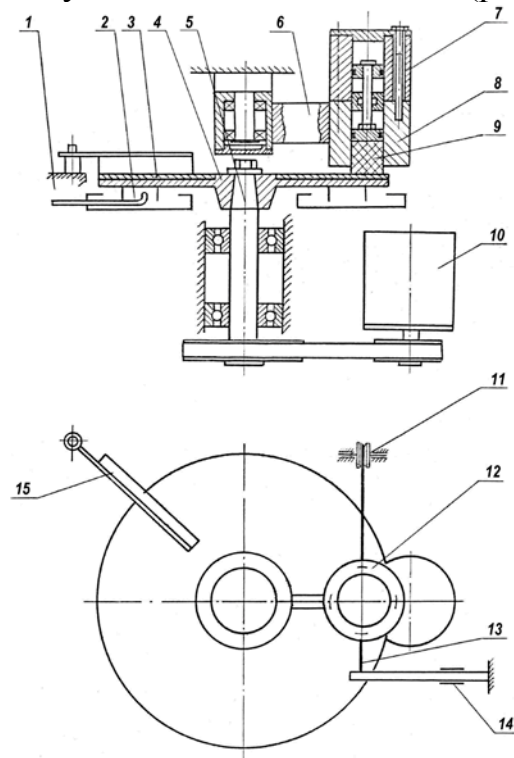


Рис. К.16. Стенд для визначення сил зовнішнього тертя

Стенд складається зі станини 1, на якій встановлений привод 10 з регульованою кількістю обертів і диск 4. Змінна поверхня тертя 3 кріпиться на диску. Поряд з диском на вісі 5 шарнірно встановлений важіль 6 з матрицею 8 для встановлення зразка 9. Вісь отвору в матриці вертикальна. В отвір матриці встановлений притертий пуансон з вантажами, або з навантажувальним пневмоциліндром 7. Матриця з продуктом легко переміщується навколо вісі 5. За допомогою гнучкої пружної нитки 13 матриця зв'язана з давачем сил 14, що є сталеву пружною балкою рівного опору з наклеєними на неї тензодавачами. Шкребок 15 призначений для видалення продуктів зношування зразків м'яса.

Для охолодження диска під час вимірювання сил тертя м'ясопродуктів за температури нижче 0°C, диск знизу забезпечений ребрами, розташованими по концентричних колах і занурених в охолоджувальний сольовий розчин, що подається через форсунку 2.

Для вимірювання сил тертя у конкретних умовах (заданих тиску, швидкості ковзання і температурі) термостатований зразок 9 м'ясопродукту



встановлюється у матрицю 8, навантажується і, після цього, вмикається привод, який забезпечує задану кількість обертів. Сила тертя зміщує матрицю і, через гнучку нитку 13, передається на давач сили. Через підсилювач сигнал від давача сили реєструється на стрічці самопишучого приладу. Тарування давача здійснювалось з використанням вантажів через блок 11.

Деформування м'ясопродуктів – один з основних показників процесу подрібнення. Для визначення абсолютних і відносних величин деформації використовували консистомір Геплера, дефометр типу ДМ-2 і конічний пенетрометр. Методика вимірювання деформаційних властивостей м'яса і м'ясопродуктів за допомогою цих приладів описана в роботах [4, 5].

Для вимірювання величини деформації м'ясопродукту в зоні різання реальних кусків м'яса використовувався метод накатаних ґраток [6]. Цей метод ефективно використовується при дослідженні великих пластичних, в'язко-пружних та інших видів деформацій.

Величина деформації визначалась по спотворенню розмірів накатаних на поверхнях м'ясопродукту комірок ґраток. При цьому вводилась гіпотеза про ізотропність матеріалу і однорідність деформацій в межах кожної комірки ґратки. Вимірявши розміри комірок до деформації ( $a_1, b_1$ ) і після деформації ( $a_2, b_2$ ), а також відстань від площини розрізу до центру комірки у вихідному положенні ( $R_1$ ) та після деформування ( $R_2$ ) визначали величину деформації (рис. К.17). Для випадку використання прямокутних сіток величини головних деформацій визначалися за формулами [6]:

вздовж вісі X

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} \ln \frac{l}{l_0} = \frac{1}{2} \ln \frac{b_2^2 + n_1^2 a_1^2 + 2n_1 a_2 b_2 \cdot \cos \delta_2}{b_1^2 + n_1^2 a_1^2 + 2n_2 a_1 b_1 \cdot \cos \delta_1} \quad (\text{К.7})$$

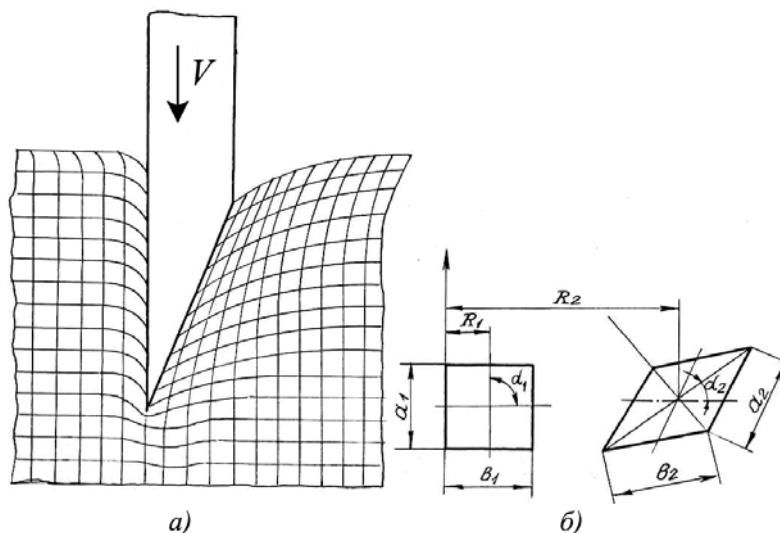


Рис. А9. Схема деформування м'яса при взаємодії з клиновидним лезом вздовж вісі Y

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2} \ln \frac{b_2^2 + n_1^2 a_2^2 + 2n_1 a_2 b_2 \cdot \cos \delta_2}{b_1^2 + n_1^2 a_1^2 + 2n_2 a_1 b_1 \cdot \cos \delta_1} \quad (\text{К.8})$$

Компоненти головних лагранжевих деформацій

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{b_2^2 + n_1^2 a_1^2 + 2n_1 a_2 b_2 \cdot \cos \delta_2 - b_1^2}{b_1^2 + n_1^2 a_1^2 + 2n_1 a_1 b_1 \cdot \cos \delta_1} - 1 \right)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{b_2^2 + n_1^2 a_2^2 + 2n_2 a_2 b_2 \cdot \cos \delta_2 - b_1^2}{b_1^2 + n_2^2 a_1^2 + 2n_2 a_1 b_1 \cdot \cos \delta_1} - 1 \right), \quad (K.9)$$

$$\text{де } n_{1,2} = \frac{\left[ a_1^2 b_2^2 + a_2^2 b_1^2 \pm \sqrt{a_1^2 b_1^2 - a_2^2 b_1^2 + 4(a_1 b_1 a_2^2 \cos \delta_1 - a_2 b_2 \cdot a_1^2 \cos \delta_2)} \right]}{2(a_1 b_1 a_2^2 \cdot \cos \delta_1 \cdot a_2 b_2 a_1^2 \cdot \cos \delta_2)}$$

Для дослідження розвитку деформацій під дією механічних навантажень при впровадженні леза в продукт використовувались два методи: установка в зоні контакту лез з продуктом п'єзокерамічних давачів і метод накатаних сіток.

Метод накатаних сіток показав переваги (у порівнянні з застосуванням давачів) у вимірюваннях величини деформацій і, побічно, розподілу тиску на площину, нормальну до площини різання. В експериментах використовувались сітки з довжиною сторони комірки 0,002 м.

З метою проміжної фіксації конфігурації комірок ґратки, які деформуються під дією механічних навантажень при входженні леза в продукт, використовувалась високошвидкісна кінокамера типу СКС-1М. В залежності від швидкості різання частота кадрів змінювалась від 1500 до 8000 за секунду. Аналіз результатів кінозйомки процесу різання на різних його етапах дозволяє скласти схематичну картину деформації об'єму в зоні різання (див. рис. К.17).

Відомо, що пружність тіл характеризується модулями пружності першого роду (E) і другого роду – зсуву (G). Ці модулі визначались шляхом вимірювань величин деформацій, які відповідають величині зовнішнього навантаження і визначеному терміну навантаження. Величина модуля пружності визначалась експериментально з обробкою результатів за формулами, які описують деформаційну поведінку досліджуваного середовища (реологічну модель) [7], і залежить від виду навантаження (стискання, зсув, об'ємне стискання та ін.). Зміна величини деформації м'ясопродуктів у переважній більшості експериментів здійснюється в статичних режимах. В процесі різання термін навантаження м'ясопродуктів зазвичай дуже малий, тому для опису деформаційної поведінки продукту в зоні різання може бути використана модель Максвела.

Для характеристики пружних властивостей продукту в області різання нами були використані комплексні (динамічні) модулі зсуву [8]:

$$G^* = G' + jG'' \text{ і пружності } E^* = E' + jE'' \quad (K.10)$$

де  $E', G'$  - модулі пружності та зсуву;

$E'', G''$  - модулі втрат.

Для полімерних і біополімерних матеріалів, в яких проходять релаксаційні процеси, одним з самих ефективних методів дослідження їх пружних і дисипативних властивостей є вимірювання затухання і швидкості розповсюдження пружних хвиль за допомогою впливу на зразок звукових хвиль [9].

Величини модулів  $E', E''$ ,  $E^*$  і  $G', G'', G^*$  визначалась експериментальним шляхом за допомогою спеціально виготовленого стенду, блок схема якого подана на рис. К.18.

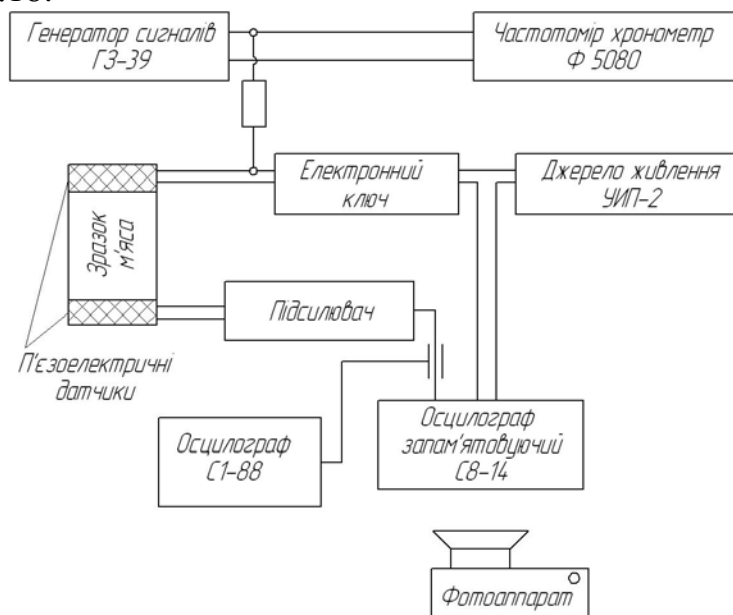


Рис. К.18 – Блок-схема установки для вимірювання дисипації механічних коливань в м'ясопродуктах

До зразка м'яса у вигляді циліндра з торців з невеликою силою притискаються п'єзоелектричні плоскі давачі. Плоскі зовнішні робочі поверхні давачів (електроди) виготовлені зі срібла. В якості матеріалу п'єзокераміки вибраний титанат барію, якому властиві механічна міцність, великий і стабільний коефіцієнт електромеханічного зв'язку. Давачі встановлені у спеціальні гнізда затискного механізму, який забезпечує їх щільний контакт зі зразками.

Для запобігання передачі вібрацій на затискач під давач вкладається шар замазки (каніфоль і парафін у рівних пропорціях), яка є доброю акустичною ізоляцією п'єзокераміки від тримача.

Сигнал необхідної частоти за допомогою генератора сигналів подається на електрод давача. П'єзодавач перетворює електричну енергію в механічну і впливає на зразок із заданою частотою.

Механічні коливання передаються зразком на нижній п'єзодавач і перетворюються ним в електричний струм. Сигнал знімається з електрода давача і через підсилювач звукової частоти подається на осцилографи. Якщо довжина зразка кратна  $\frac{1}{4}$  довжині хвилі, то у зразку виникає стояча хвиля, яка зручна для спостереження на осцилографі. За допомогою електронного ключа одночасно переривається подача сигналу від генератора на верхній давач і включається система записуючого осцилографа, який з'єднаний з нижнім давачем – перетворювачем енергії хвиль механічних збуджень в електричний сигнал. В момент включення електронного ключа переривається подача сигналу на верхній давач і до нижнього давача подаються механічні коливання, які доходять до зразка перед включенням ключа. Вузли поздовжньої стоячої

хвилі коливань розташовані вздовж зразка на різних відстанях від нижнього давача, а тому при подоланні цих відрізків шляху вони будуть проходити до нижнього давача через різні проміжки часу і з різними ступенем дисипації коливань. Величина зменшення амплітуд залишкових механічних коливань, яка сприймається нижнім давачем, може слугувати мірою затухання поздовжніх хвиль у зразку м'яса.

Величина  $X_0$  визначається за дослідними даними при кожній частоті механічних впливів і являє собою значення  $X$ , при якій амплітуда  $A_0$  зменшилось в  $e$ -разів.

За допомогою установки (див. рис. К.18), можна визначити декремент затухання механічних коливань [9]:

$$\Lambda = \ln \frac{A_0}{A_1} = \pi \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (\text{K.11})$$

де  $A_0, A_1$  – величини двох сусідніх амплітуд на осцилограмі вільних затухаючих коливань;

$\delta$  - кут втрат.

В свою чергу тангенс кута втрат в середовищі при деформації стискання визначається так [9]:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{E'}{E''} = \frac{\eta'}{\eta''} = \frac{1}{\omega \cdot \tau} \quad (\text{K.12})$$

Величини логарифмічного декременту затухання і пов'язаного з ним тангенса кута втрат характеризує релаксаційні явища при динамічних режимах механічних коливань. Відомо, що декремент затухання один і той же для всіх складових гармонік коливань [10], що дозволяє використовувати його у розрахунках узагальнених динамічних характеристик матеріалів при вільних коливаннях під впливом механічних навантажень. При цьому передбачається, що поведінку зразка в цілому можна моделювати введенням загальної пружності або в'язкості, які характеризують пружні і дисипативні властивості матеріалу зразка.

Величина динамічного комплексного модуля пружності  $E^*$  визначається через характеристики затухання механічних коливань для кожної частоти. Матеріальна частина комплексного модуля  $E^*$  визначається із співвідношення [9]:

$$E' = \frac{\omega^2 \cdot \lambda^2 \cdot \rho [4\pi^2 - (\lambda/x_0)^2]}{[4\pi^2 - (\lambda/x_0)^2]^2} \quad (\text{K.13})$$

Матеріальна частина в'язкості – динамічна в'язкість дорівнює:

$$\eta' = \frac{4\pi \cdot \omega \cdot \lambda^2 (\lambda/x_0)}{[4\pi^2 - (\lambda/x_0)^2]^2} \quad (\text{K.14})$$

Для в'язкопружних тіл [8]:

$$\left. \begin{aligned} E' &= E^* \cdot \operatorname{Cos} \delta \\ E'' &= E^* \cdot \operatorname{Sin} \delta \end{aligned} \right\} \quad (\text{A8})$$

Отримавши за допомогою стенду (див. рис. К.18) осцилограми затухання механічних коливань в м'ясопродуктах за різних режимів навантаження можливо визначити динамічний модуль пружності і динамічну в'язкість через кут втрат і швидкість зміни амплітуди коливань.

Модуль пружності при об'ємному стисканні визначали з використанням консистометра Геплера за методикою Горбатова А.В. [11]:

$$K = \frac{\sigma}{\varepsilon_v} \quad (\text{К.16})$$

де  $\sigma$  - гідростатичний тиск у замкненому об'ємі;

$\varepsilon_v = \Delta V/V$  - об'ємна деформація зокрема при даному тиску.

Густина продукту визначалась також за допомогою консистометра Геплера за методикою, запропонованою Горбатовим А.В. [11].

### ЛІТЕРАТУРА

1. А.с. № 1465106. М.Н. Клименко, К.М. Куюмджиев, С.В. Соломаха, И.В. Балык / Установка для измельчения усилий резания мясопродуктов. - опубликовано 15.06.89 г. Бюл. открытия. изобретения, № 10.
2. А.с. № 625671. В.В. Кулинич / Устройство для непрерывной подачи к режущему органу кусков мясного сырья. Опубликовано 30.09.88 г. Бюл. Открытия. Изобретения, № 36. - с. 9.
3. Куюмджиев К.Н. Совершенствование процесса резания шпика с целью его интенсификации и модернизации оборудования: [Текст] / Дис. канд. техн. наук. - К.: КТИПП, 1994. - 219 с.
4. Клименко М.Н. Развитие теории процесса резания мяса и совершенствование машин для измельчения сырья в производстве колбасных изделий: [Текст] / Дисс. докт. техн. наук. Киев, КТИПП, 1990 г. - 459 с.
5. Захаров В.А. Экспериментальные и аналитические исследования процесса формирования мяса при производстве порционных полуфабрикатов: Автореф. дисс. канд. техн. наук. - М., 1992. - 20 с.
6. Дель Г.Д. Метод делительных сеток. [Текст] / Г.Д. Дель, Н.А. Новиков: Машиностроение, 1979. - 144 с.
7. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов / А.В. Горбатов, А.М. Маслов, Ю.А. Мачихин; под ред. А.В. Горбатова. - М.: Легкая и пищевая пром-ть, 1992. - 296 с.
8. Мак-Келви Д.М. Переработка полимеров. [Текст] / Перевод с англ. - М.: Наука, 1978. - 736 с.
9. Михайлов И.Г. Основы молекулярной акустики. [Текст] / И.Г. Михайлов, В.А. Соловьев, Ю.П. Сырников - М.: Наука, 1984. - 514 с.
10. Астарита Дж. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей [Текст] / Дж. Астарита, Дж. Маруччи. Пер. с англ. М. - Мир, 1998. - 310 с.
11. Горбатов А.В. Зависимость плотности фарша при различном давлении от содержания в нем влаги и жира. [Текст] / А.В. Горбатов, В.Д. Косой // Мясная индустрия СССР. - 1989. - № 2. С. 33-34.

#### К.4. Мембранний метод дослідження напружено-деформованого стану біополімерів м'яса

Розрахунки процесів різання м'ясопродуктів необхідно робити на основі діаграм деформації м'яса, що отримуються в лабораторних умовах з дослідів на розривання. Відомо, що вивчення механічних властивостей тіл краще всього здійснювати при випробуваннях їх на розривання [1]. Взагалі, жоден з методів випробувань за об'ємом отримуваних відомостей не може конкурувати з простими випробуваннями на розтягування. Разом з тим, цінними з точки зору можливості застосування у розрахунках, ці відомості стають лише тоді, коли вони отримані в умовах, що забезпечують однорідність напруженого і деформованого станів випробовуваного зразка. Це означає, що вимір деформацій повинен робитися не по зміні відстані між затискачами випробувальної машини, а по базі зразка. Робити ж виміри деформацій на базі зразка за допомогою давачів для таких тіл, як м'ясо, складає великі технічні труднощі через його дуже малу жорсткість. Авторами робіт [2, 3, 4] запропонований метод, що забезпечує достатню міру однорідності напружено-деформованого стану і високу точність вимірювань напружень і деформацій.

Метод ґрунтується на випробуванні зразків у вигляді круглої, тонкої мембрани (рис. К.19), що навантажується рівномірним тиском.

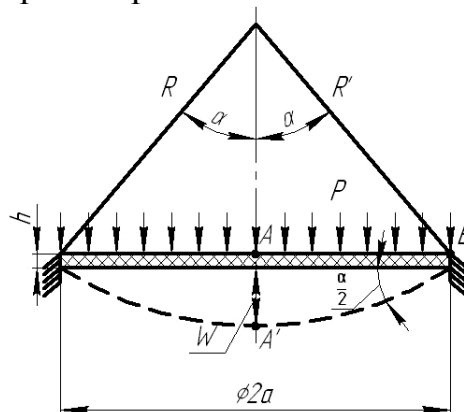


Рис. К.19 – Схема навантаження круглої плоскої мембрани.

Під дією рівномірного тиску такі мембрани, як правило, деформуються по сферичній поверхні і, отже, має місце рівність [2, 4]:

$$\varepsilon_u^p = \sqrt{2\varepsilon_{ij}^p \cdot \varepsilon_{ij}^p} / 3 \quad (\text{К.17})$$

$$\varepsilon_u = \sqrt{3\sigma_{ij} \cdot \sigma_{ij}} / 2 \quad (\text{К.18})$$

Отже, авторами розглянуті визначальні рівняння, покликані математично описувати реально існуючі у м'яса властивості пружності, в'язкості і пластичності. Очевидно, що в широкому температурному інтервалі, в якому проводяться різні виробничі процеси механічної переробки м'яса, енергетичні витрати на переробку і якість самої переробки істотно залежать від цих властивостей. Тому вбачається важливим для інженерних розрахунків механічних процесів і устаткування вивчити

температурні інтервали переважної реалізації тієї або іншої з властивостей або їх комбінації.

Як відмічалась раніше, основні технологічні процеси механічної переробки м'яса полягають головним чином в руйнуванні його тканин і структури, а також в інтенсивній деформації. Тому головним завданням механічної переробки м'яса являється зменшення енергетичних витрат на ці процеси. Теоретичний розрахунок енергії руйнування або деформації заданого об'єму м'яса ґрунтується на знанні напружено-деформованого стану в кожній точці, що визначається характером силової дії, геометричними розмірами і властивостями м'яса (пружністю, пластичністю, в'язкопружністю) за заданих умов навколишнього середовища. Іншими словами, усе визначається співвідношеннями, конкретну форму яких можна записати у вигляді:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta \text{ та } \sigma_r = \sigma_\theta, \quad (\text{К.19})$$

де  $\varepsilon_r$  і  $\varepsilon_\theta$ ;  $\sigma_r$  і  $\sigma_\theta$  - відповідно, деформації і напруження в радіальному і коловому (тангенціальному) напрямках.

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_r = \frac{A'B - AB}{AB} \quad (\text{К.20})$$

де  $A'B = a/\cos \alpha/2$ ,  $R = a/\sin \alpha$ ,  $AB = a$

Після підставки цих значень отримаємо:

$$\varepsilon = \varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \frac{a}{\sin \alpha} - 1 \quad (\text{К.21})$$

Інтенсивність напружень і деформацій, підраховані за формулами (К.17 і К.18) будуть

$$\begin{aligned} \sigma_u = \sigma_r = \sigma_\theta = \sigma \\ \varepsilon_u = 2\varepsilon_r = 2\varepsilon_\theta = 2\varepsilon \end{aligned} \quad (\text{К.22})$$

На підставі безмоментної теорії сферичної оболонки, напруження, діючі в радіальному і тангенціальному напрямках визначаються формулою:

$$\sigma_u = \sigma = \sigma_r = \sigma_\theta = \frac{PR}{2h} = \frac{Pa}{2h \cdot \sin \alpha} \quad (\text{К.23})$$

де  $h$  - товщина мембрани;

$P$  - тиск.

Стріла прогину мембрани, як це витікає з геометричних міркувань (рис. К.19) визначається виразом:

$$W = a \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \quad (\text{К.24})$$

Отже, діаграма деформації зразка у вигляді круглої, тонкої мембрани в координатах  $\sigma_u - \varepsilon_u$  може бути побудована на підставі формул (К.21, К.23, К.24). Порядок побудови наступний. В процесі експерименту вимірюється тиск  $P$  і найбільший прогин мембрани  $W$ , що відповідає цьому тиску. За формулою (К.24) визначається кут  $\alpha$ , відповідно до виразів (К.21) і (К.23) з урахуванням другої рівності (К.22) встановлюється координати діаграми деформації  $\sigma_u - \varepsilon_u$ .

Таким чином, діаграма деформації будується аж до моменту руйнування. Діаграма деформації може дати дуже важливу інформацію про характер деформації і руйнування тканин м'яса. Так, на підставі цієї діаграми, можуть бути встановлені межі застосовності закону Гука, зв'язок між напруженням в пластичній області, межі плинності, значення напруження і деформацій у момент руйнування тканин м'яса або його інших структурних елементів, роботу руйнування тощо.

Схема взаємодії елементів каркаса м'яса з лезом подана на рис. К.20 [5].

Розтин шарів каркаса виконаний в граничних точках ділянок контакту їх з лезом і один з одним. Дії відсічених елементів каркаса позначені  $q_{i+k} = q_i$ .

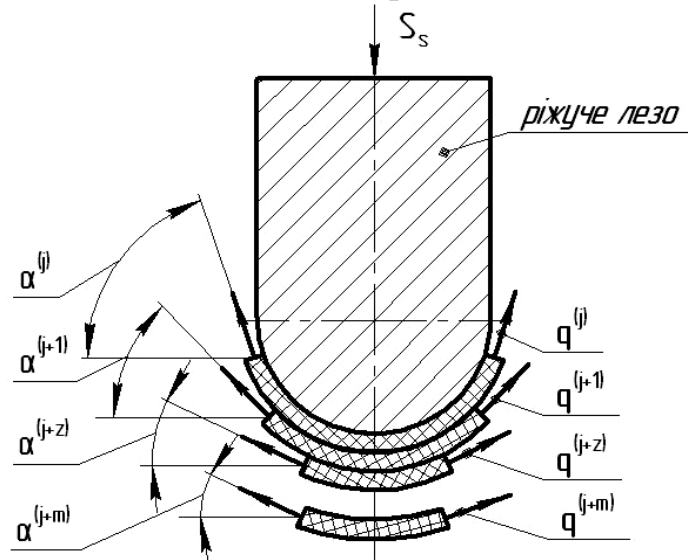


Рис. К.20 – Схема взаємодії елемента каркаса м'яса з лезом

Індексом « $j$ » позначений найменший номер навантаженого (ще не зруйнованого) шару каркаса, а  $K = 1, 2, 3 \dots m$ , де  $m$  — кількість навантажених шарів каркаса. Погонні сили  $q_i$  визначаються формулами:  $q_i = \sigma_{pi} \cdot \delta$ .

Орієнтація погонних сил в системах  $iOX$  визначаються рівнянням похідної форми « $i$ -того» шару в навантаженому стані. Позначимо погонне навантаження на лезо через  $S$ . Рівняння проєкцій погонних сил на вісь ординат будь-якої з системи  $YOX$  матиме вигляд:

$$S(y^*; y'^*) = -2 \sum_j^{j+m} q_i [y_i(0); y'_i(0)] x \cdot \sin|\alpha_i| \quad (К.25)$$

Проекція погонної сили, діючої на лезо, на вісь  $OX$  дорівнюватиме нулю в силу симетрії даної взаємодії.



Характер зміни величини  $S_y$  в залежності від глибини впровадження леза в матеріал при  $q_i = \Delta l_{ij} / \alpha$  і величині  $\Delta$  в якості параметра наводиться на рис. К.21.

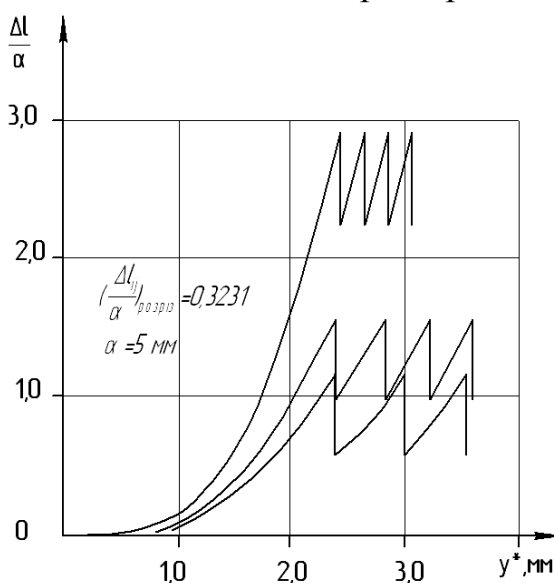


Рис. К.21 – Залежність погонного навантаження на лезо від глибини його впровадження в матеріал: 1 -  $\Delta = 0,6$  мм; 2 -  $\Delta = 0,4$  мм; 3 -  $\Delta = 0,2$  мм

Розриви першого роду відповідають руйнуванням шарів каркаса при  $\Delta l_{ij} / a = 0,32$  (параметр призначений умовно).

Отримані формули дозволяють чисельно отримати зусилля при руйнуванні складної біологічної тканини м'яса лезом. Проте рахунок ускладнений відсутністю точних даних про властивості тканини в цілому і окремих її шарів.

З іншого боку пропонується модель матеріалу і опис способу руйнування його лезом дозволяє визначити умови зняття характеристик зразків матеріалу, що необхідно для збігу розрахункових і дослідних характеристик процесів різання.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Степанов Г.В. Упругопластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок / Г.В. Степанов. - Киев: Наукова думка, 1989.-268 с.
2. Ивашов В.И., С.Г. Юрков, Б.Н. Дуйденко и др. Динамическая диаграмма «напряжение - деформация» для мягких коллагенсодержащих материалов // Мясная индустрия СССР. - 1992г. № 6. - с. 39 - 41.
3. Сухенко В.Ю. Моделивання процесів подрібнення м'яса і синтез технологічних машин: Монографія /В.Ю. Сухенко – К.: ЦП «Компринт», 2013. – 227 с.
4. Филоненко- Бородич М.М. Теория упругости. М-Л.: Гостехиздат, 1977 г. 300 с.
5. Сидоряк А.Н. Совершенствование процесса измельчения мяса [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12. М.: 2007 с. 176 с ил.

## Рецептури сирокочених ковбас

№ п/п	Види ковбас	Найменування сировини							
		Яловичина		Свинина	Шпик			$l \times b$ або $d_e$ , мм	$W_r$ , %
		в/Г	1 г	н/ж	Хребтовий	Боковий	Грудинка		
1.	Брауншвейгська	45		25	30			4×5	27
2.	Зерниста	45			55			≤3	25
3.	Майкопська			25/75*				≤6	
4.	Московська	75			25			≤6	
5.	Невська	10		55	35			≤6	
6.	Особлива	40		10			50	$d_e < 7$	
7.	Польська	40		30	30			≤3	
8.	Свиняча			40			60	$d_e \leq 7,6$	
9.	Сервелат	25		25/50**				≤3	
10.	Радянська	20		50	30			≤3	
11.	Столична	35		35	30			≤3	
12.	Любительська		65				35	≤8	
13.	Делікатесна	25	5	35	35			3×3	
14.	Фантазія	50		10	50			6×6	30

Примітка: \* - напівжирна; \*\* - жирна свинина;  $W_r$  – максимальна допустима вологість готової ковбаси;  $l \times b$  – розмір поперечного перерізу шпику або  $d_e$  – ефективний діаметр шпику

## Методи і засоби оцінки реологічних, хіміко-технологічних і органолептичних характеристик м'яса і м'ясопродуктів

**Липкість фаршу** - один з основних показників, які свідчать про стан і якість м'ясного фаршу. Відносна величина липкості м'ясного фаршу вимірювалась за допомогою приладу запропонованого Большаковим А.С. для вимірювання липкості. В якості контактних пластин використовувались сталені циліндри зі шліфованими робочими площинами. Зразок мосою 2 гр між контактуючими поверхнями підпресовувався протягом 30с рухомою верхньою частиною з загальною масою 0,6 кг. Порядок вимірювання липкості описаний в роботі [1].

**Граничне напруження зсуву м'ясопродуктів** в лабораторних і виробничих умовах визначали за допомогою індукційного, статичного і динамічного пенетрометрів та ротаційного віскозіметра [2, 3].

В наш час для оцінки консистенції харчових продуктів, зокрема ковбасного фаршу в нашій країні і за рубежем поширені реологічні прилади, засновані на методі пенетрації. Пенетрація – це глибина проникнення тіла визначеної форми і розмірів та постійно навантаженого в досліджуваний продукт за визначений час при заданій температурі.

Прилади, що використовують метод пенетрації для вимірювання структурно-механічних властивостей продуктів, прийнято називати пластометрами, пенетрометрами і консистометрами.

Згідно теорії конічних пластометрів, розробленої акад. П.А.Ребіндером, процес занурення конуса в продукт відбувається так. За початкову граничну умову прийнята точка дотику вершини конуса з поверхнею продукту. При цьому його рух під час випробувань має бути строго вертикальним. Кінетика занурення конуса характеризується кривою і подана на рис. М.1. У момент початку занурення конуса в продукт напруження нескінченно великі (площа дотику дорівнює нулю), його швидкість дорівнює нулю, а прискорення відповідає прискоренню сили тяжіння. Оскільки сила, діюча на конус, що визначається масою рухливих частин системи, за весь час занурення залишається постійною, а площа зіткнення конуса з продуктом збільшується, та напруження зсувув системі конус-продукт зменшується.

При зупинці конуса ( $dh/d\tau = 0$ ) занурення буде граничним і зовнішня сила урівноважується пластичною міцністю структури. Для цього випадку визначається граничне напруження зсуву (відношення сили до "змоченої" частини бічної поверхні конуса, рис. М.1, б) або граничний тиск (відношення сили до горизонтальної площі перерізу конуса, яка проходить по поверхні продукту, рис. М.1, в). Виштовхуючою силою продукту (Архімедовою силою) нехтують внаслідок її незначної величини. Якщо зняти повну криву течії продукту (рис. М.1, а), то можна визначити зміну ефективної в'язкості, але прилад для цих цілей зазвичай не використовують.

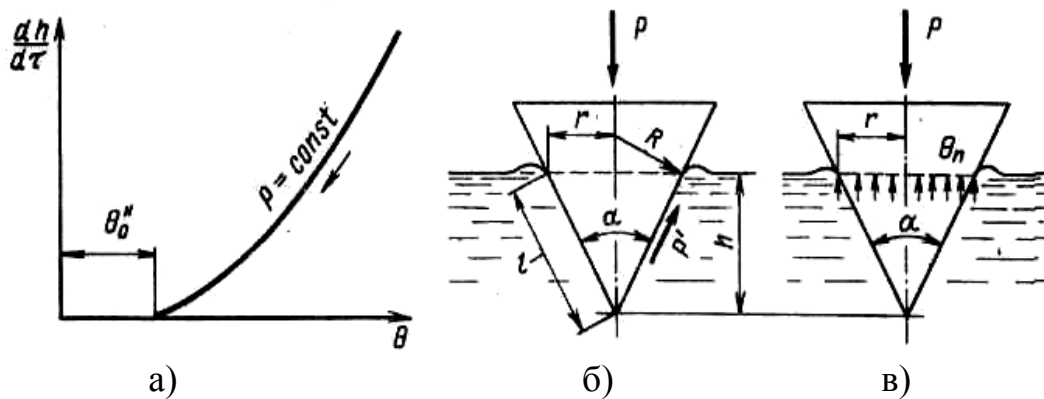


Рис. М.1 – Реограма і схеми для розрахунку: а – залежність швидкості руху конуса від напруження зсуву; б – схема для розрахунку граничного напруження зсуву; в – схема для розрахунку граничного тиску.

При визначенні граничного напруження зсуву передбачається, що продукт перетікає уздовж поверхні твірної конуса (рис. М.1, б). Умови рівноваги сил на поверхні конуса  $\ell$  отримуємо, проектуючи на твірну конуса рушійну силу  $P$  і прирівнюючи її силі опору  $P'$ :

$$P' = P \cos(\alpha/2). \quad (\text{М.1})$$

Граничне напруження зсуву  $\theta_0^H$ , Па, є відношення сили опору  $P'$  уздовж бічної поверхні конуса до площі  $F$  цієї поверхні:

$$\theta_0^H = P'/F = P \cos(\alpha/2) / \pi r l = K_\alpha m g / h^2, \quad (\text{М.2})$$

де  $K_\alpha$  - константа конуса,  $\alpha$  - кут при вершині конуса, град;  $m$  - маса конуса, кг;  $g$  - прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $h$  - глибина занурення конуса в продукт, м.

Константу конуса приймають за даними Н.Н.Аграната:

$\alpha$ , град	30	40	45	60	89,33	90
$K_\alpha$	0,958	0,530	0,417	0,214	0,0836	0,00683

Тривалість випробування складає 180 сек.

Значний внесок у розвиток конічних пластометров внесли учені В.Д. Косой, А.В. Горбатов та ін. (Росія). Вони розробили цілий ряд пластометрів типу ПП-1...ПП-5 для дослідження структурно-механічних властивостей в'язко-пластичних матеріалів, в яких використовується конічний індентор. Прилади забезпечують досить високу точність вимірів, компактні, надійні в роботі і прості в обслуговуванні, мають невелику масу.

Напівавтоматичний пенетрометр ПП-5 (рис. М.2) складається з корпусу 1, демпферного пристрою 2, мікровимикача 3, фіксатора 4, важеля 5, пальця 6, ручки підймання індентора 7, противаги 8, індентора (конуса) з штоком, місткості 10 для продукту, підйимального столика 11, блока управління 12, пластин 13 і 14, відповідно, для фіксації міри penetрації або максимальної глибини занурення індентора, рухливої збільшуючої лінзи 15, виміральної шкали 16, барабанів 17 і 18 з вимірвальними стрілками для відліку

максимальної величини занурення індентора і міри penetрації, магнітів 19 для фіксації стрілок після закінчення вимірювання, магніта 20 для фіксації моменту зіткнення індентора з продуктом і барабана 21 з пластиною і магнітами.

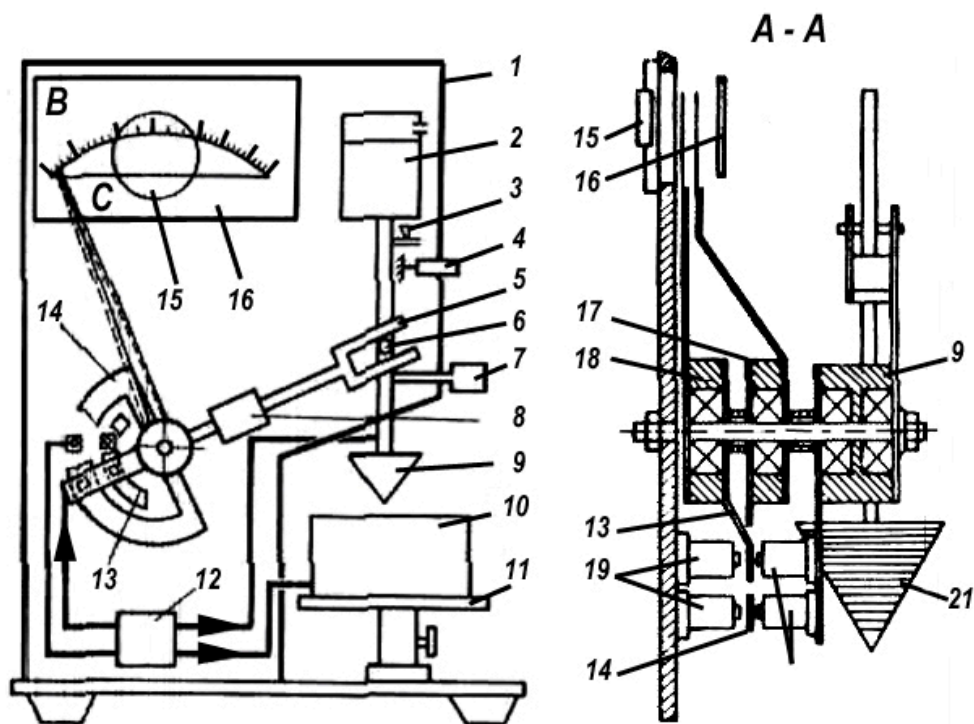


Рис. М.2 – Принципова схема пенетрометра ПП-5

Прилад працює таким чином. Досліджуваний продукт поміщають у місткість і встановлюють на столику під індентором. За допомогою реле задають час вимірювання ступеня penetрації в секундах (3-10 с) і граничного напруження зсуву у (2-5 хв). Вивільняють фіксатор і шток з індентором переміщається вниз під дією власної ваги. У момент зіткнення індентора з продуктом замикається електричний ланцюг управління електромагнітами, що притягують до себе пластини. Три барабани об'єднуються і, спільно обертаючись, переміщують стрілки по шкалі відліку. Після закінчення заданого (у секундах) часу перший електромагніт відпускає працюючу з ним у парі пластину, яка одночасно притягується до жорстко зафіксованого на передній панелі електромагніта. Таким чином, по шкалі знімають покази для визначення ступеня penetрації. Шток з індентором продовжує занурення і друга стрілка переміщається за шкалою до тих пір, поки не закінчиться заданий (у хвилинах) час. Після цього аналогічним чином нерухомо фіксується друга стрілка. Ці дані слугують для розрахунку граничного напруження зсуву.

Penetraція - це умовно прийнята величина, яка використовується як порівняльна оцінка міцності, ніжності, консистенції структури між двома, трьома і так далі матеріалами і вимірюється у відносних одиницях. За одиницю penetрації прийнятий 1 мм.

Враховуючи те, що вимірювання міри penetрації триває всього 3-10 сек, прилад ПП-5 можна використовувати для експрес-контролю і регулювання технологічних параметрів процесу.

Прилад додатково комплектується набором голчастих інденторів, що містять або одну голку, або декілька голок, запресованих на диску по колу (3-5 штук). У разі застосування голчастих інденторів, прилади можна використати для визначення консистенції готових продуктів (наприклад, ковбасних виробів) або для оцінки ніжності, міцності сировини (наприклад, м'яса).

В.Д. Косим та ін., на підставі проведених досліджень встановлено [4], що значення величин граничного напруження зсуву і ступеня penetрації добре корелюють між собою. На цій підставі запропонована залежність між цими показниками:

$$\theta_0^H = K_{II} / h_{II}^2, \quad (M.3)$$

де  $K_{II}$  - коефіцієнт пропорціональності між ступенем penetрації і граничним напруженням зсуву;  $h_{II}$  - величина penetрації.

Для визначення напружень зсуву ковбасних фаршів з успіхом може бути застосований також ротаційний віскозиметр «Реотест 2» [5].

Для отримання ковбасних та інших м'ясних виробів з заданою харчовою цінністю необхідно контролювати їх органічні властивості і основний хімічний склад: вологість, жирність, вміст білка, вміст сої, золи тощо.

В роботі якість зразків сировини, фаршу і готових виробів оцінювали за органолептичними, фізико-хімічними і реологічними показниками, які визначали за сучасними стандартними і загальноприйнятими у наукових дослідженнях методиками.

**Органолептичний аналіз** проводився спеціально відібраними для цього дегустаторами, здатними визначати відмінності в показниках якості продуктів – консистенції, соковитості, кольорі, смаку, ароматі та ін.

Дегустаторів відбирали з числа студентів магістратури, які проходили навчання на кафедрі м'ясних, рибних і морепродуктів НУБіП України за методикою, викладеною в [1].

При проведенні органолептичного аналізу м'яса і м'ясопродуктів застосовували систему бальної оцінки, що передбачає використання логічного і математичного аналізу. Вона дозволяє систематизувати різноманіття відчуттів і виразити їх в стрункій системі, де кожен показник якості визначений словесно. Продукцію оцінювали за дев'ятибальною шкалою. Робота завершувалась обробкою дегустаційних листків, шляхом визначення середнього арифметичного ( $a$ ) і стандартного відхилення ( $S$ ):

$$a = \sum x / n, \quad (M.4)$$

де  $a$  – середнє арифметичне;

$\sum x$  – сума оцінок в балах;

$n$  – кількість дегустаторів.

$$S = \pm \sqrt{\sum x^2 / n - a^2}, \quad (M.5)$$

де  $S$  – стандартне відхилення;

$\sum x^2$  – сума квадратів оцінок в балах

**Масова доля вологи в м'ясі і м'ясних продуктах** коливається в широких межах, наприклад, в свіжих сосисках її від 40 до 70%, а в жирному м'ясі – від 50 до 60%. Вода в харчових продуктах може знаходитися у вільній і зв'язаній формах.

Для визначення вмісту вологи у фарші ковбаси відбирали разові проби по 40-50 г з 5 різних місць кускового м'яса або фаршу. З 5 разових проб залишали загальну пробу масою 200-250 г, яку подрібнювали на м'ясорубці з діаметром отворів ґратки 1 мм і перемішували. Визначали вміст вологи у фарші, здійснюючи його висушування в сушильній шафі за температури  $103 \pm 2$  °С до постійної маси.

Масову долю вологи розраховували за різницею мас проб до і після висушування за формулою:

$$X = (m_1 - m_2) \times 100 / (m_1 - m), \quad (\text{M.6})$$

де  $X$  – вміст вологи, %;

$m_1$  – маса наважки з бюксою до висушування, г;

$m_2$  – маса наважки з бюксою після висушування, г;

$m$  – маса бюкси, г.

**Білки м'яса і м'ясопродуктів** прийнято поділяти за морфологічною ознакою клітин м'язових тканин тварин. Саркоплазматичні, міофібрилярні і білки строми забезпечують функціональність харчової системи в отриманні м'ясопродуктів, а група ядерних білків самостійного технологічного значення не має.

В аналітичній практиці відомо достатньо багато методів визначення білків. Найбільш розповсюджений метод К'ельдаля і його відомі модифікації, засновані на мінералізації проб і кількісному визначенні азоту.

Кількість білка в фарші визначали на приладі Kjeld-Foss-Automatic. Послідовність методики наступна: спалювання навіски зразка у кислоті, охолодження проби, розчинення її дистильованою водою, нейтралізація кислоти, відгонка аміаку і титрування кислотою його водного розчину. Отримані результати за допомогою мікропроцесора опрацьовувались і потім висвічувались на дисплеї у вигляді масової долі білка, вираженої у відсотках, або друкувалась на стрічці з індикацією номеру проби. Масову долю білка визначали також за ГОСТ 25011, ГОСТ 50453 методом К'ельдаля по кількості білкового азоту в розчині з перерахунком азоту на білок.

Кількість міофібрилярних білків визначали шляхом екстрагування їх з наважки фаршу 5 г за допомогою буферного розчину з іонною силою 0,59 і рН 8,25 по різності між загальним вмістом білків у розчинах високої іонної сили і кількістю саркоплазматичного білка, витягнутих розчином низької іонної сили [9].

**Вміст жиру** визначали методом Сокслета (ДСТУ 4436:2005), заснованому на багатократній екстракції жиру органічним розчинником з підсушеної наважки продукту з наступним видаленням розчиннику і зважуванням. В якості розчинника використовували петролейний або сірчаний ефір, а також дихлоретан.

Кількість жиру визначали за формулою:

$$X = (m_1 - m_2) \times 100 / m_0, \quad (\text{M.7})$$

де  $X$  – вміст жиру, %;

$m_1$  – маса гільзи з матеріалом до екстрагування, г;

$m_2$  – маса гільзи з матеріалом після екстрагування, г;

$m_0$  – маса наважки до висушування.

**Вміст хлористого натрію** здійснювали аргентометричним титруванням за методом Мора (ГОСТ 9975). Метод Мора заснований на титруванні іонів хлору в нейтральному середовищі іонами срібла в присутності хромату калію і регламентований ГОСТ 51444 та ГОСТ 51480.

Масову долю хлоридів  $X$  (%) в перерахунку на NaCl визначали за формулою:

$$X = 0,0029 \times k \times a \times 100 \times 100 / b \times c, \quad (\text{M.8})$$

де 0,0029 – кількість хлористого натрію еквівалентна титру розчину  $\text{AgNO}_3$  (0,1 моль/л);

$k$  – поправочний коефіцієнт;

$a$  – об'єм розчину  $\text{AgNO}_3$ , мл;

$b$  – об'єм витяжки, мл;

$c$  – маса наважки продукту, г.

**Масову частку золи** визначали способом сухого озолення з використанням такого обладнання, реагентів і матеріалів: тигля фарфорового, печі муфельної, ексикатора, вагів аналітичних, сушильної шафи, колби К'ельдаля, перекису водню, азотної кислоти, сірчаної кислоти, води дистильованої, плитки електричної.

Наважку продукту, що аналізується, масою 5 г розміщували в прожареному до постійної маси тиглі (прожарювання проводили за температури 500 °С), підсушували в сушильній шафі за температури 100-105 °С і поміщали у муфельну піч, температура в якій була 500-550 °С, для повного озолення проби (1 – 1,5 години).

Масову долю золи  $X$  (в %) визначали за формулою:

$$X = 100 \times (t - t_1) / m, \quad (\text{M.9})$$

де  $t$  – маса тигля з золою (після озолення), г;

$t_1$  – маса пустого тигля, г;

$m$  – маса наважки продукту, г.

**Кислотне число м'яса і м'ясопродуктів та вологозв'язувальну здатність** у більшості випадків визначали, відповідно, потенціометричним методом і методом Грау-Хамма, використавши таке обладнання, реактиви і матеріали: стакан хімічний; ваги лабораторні, торсіонні; фільтр паперовий (складчастий); ніж (м'ясорубка); палички скляні (плексигласові).

Для визначення рН м'яса готували водяну витяжку у співвідношенні 1:10, для чого наважку зразка м'яса масою 10г, зважену до другого знаку, ретельно подрібнювали (ножем або на м'ясорубці), поміщали в хімічний стакан місткістю 250 мл. Туди ж наливали бідистильовану (дистильовану) воду у кількості 100 мл і настоювали протягом 30-40 хвилин, періодично помішуючи



скляною паличкою. Отриманий екстракт фільтрували через паперовий фільтр і використовували для визначення рН на рН-метрі.

**Уявлення про стан вологи в м'ясі і м'ясних продуктах** отримували відділенням вільної вологи методом пресування або центрифугування. **Метод пресування** ґрунтується на виділенні води досліджуваним зразком при легкому пресуванні, сорбції виділеної води фільтрувальним папером і визначенні кількості відділеної вологи за розміром площі плями, що вона залишає на фільтрувальному папері у порівнянні з площею плями, утвореної м'ясом. Експериментально встановлено, що 1 см<sup>2</sup> площі вологої плями фільтра відповідає 8,4 мг вологи.

Масову долю зв'язаної вологи у зразку визначали за формулами:

$$X = (M - 8,4 \times S) \times 100 / m, \quad (\text{M.10})$$

$$X = (M - 8,4 \times S) \times 100 / M, \quad (\text{M.11})$$

де  $X_1$  – масова доля зв'язаної вологи в м'ясному фарші, % до маси м'яса;  
 $X_2$  – масова доля зв'язаної вологи в м'ясному фарші, % у загальній волозі;  
 $M$  – загальна маса вологи в наважці, мг;  
 $S$  – площа вологої плями мм<sup>2</sup>;  
 $m$  – маса наважки зразка, мг.

**Ступінь подрібнення м'яса** визначали з використанням методу седиментації. З цією метою 25 г подрібненого м'яса поміщали в колбу місткістю 500 мл і заливали водою за температури 40 °С і об'ємом 200 мл. Колбу встановлювали в пристрій для струшування і перемішували вміст протягом 30 хвилин. Після струшування суміш переливали в скляні мірні градуйовані циліндри на 250 мл и залишали при кімнатній температурі на 2 години. Суміш ділиться на 4 шари: шар великих, середніх, дрібних частинок і шар води.

По об'єму осілих частин в поділках мірного циліндру у відсотковому відношенні до загального об'єму осаду визначали відносну величину кількості дрібних, середніх і великих частинок [7, 8].

**Вихід ковбасних виробів** визначали за масою вихідної сировини і готового продукту в лабораторних і виробничих умовах.

В лабораторних умовах вихід продукту визначався лише при зміні способів подрібнення при збереженні постійними всіх інших параметрів: кількості доданої солі і тривалості витримки в посолі, виду сировини, кількості доданої води, режиму термічної обробки та ін.

Вихід готового продукту визначали шляхом відношення маси готового продукту до вихідної маси сировини.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Архіпов В. В., Іванникова Т. В., Архіпова А. В. Ресторанна справа: Ассортимент, технологія і управління якістю продукції в сучасному ресторані; Навчальний посібник. — К.: Фірма «ІЙКОС», Центр навчальної літератури, 2007. — 382 с.
2. Кузнецов О.А. Реология пищевых масс: [Учебное пособие] /О.А.Кузнецов, Е.В.Волошин, Р.Ф.Сагитов - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. - 106 с.
3. Косой В.Д. Совершенствование процесса производства вареных колбас. [Текст] / Косой В.Д. – М.: Легкая и пищевая пром-ть, 1993. – 272 с.
4. Косой В.Д. Определение предельного напряжения сдвига бесшпикового колбасного фарша для оценки качества готовых изделий // Мясн. индустр. СССР. 1998. -№4. - С.26-32.
5. А.С. № 3800992. Устройство для определения реологических свойств вязкопластичных сред. Оpubл. В БИ № 21, 1993.
7. Алфрей Т. Механические свойства высокополимеров Пер. с англ. / Под ред. М. В. Волькенштейна. М.: - 1982. 331 с.
8. Зуев В.В., Успенская М.В., Олехнович А.О. Физика и химия полимеров. [Учеб. пособие] / В.В.Зуев, М.В.Успенская, А.О.Олехнович. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. – 45 с.
9. Забалуева Ю.Ю. Методы исследования мяса и мясных продуктов [Лабораторный практикум] / Ю.Ю. Забалуева, С.Н. Павлова, С.Ю. Лескова. – Улан-Удэ, Вос. сиб гос. техн. ун-тет., 2005. – 78 с.

**Реологічні характеристики дисперсних середовищ фаршів  
для сирокочених ковбас за різних режимів кутерування**

Таблиця Н.1 – Реологічні характеристики дисперсного середовища фаршу для різновидів сирокочених ковбас з різним ступенем подрібнення на кутері середньої продуктивності (250 л) при  $n_H=1325$  та  $n_T=9,1$  хв<sup>-1</sup>

№ п/п	Вид ковбаси та її хімічний склад	$\tau_k$ , с	$h \cdot 10^4$ , м	$\theta_o$ , Па	$\theta_{op}$ , Па	$\Delta$ , %	$h_D \cdot 10^4$ , м	$\theta_{od}$ , Па	$\theta_{od}^p$ , Па	$\Delta$ , %	Оптим. хар-ки	$\tau_k / \tau_k^{on}$	$\theta_o / \theta_o^{on}$	$\tau_k / \tau_{k0}^{on}$	$\theta_o / \theta_{o0}^{on}$
1.	Фантазія	0	221	1638	1655	-1,0	299	1980	2025	2,3		0	2,10	0	2,08
2.		100	243	1355	1340	1,1	326	1665	1638	1,6	$\theta_o^{onm}=780$	0,20	1,74	0,2	1,75
3.	Б=19,5%	200	272	1080	1095	-1,4	365	1329	1337	0,6	$\theta_{od}^{onm}=950$	0,40	1,38	0,4	1,40
4.	$\varphi=1,4\%$	300	298	900	920	-2,2	400	1107	1122	1,4	$\tau_k^{onm}=500$	0,60	1,15	0,6	1,17
5.	W=75,6%	400	314	811	815	0,5	421	999	993	0,6	$\tau_{k0}^{onm}=500$	0,80	1,04	0,8	1,05
6.	U=3,1	500	320	780	780	0	430	957	950	0,7		1,00	1,00	1,0	1,01
7.	$Z_n=3,5\%$	600	314	811	815	0,5	421	999	993	0,6		1,20	1,04	1,2	1,05
8.	$K_x=4,5$	700	301	883	920	4,2	404	1084	1122	3,5		1,40	1,13	1,4	1,14
1.	Московська	0	220	1650	1655	0,3	299	1980	2025	2,3		0	2,11	0	2,08
2.		100	242	1360	1340	1,5	325	1676	1638	2,3	$\theta_o^{onm}=780$	0,20	1,74	0,2	1,76
3.	Б=19%	200	271	1089	1095	0,6	365	1329	1337	0,6	$\theta_{od}^{onm}=950$	0,40	1,40	0,4	1,40
4.	$\varphi=1,3\%$	300	296	913	920	0,8	397	1123	1122	0,1	$\tau_k^{onm}=500$	0,60	1,17	0,6	1,18
5.	W=76%	400	314	811	815	0,5	420	1003	993	1,0	$\tau_{k0}^{onm}=500$	0,80	1,04	0,8	1,06
6.	U=3,17	500	320	780	780	0	430	957	950	0,7		1,00	1,00	1,0	1,01
7.	$Z_n=3,7\%$	600	314	811	815	0,5	421	999	993	0,6		1,20	1,04	1,2	1,05
8.	$K_x=4,6$	700	299	895	920	2,8	403	1090	1122	3,0		1,40	1,15	1,4	1,15
1.	Любительська	0	213	1763	1810	2,7	289	2119	2153	1,6		0	2,07	0	2,06
2.	Б=18,5%	100	239	1400	1390	0,7	324	1686	1700	0,8	$\theta_o^{onm}=850$	0,25	1,65	0,23	1,64

продовження табл. Н.1

№ п/п	Вид ковбаси та її хімічний склад	$\tau_k$ , с	$h \cdot 10^4$ , м	$\theta_o$ , Па	$\theta_{op}$ , Па	$\Delta$ , %	$h_{дл} \cdot 10^4$ , м	$\theta_{од}$ , Па	$\theta_{од}^p$ , Па	$\Delta$ , %	Оптим. хар-ки	$\tau_k / \tau_k^{on}$	$\theta_o / \theta_o^{on}$	$\tau_k / \tau_{к0}^{on}$	$\theta_o / \theta_{од}^{on}$
3.	$\varphi=2,6\%$	200	265	1140	1090	4,4	360	1366	1364	0,2	$\theta_{од}^{onm}=1030$	0,50	1,34	0,45	1,33
4.	$W=74,8\%$	300	292	938	910	3,0	402	1095	1144	4,7	$\tau_k^{onm}=400$	0,75	1,10	0,68	1,06
5.	$U=2,97$	400	307	849	850	0	414	1033	1039	0,6	$\tau_{к0}^{onm}=440$	1,00	1,00	0,91	1,00
6.	$З_{л}=3,9\%$	500	302	877	910	3,8	410	1052	1051	0,1		1,25	1,03	1,14	1,02
7.	$K_x=2,42$	600	279	1028	1090	6,0	379	1232	117	4,4		1,50	1,21	1,36	1,20
1.	Радянська	0	198	2040	2042	0,1	268	2460	2490	1,2	$\theta_o^{onm}=990$	0	2,06	0	2,07
2.	$B=18\%$	100	224	1594	1544	3,2	304	1913	1883	1,6	$\theta_{од}^{onm}=1190$	0,27	1,61	0,27	1,61
3.	$\varphi=6,1\%$	200	253	1250	1205	3,6	344	1496	1465	2,1	$\tau_k^{onm}=365$	0,55	1,26	0,54	1,26
4.	$W=72,2\%$	300	279	1028	1023	0,5	379	1233	1236	0,3	$\tau_{к0}^{onm}=370$	0,82	1,04	0,81	1,04
5.	$U=2,6$	400	284	992	1000	0,8	386	1188	1199	0,1		1,10	1,00	1,08	1,00
6.	$З_{л}=3,7\%$	500	270	1100	1134	3,1	366	1320	1350	2,3		1,37	1,11	1,35	1,11
7.	$K_x=1,13$	600	241	1377	1426	3,6	327	1725	1692	1,9		1,64	1,39	1,62	1,45
1.	Свиняча	0	189	2240	2270	1,4	254	2743	2724	0,7		0	2,09	0	2,03
2.	$B=17,3\%$	100	214	1747	1682	3,7	285	2179	2067	0,6	$\theta_o^{onm}=1070$	0,29	1,63	0,28	1,61
3.	$\varphi=9,3\%$	200	243	1355	1290	4,8	323	1697	1621	4,5	$\theta_{од}^{onm}=1350$	0,57	1,27	0,56	1,26
4.	$W=59,8\%$	300	270	1100	1095	0,5	356	1396	1388	0,6	$\tau_k^{onm}=350$	0,86	1,03	0,83	1,03
5.	$U=2,31$	400	272	1080	1095	1,4	362	1350	1367	1,3	$\tau_{к0}^{onm}=360$	1,14	1,01	1,11	1,00
6.	$З_{л}=3,6\%$	500	258	1202	1290	7,3	343	1504	1558	3,6		1,43	1,12	1,39	1,11
7.	$K_x=0,81$	600	220	1653	1682	1,8	293	2062	1960	5,0		1,71	1,54	1,67	1,53

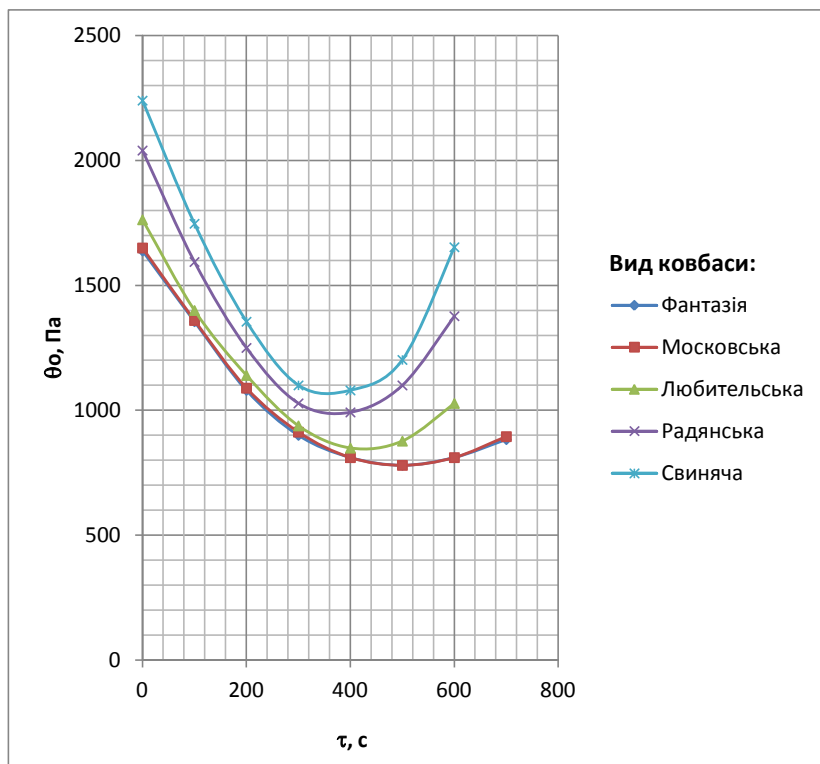


Рис. Н.1 – Залежність статичного ГНЗ від тривалості подрібнення на виробничому кутері з місткістю чаші 250 л дисперсного середовища фаршу сирокочених ковбас при  $n_H = 1325$  та  $n_T = 9,1 \text{ хв}^{-1}$

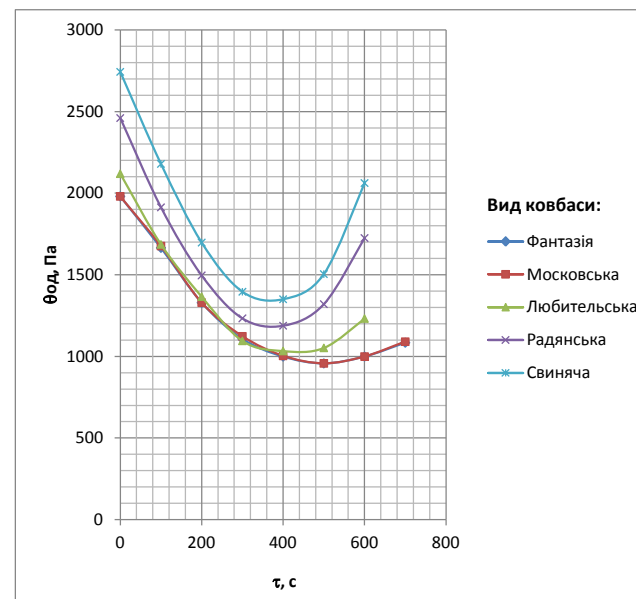


Рис. Н.2 – Залежність динамічного ГНЗ від тривалості подрібнення на виробничому кутері з місткістю чаші 250 л дисперсійного середовища фаршу сирокочених ковбас  $n_H = 1325$  та  $n_T = 9,1 \text{ хв}^{-1}$

Таблиця Н.2 – Реологічні характеристики дисперсного середовища фаршу для різновидів сировкопчених ковбас з різним ступенем подрібнення на кутері великої продуктивності (500 л) при  $n_H=1500$  та  $n_T=16$  хв<sup>-1</sup>

№ п/п	Вид ковбаси та її хімічний склад	$\tau_k, \text{с}$	$h \cdot 10^4, \text{м}$	$\theta_o, \text{Па}$	$\theta_{op}, \text{Па}$	$\Delta, \%$	$h_d \cdot 10^4, \text{м}$	$\theta_{od}, \text{Па}$	$\theta_{od}^p, \text{Па}$	$\Delta, \%$	Оптим. хар-ки	$\tau_k / \tau_k^{on}$	$\theta_o / \theta_o^{on}$	$\tau_k / \tau_{kd}^{on}$	$\theta_o / \theta_{od}^{on}$	Залежності для визначення ГНЗ
1.	Фантазія	0	222	1623	1620	0,2	303	1928	1950	1,2		0	2,077	0	2,073	
2.		90	241	1377	1367	0,7	327	1655	1639	1,0	$\theta_o^{onm} = 780$	0,167	1,765	0,167	1,780	$\theta_o = 0,0029 \cdot (\tau_k - 540)^2 + 780$
3.	Б=19,5%	180	264	1148	1155	0,6	358	1381	1384	0,2	$\theta_{od}^{onm} = 930$	0,333	1,472	0,333	1,485	$\theta_{od} = 0,0035 \cdot (\tau_k - 540)^2 + 930$
4.	$\varphi=1,0\%$	270	286	978	991	1,3	386	1188	1185	0,3	$\tau_k^{onm} = 540$	0,500	1,254	0,500	1,277	
5.	W=75,8%	360	300	890	874	1,8	407	1068	1045	2,2	$\tau_{kd}^{onm} = 540$	0,667	1,141	0,667	1,148	
6.	U=3,13	450	312	822	804	2,2	424	985	956	3,0		0,833	1,054	0,833	1,059	
7.	$Z_H=3,7\%$	540	320	781	780	0	436	931	922	1,0		1,000	1,000	1,000	1,000	
8.	$K_x=6,23$	630	316	800	803	0,4	434	941	958	1,8		1,167	1,026	1,167	1,012	
9.		720	302	877	874	0,4	416	1023	1043	2,0		1,333	1,124	1,333	1,100	
1.	Московська	0	226	1566	1593	1,7	307	1878	1920	2,3		0	2,061	0	2,064	
2.		90	244	1344	1372	2,1	331	1616	1630	0,9	$\theta_o^{onm} = 760$	0,143	1,768	0,155	1,776	$\theta_o = 0,0021 \cdot (\tau_k - 630)^2 + 760$
3.	Б=19,2%	180	267	1122	1185	5,6	362	1350	1390	3,0	$\theta_{od}^{onm} = 910$	0,286	1,476	0,310	1,484	$\theta_{od} = 0,003 \cdot (\tau_k - 580)^2 + 910$
4.	$\varphi=0,8\%$	270	290	950	1031	8,5	389	1170	1198	2,4	$\tau_k^{onm} = 630$	0,429	1,250	0,466	1,286	
5.	W=76,2%	360	305	860	913	6,2	412	1043	1055	1,2	$\tau_{kd}^{onm} = 580$	0,571	1,132	0,621	1,146	
6.	U=3,2	450	316	801	828	3,4	432	948	964	2,4		0,714	1,054	0,776	1,042	
7.	$Z_H=3,8\%$	540	323	767	776	1,2	439	918	915	0,3		0,857	1,009	0,931	1,009	
8.	$K_x=7,5$	630	325	757	760	0,4	437	927	918	1,0		1,000	0,996	1,086	1,019	
9.		720	318	791	777	1,8	427	971	969	0,2		1,143	1,041	1,241	1,067	



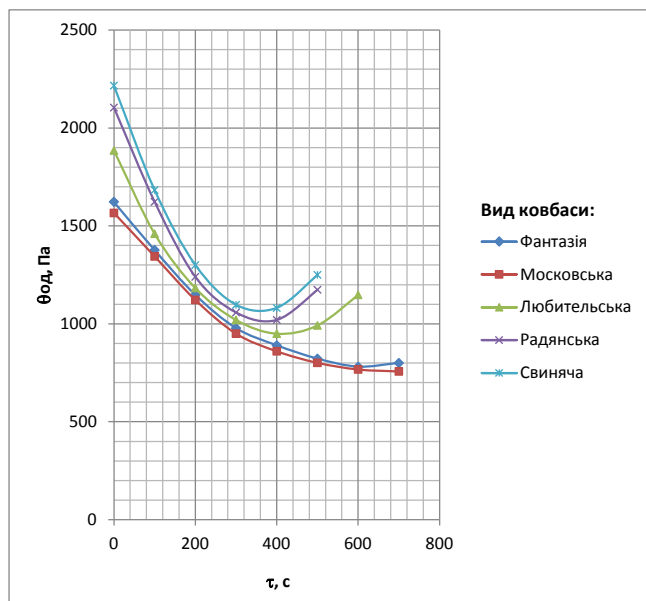


Рис. Н.9 – Кінетика зміни статистичного ГНЗ від тривалості подрібнення на виробничому кутері з місткістю чаші 500 л дисперсного середовища фаршу сирокочених ковбас при  $n_n = 1500$  та  $n_r = 16 \text{ хв}^{-1}$

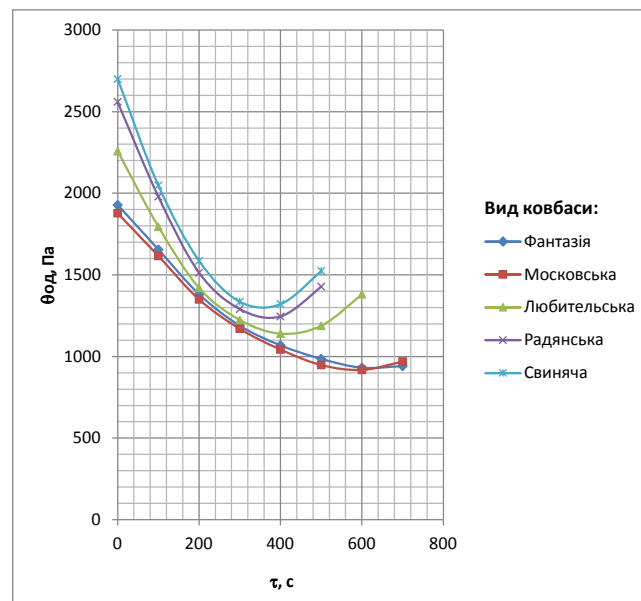


Рис. Е.10 – Кінетика зміни динамічного ГНЗ від тривалості подрібнення на виробничому кутері з місткістю чаші 500 л дисперсного середовища фаршу сирокочених ковбас при  $n_n = 1500$  та  $n_r = 16 \text{ хв}^{-1}$



Таблиця Н.3 – Реологічні характеристики дисперсного середовища фаршу для різновидів сирокочених ковбас з різним ступенем подрібнення на кутері великої продуктивності (500 л) при  $n_H = 1500$  та  $n_T = 9,9$  хв<sup>-1</sup>

№ п/п	Вид ковбаси та її хімічний склад	$\tau_{\kappa}$ , с	$h \cdot 10^4$ , м	$\theta_o$ , Па	$\theta_{op}$ , Па	$\Delta$ , %	$h_{\bar{A}} \cdot 10^4$ , м	$\theta_{od}$ , Па	$\theta_{od}^p$ , Па	$\Delta$ , %	Оптим. хар-ки	$\tau_{\kappa} / \tau_{\kappa}^{on}$	$\theta_o / \theta_o^{on}$	$\tau_{\kappa} / \tau_{\kappa od}^{on}$	$\theta_o / \theta_{od}^{on}$
1.	Фантазія	0	218	1683	1687	0,3	296	2020	2011	0,5		0	2,13	0	2,13
2.	Б=19,3%	60	246	1322	1332	0,8	334	1587	1578	0,6	$\theta_{od}^{onm} = 790$	0,222	1,67	0,231	1,67
3.	$\varphi = 1,8\%$	120	277	1043	1067	2,3	377	1245	1258	1,1	$\tau_{\kappa}^{onm} = 950$	0,444	1,32	0,462	1,31
4.	W=75,4%	180	305	860	890	3,5	414	1033	1050	1,6	$\tau_{\kappa}^{onm} = 270$	0,667	1,09	0,692	1,09
5.	U=3,06	240	316	801	801	0	429	962	956	0,6	$\tau_{\kappa od}^{onm} = 260$	0,889	1,01	0,923	1,01
6.	Зл=3,5%	300	312	822	801	2,6	424	985	975	1,0		1,111	1,04	1,154	1,04
7.	Кх=3,5	360	293	932	890	4,5	398	1117	1107	0,9		1,333	1,18	1,385	1,13
1.	Московська	0	217	1700	1697	0,2	294	2048	2033	0,7		0	2,1	0	2,07
2.	Б=19,4%	60	245	1333	1322	0,8	334	1586	1576	0,6	$\theta_{od}^{onm} = 810$	0,24	1,65	0,25	1,60
3.	$\varphi = 2,0\%$	120	276	1050	1050	0	372	1279	1250	2,3	$\tau_{\kappa}^{onm} = 990$	0,48	1,30	0,50	1Д9
4.	W=75,2%	180	303	871	880	1,0	408	1063	1055	0,8	$\tau_{\kappa}^{onm} = 250$	0,72	1,08	0,75	1,07
5.	U=3,03	240	314	811	811	0	423	989	989	0,0	$\tau_{\kappa od}^{onm} = 240$	0,96	1,00	1,00	1,00
6.	Зл=3,4%	300	307	849	845	0,5	413	1038	1055	1,6		1,20	1,05	1,25	1,05
7.	Кх=3,2	360	287	971	982	1,1	387	1182	1250	2,7		1,44	1,20	1,50	1,19
1.	Любительська	0	205	1904	1913	0,4	277	2307	2309	0,1		0	2,05	0	2,02
2.	Б=18,4%	60	235	1449	1432	1,2	316	1773	1736	2,1	$\theta_o^{onm} = 930$	0,286	1,56	0,286	1,56
3.	$\varphi = 4,6\%$	120	268	1114	1110	0,4	362	1351	1354	2Д	$\theta_{od}^{onm} = 1140$	0,571	1,20	0,571	1,19



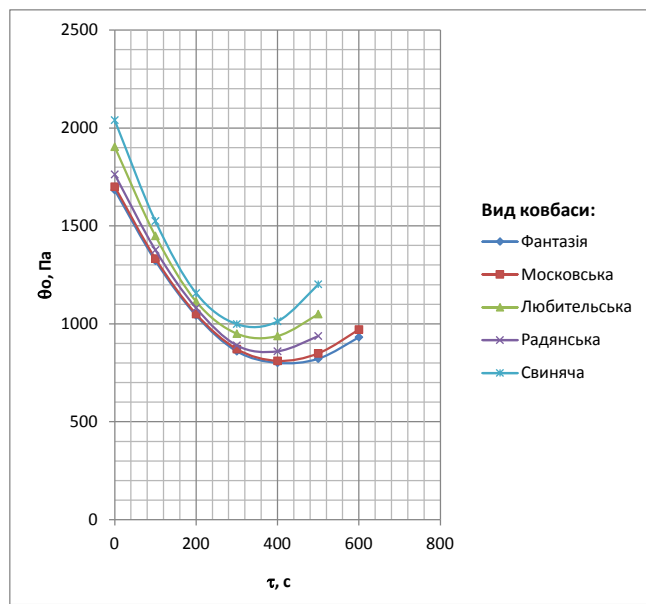


Рис. Н.5 – Кінетика зміни статичного ГНЗ від тривалості подрібнення на виробничому кутері з місткістю чаші 500 л дисперсного середовища фаршу сирокочених ковбас при  $n_H = 1500$  та  $n_T = 9,9 \text{ хВ}^{-1}$

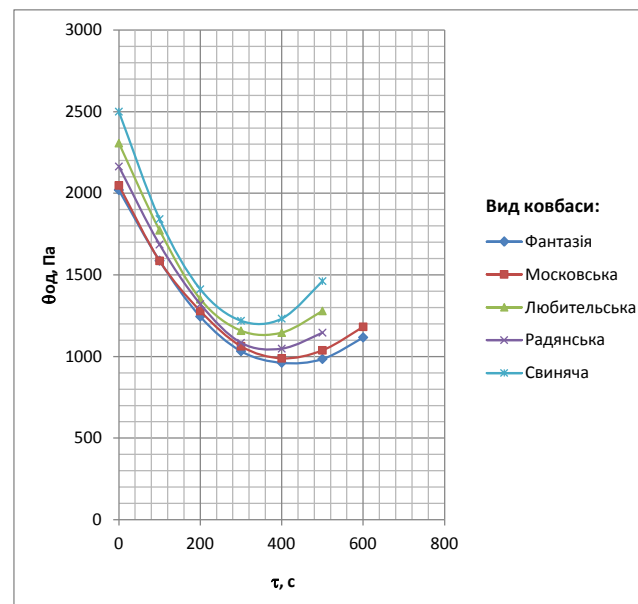


Рис. Н.6 – Кінетика зміни динамічного ГНЗ від тривалості подрібнення на виробничому кутері з місткістю чаші 250 л дисперсного середовища фаршу сирокочених ковбас при  $n_H = 1500$  та  $n_T = 9,9 \text{ хВ}^{-1}$

Таблиця Н.4 – Реологічні характеристики дисперсного середовища фаршу для різновидів сирокоччених ковбас з різним ступенем подрібнення на кутері великої продуктивності (500 л) при  $n_H=2500$  та  $n_T=24$  хв<sup>-1</sup>

№ п/п	Вид ковбаси та її хімічний склад	$\tau_k$ , с	$h \cdot 10^4$ , м	$\theta_o$ , Па	$\theta_{op}$ , Па	$\Delta$ , %	$h_D \cdot 10^4$ , м	$\theta_{od}$ , Па	$\theta_{od}^p$ , Па	$\Delta$ , %	Оптим. хар-ки	$\tau_k / \tau_k^{on}$	$\theta_o / \theta_o^{on}$	$\tau_k / \tau_{кд}^{on}$	$\theta_o / \theta_{od}^{on}$
1.	Фантазія	0	218	1683	1669	0,8	299	1980	2014	-1,7		0	2,12	0	2,06
2.	Б=19,1%	30	244	1344	1355	-0,8	329	1635	1611	1,5	$\theta_{od}^{onm}=796$	0,2	1,69	0,21	1,70
3.	$\varphi=1,5\%$	60	273	1073	1110	-3,4	368	1307	1304	0,3	$\tau_k^{onm}=960$	0,4	1,35	0,43	1,36
4.	W=75,8%	90	298	901	936	-3,8	402	1095	1094	0,1	$\tau_k^{onm}=150$	0,6	1,13	0,64	1,14
5.	U=3,13	120	312	822	831	-1,1	421	999	981	1,8	$\tau_{кд}^{onm}=140$	0,8	1,03	0,86	1,04
6.	$Z_{II}=3,6\%$	150	317	796	796	0	428	966	965	0,1		1,0	1,00	1,07	1,01
7.	$K_x=4,07$	180	307	849	831	2,1	414	1033	1046	1,3		1,2	1,07	1,29	1,08
1.	Московська	0	221	1638	1630	0,4	300	1959	1990	-1,6		0	2,08	0	2,06
2.	Б=19,3%	30	248	1300	1326	-2,0	335	1577	1615	-2,4	$\theta_{od}^{onm}=786$	0,2	1,65	0,2	1,66
3.	$\varphi=75,9\%$	60	276	1050	1090	-3,8	372	1279	1324	-3,5	$\tau_k^{onm}=950$	0,4	1,34	0,4	1,35
4.	W=3,15%	90	302	877	921	-5,01	408	1063	1116	-5,0	$\tau_k^{onm}=150$	0,6	1,12	0,6	1,12
5.	U=3,03	120	314	811	820	-1,1	424	985	992	-1,6	$\tau_{кд}^{onm}=150$	0,8	1,03	0,8	1,04
6.	$Z_{II}=3,5\%$	150	319	786	786	0	431	953	953	-2,4		1,0	1,00	1,0	1,00
7.	$K_x=4,71$	180	314	811	820	-1,1	424	985	992	-3,5		1,2	1,03	1,3	1,04
1.	Любительська	0	211	1797	1800	-0,1	287	2149	2182	-1,5		0	2,09	0	2,09
2.	Б=18,8%	30	239	1400	1389	0,7	327	1655	1678	-1,4	$\theta_o^{onm}=860$	0,25	1,63	0,35	1,61
3.	$\varphi=3,0\%$	60	268	1119	1095	2,1	366	1321	1318	0,2	$\theta_{od}^{onm}=1030$	0,50	1,30	0,50	1,28

продовження табл. Н.4

4.	W=74,2%	90	292	938	919	2,02	397	1123	1102	1,9	$\tau_{\kappa}^{onm}=120$	0,75	1,09	0,75	1,09
5.	U=2,88	120	305	860	860	0	416	1023	1030	-0,7	$\tau_{\kappa\delta}^{onm}=120$	1,00	1,00	1,00	0,99
6.	Зл=4,0%	150	296	913	919	-0,6	408	1063	1102	-3,7		1,25	1,06	1,25	1,03
7.	Кх=2,18	180	276	1050	1095	-4,2	399	1112	1318	-18,7		1,50	1,22	1,50	1,08
1.	Радянська	0	203	1740	1746	-0,3	291	2090	2139	-2,3	$\theta_o^{onm}=830$	0	2,1	0	2,03
2.	Б=19,1%	30	243	1355	1359	-0,3	326	1665	1654	-0,7	$\theta_{od}^{onm}=1030$	0,24	1,63	035	1,62
3.	φ=2,5%	60	272	1081	1078	0,2	365	1329	1307	1,7	$\tau_{\kappa}^{onm}=125$	0,48	1,30	0,50	139
4.	W=74,1%	90	295	919	902	1,8	396	1129	1099	2,7	$\tau_{\kappa\delta}^{onm}=120$	0,72	1,11	0,75	1,10
5.	U=2,86	120	309	838	832	0,7	414	1033	1030	03		0,96	1,01	1,00	1,00
6.	Зл=3,9%	150	303	871	867	0,4	406	1074	1099	-2,3		1,20	1,05	135	1,04
7.	Кх=2,3	180	286	978	1007	-2,9	400	1106	1307	-18,0		1,44	1,18	1,50	1,07
1.	Свиняча	0	199	2020	2010	0,5	270	2428	2410	0,7		0	2,10	0	2,02
2.	Б=17,9%	30	230	1510	1516	-0,4	307	1878	1840	2,0	$\theta_o^{onm}=960$	0,27	1,57	037	1,56
3.	φ=5,9%	60	259	1193	1177	1,3	346	1478	1450	1,9	$\theta_{od}^{onm}=1200$	0,55	134	0,55	1,23
4.	W=72,5%	90	283	999	995	0,4	378	1239	1240	0,1	$\tau_{\kappa}^{onm}=110$	0,82	1,04	0,82	1,03
5.	U=2,64	120	287	971	969	0,2	383	1207	1210	-0,3	$\tau_{\kappa\delta}^{onm}=110$	1,09	1,01	1,09	1,01
6.	Зл=3,7%	150	270	1097	1099	-0,2	361	1358	1360	0,2		1,36	1,14	1,36	1,13
7.	Кх=1,15	180	246	1322	1385	-4,7	344	1496	1690	-13,0		1,64	138	1,64	1,25

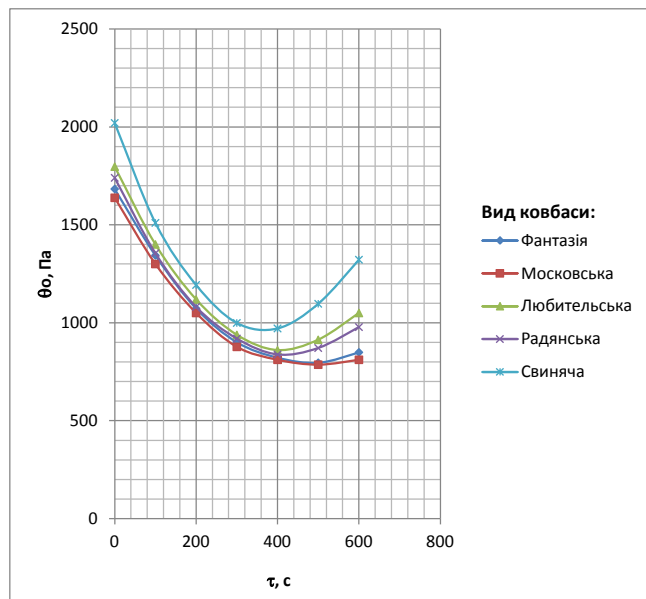


Рис. Н.7 – Кінетика зміни статичного ГНЗ від тривалості подрібнення на виробничому кутері з місткістю чаші 500 л дисперсного середовища фаршу сиркопчених ковбас при  $n_H = 2500$  та  $n_T = 24 \text{ хв}^{-1}$

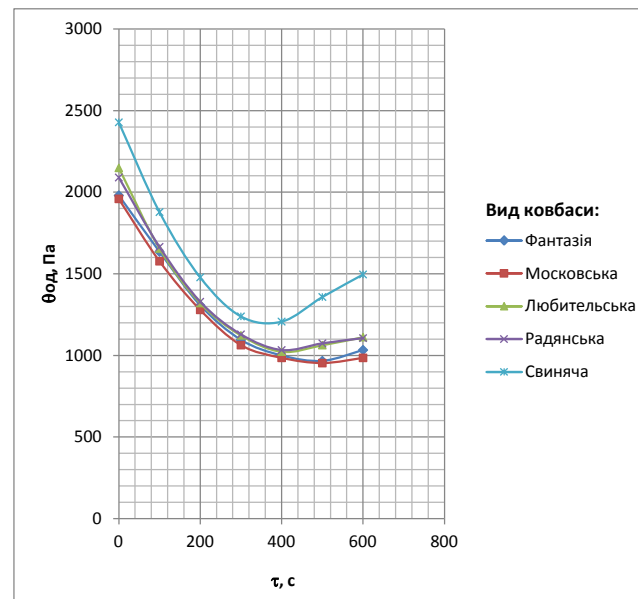


Рис. Е.14 – Кінетика зміни динамічного ГНЗ від тривалості подрібнення на виробничому кутері з місткістю чаші 250 л дисперсного середовища фаршу сиркопчених ковбас при  $n_H = 2500$  та  $n_T = 24 \text{ хв}^{-1}$

Таблиця Н.5 – Реологічні характеристики дисперсійного середовища фаршу для різновидів сирокочених ковбас з різним ступенем подрібнення на кутері великої продуктивності (500 л) при  $n_H=2500$  та  $n_T=16$  хв<sup>-1</sup>

№ п/п	Вид ковбаси та її хімічний склад	$\tau_k$ , с	$h \cdot 10^4$ , м	$\theta_o$ , Па	$\theta_{op}$ , Па	$\Delta$ , %	$h_A \cdot 10^4$ , м	$\theta_{od}$ , Па	$\theta_{od}^p$ , Па	$\Delta$ , %	Оптим. хар-ки	$\tau_k / \tau_k^{on}$	$\theta_o / \theta_o^{on}$	$\tau_k / \tau_{kd}^{on}$	$\theta_o / \theta_{od}^{on}$
1.	Фантазія	0	225	1580	1583	-0,2	305	1903	1924	-1,1		0	2,1	0	2,09
2.	Б=19,1%	30	259	1193	1264	-5,9	348	1461	1510	-3,4	$\theta_{od}^{onm}=750$	0,21	1,59	0,23	1,61
3.	$\varphi=1,5\%$	60	298	901	1022	-13,4	402	1095	1204	-10,0	$\tau_k^{onm}=910$	0,43	1,20	0,46	1,20
4.	W=75,8%	90	318	791	856	-8,2	428	966	1006	-4,1	$\tau_k^{onm}=140$	0,64	1,05	0,69	1,06
5.	U=3,13	120	324	762	767	-0,7	437	927	916	1,2	$\tau_{kd}^{onm}=130$	0,86	1,02	0,92	1,02
6.	$Z_L=3,6\%$	150	324	762	754	1,1	437	927	934	-0,8		1,07	1,02	1,15	1,02
7.	$K_X=4,07$	180	312	822	818	0,5	421	999	1060	-6,1		1,29	1,10	1,38	1,10
1.	Московська	0	222	1623	1598	1,5	302	1941	1923	0,9		0	2,11	0	2,09
2.	Б=19,3%	30	256	1220	1260	-3,2	345	1487	1489	0,1	$\theta_{od}^{onm}=770$	0,23	1,58	0,25	1,60
3.	$\varphi=75,9\%$	60	295	919	1010	-9,9	398	1117	1178	-5,5	$\tau_k^{onm}=930$	0,46	1,19	0,50	1,20
4.	W=3,15%	90	314	811	848	-4,6	423	989	992	-0,3	$\tau_k^{onm}=130$	0,69	1,05	0,75	1,06
5.	U=3,03	120	322	772	775	-0,4	449	930	930	0	$\tau_{kd}^{onm}=120$	0,92	1,00	1,00	1,00
6.	$Z_L=3,5\%$	150	318	791	790	-5,2	429	962	992	-3,1		1,15	1,03	1,25	1,03
7.	$K_X=4,71$	180	305	860	892	-3,7	411	1048	1178	-12,4		1,38	1,12	1,5	1,13
1.	Любительська	0	213	1763	1759	0,2	290	2105	2153	-2,3		0	2,07	0	2,03
2.	Б=18,8%	30	252	1260	1205	4,4	339	1540	1506	2,2	$\theta_o^{onm}=850$	0,385	1,48	0,353	1,48
3.	$\varphi=3,0\%$	60	292	938	907	3,3	393	1146	1136	0,9	$\theta_{od}^{onm}=1040$	0,75	1,10	0,71	1,10
4.	W=74,2%	90	307	949	864	9,0	413	1038	1044	-0,6	$\tau_k^{onm}=80$	1,13	1,12	1,06	1,01

продовження табл. Н.5

5.	U=2,88	120	283	999	1077	-7,8	381	1219	1229	-0,8	$\tau_{\kappa\delta}^{onm}=85$	1,50	1,18	1,41	1,17
6.	З <sub>л</sub> =4,0%	150	253	1250	1545	-23,6	344	1496	1690	-13,0		1,88	1,47	1,76	1,44
7.	K <sub>x</sub> =2,18														
1.	Радянська	0	206	1885	1900	-0,3	278	2290	2265	1,1	$\theta_o^{onm}=910$	0	2,07	0	2,01
2.	Б=19,1%	30	247	1311	1266	3,4	332	1605	1545	3,7	$\theta_{od}^{onm}=1140$	0,4	1,44	0,4	1,41
3.	φ=2,5%	60	289	958	950	0,8	388	1176	1185	-0,8	$\tau_{\kappa}^{onm}=75$	0,8	1,05	0,8	1,03
4.	W=74,1%	90	290	951	950	0,1	390	1164	1185	-1,8	$\tau_{\kappa\delta}^{onm}=75$	и	1,04	и	1,02
5.	U=2,86	120	263	1157	1266	-8,6	353	1420	1445	-1,8		1,6	1,27	1,6	1,25
6.	З <sub>л</sub> =3,9%	150	270	1650	1900	-15,2	309	1854	2265	-22,2		2,0	1,81	2,0	1,63
7.	K <sub>x</sub> =2,3														
1.	Свиняча	0	196	2082	2088	-0,3	266	2500	2504	-0,2		0	2,10	0	2,02
2.	Б=17,9%	30	241	1380	1355	1,8	323	1696	1646	3,0	$\theta_o^{onm}=1000$	0,27	1,57	0,37	1,56
3.	φ=5,9%	60	279	1028	1022	0,6	374	1265	1256	0,7	$\theta_{od}^{onm}=1230$	0,55	1,34	0,55	1,23
4.	W=72,5%	90	273	1073	1089	-1,5	366	1321	1334	1,0	$\tau_{\kappa}^{onm}=70$	0,82	1,04	0,82	1,03
5.	U=2,64	120	243	1355	1555	-14,8	326	1665	1880	12,9	$\tau_{\kappa\delta}^{onm}=70$	1,09	1,01	1,09	1,01
6.	З <sub>л</sub> =3,7%	150										1,36	1,14	1,36	1,13
7.	K <sub>x</sub> =1,15											1,64	1,38	1,64	1,25



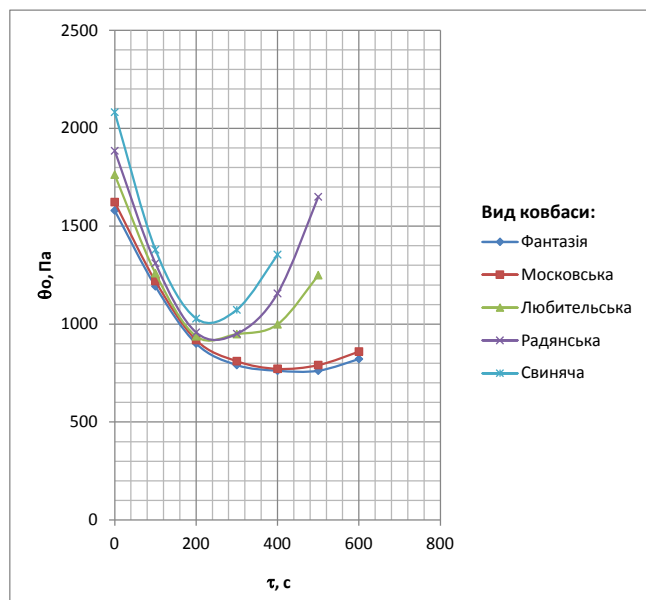


Рис. Н.9 – Кінетика зміни статичного ГНЗ від тривалості подрібнення на виробничому кутері з місткістю чаші 500 л дисперсного середовища фаршу сирокочених ковбас при  $n_H = 2500$  та  $n_T = 16 \text{ хв}^{-1}$

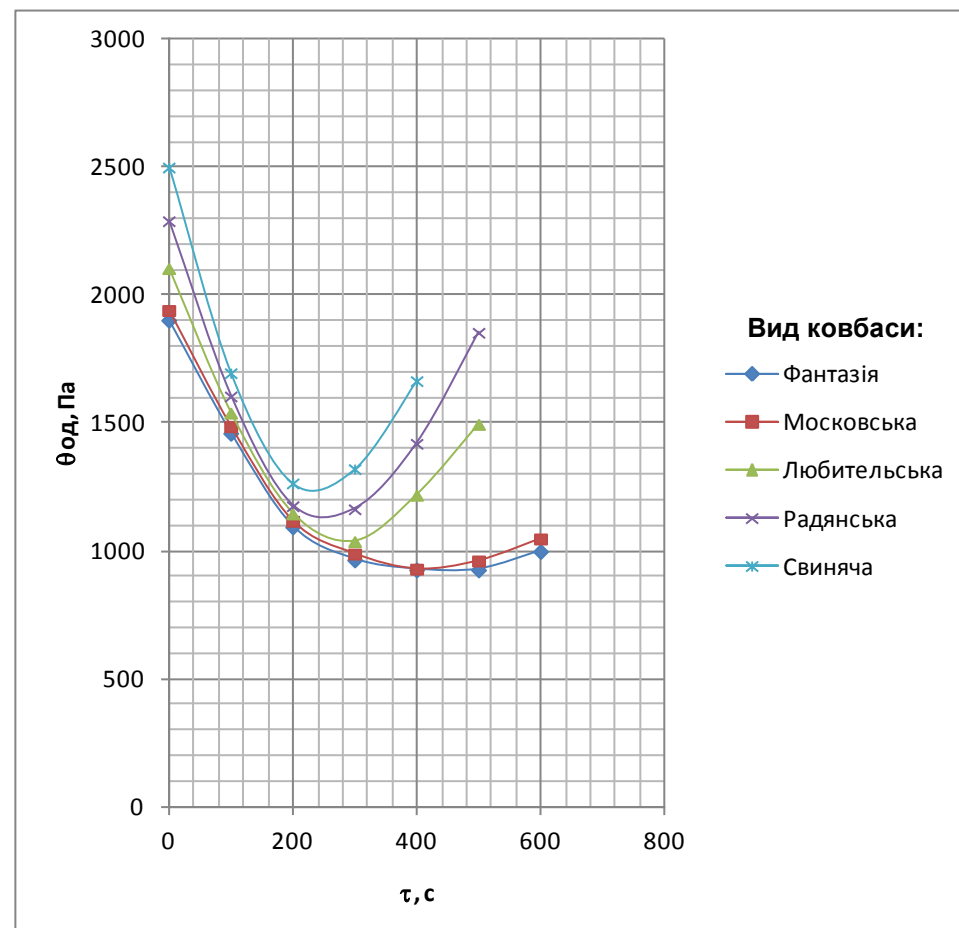


Рис. Н.10 – Кінетика зміни динамічного ГНЗ від тривалості подрібнення на виробничому кутері з місткістю чаші 250 л дисперсного середовища фаршу сирокочених ковбас при  $n_H = 2500$  та  $n_T = 16 \text{ хв}^{-1}$

## Зсувні характеристики фаршів

Таблиця П.1 – ГНЗ ковбасного фаршу за різного вмісту в ньому вологи і жиру

Фарш	$W_n$ , кг/кг	$U_n$ , кг/кг	$\varphi_n$ , кг/кг	$h$ , м	ГНЗ $\theta_o^n$ , Па		Похибка, %	
					дослідне	розрахункове		
1	2	3	4	5	6	7	8	
Перша група фаршу, при $Km_p = 0,4$								
Свинячих сардельок	0,515	1,06	0,375	0,0370	290	298,9	-3,04	
	0,522	1,09	0,377	0,0390	263	262,9	0,04	
	0,530	1,13	0,370	0,0420	228	227,5	0,22	
	0,550	1,22	0,350	0,0400	250	255,5	-2,20	
	0,567	1,31	0,347	0,0440	206	206,7	0,34	
Любительських сосисок	0,555	1,24	0,345	0,0390	262	258,9	1,20	
	0,570	1,32	0,336	0,0410	238	236,2	0,76	
	0,576	1,36	0,312	0,0370	290	301,0	-3,80	
	0,590	1,44	0,298	0,0360	308	304,6	1,10	
	0,605	1,53	0,289	0,0370	290	286,4	1,24	
Вершкових сосисок	0,630	1,70	0,270	0,0380	270	272,8	1,16	
	0,688	2,20	0,217	0,0370	290	289,8	0,75	
	0,700	2,33	0,209	0,0380	277	280,3	-1,19	
	0,710	2,45	0,200	0,0370	292	289,0	1,04	
Свинячих сосисок	0,723	2,61	0,192	0,0380	277	275,6	0,50	
	0,550	1,22	0,356	0,0410	238	234,9	1,32	
	0,585	1,41	0,300	0,0360	310	316,5	-2,10	
	0,600	1,50	0,285	0,0350	326	322,4	1,10	
Свинячої ковбаси І гатунку	0,645	1,82	0,222	0,0305	430	445,8	-3,65	
	0,598	1,49	0,282	0,0340	346	342,8	0,92	
	0,625	1,67	0,263	0,0350	328	320,1	2,45	
	0,632	1,72	0,234	0,0300	445	436,7	1,88	
Російських сосисок	0,650	1,86	0,245	0,0360	310	304,2	1,87	
	0,656	1,91	0,216	0,0305	430	428,0	0,47	
	при $Km_p = 0,6$							
	Російських сосисок	0,651	1,86	0,190	0,0320	585	567,5	3,00
0,669		2,02	0,185	0,0330	550	556,1	-1,10	
0,685		2,18	0,178	0,0340	520	516,0	0,77	
0,692		2,25	0,175	0,0350	490	500,3	-2,10	
Столової ковбаси	0,620	1,63	0,218	0,0330	550	541,5	1,55	
	0,630	1,70	0,210	0,0320	586	601,0	-2,55	
	0,650	1,86	0,201	0,0330	555	549,0	1,08	
	0,660	1,94	0,193	0,0330	555	551,0	0,72	
	0,673	2,06	0,187	0,0340	520	521,5	0,29	
Яловичих сардельок	0,720	2,57	0,131	0,0310	623	639,8	-2,60	
	0,726	2,65	0,133	0,0320	586	592,3	-1,08	
	0,737	2,80	0,122	0,0310	623	664,4	3,06	
	0,742	3,00	0,125	0,0340	520	515,4	0,89	

Фарш	$W_n$ , кг/кг	$U_n$ , кг/кг	$\varphi_n$ , кг/кг	$h$ , м	ГНЗ $\theta_o^n$ , Па		Похибка, %
					дослідне	розрахункове	
1	2	3	4	5	6	7	8
	0,753	3,05	0,114	0,0330	555	565,0	-1,80
Яловичих сосисок	0,676	2,09	0,162	0,0290	712	698,1	1,96
	0,688	2,20	0,154	0,0300	665	662,5	0,37
	0,698	2,31	0,150	0,0305	642	634,7	1,14
	0,708	2,42	0,143	0,0310	623	628,4	-0,87
	0,718	2,55	0,140	0,0320	585	588,7	-0,63
	0,730	2,70	0,133	0,0320	585	574,3	1,83
Часникової ковбаси	0,740	2,85	0,032	0,0250	963	964,2	-0,13
	0,755	3,09	0,030	0,0260	890	892,7	-0,30
	0,775	3,45	0,028	0,0270	825	795,6	3,87
	0,790	3,76	0,026	0,0290	715	714,9	0,01
Друга група фаршу, при $Km_p = 0,6$							
Сосисок молочних	0,598	1,49	0,262	0,0340	520	535,5	-2,9
	0,615	1,60	0,253	0,0350	490	497,3	-1,47
	0,630	1,70	0,244	0,0350	490	477,6	2,68
	0,642	1,80	0,235	0,0360	463	463,9	-0,19
Сосисок шкільних	0,610	1,56	0,254	0,0335	535	524,8	1,94
	0,622	1,64	0,245	0,0340	520	517,7	0,45
	0,636	1,75	0,236	0,0350	490	491,6	-0,33
	0,651	1,86	0,228	0,0360	463	468,2	-1,10
Докторської ковбаси	0,600	1,50	0,255	0,0320	585	572,5	2,14
	0,615	1,60	0,244	0,0330	550	537,7	2,24
	0,630	1,70	0,233	0,0330	550	550,5	-0,09
	0,640	1,78	0,206	0,0300	666	685,4	-2,90
	0,653	1,88	0,198	0,0340	517	501,6	2,98
	0,665	1,99	0,190	0,0305	645	651,3	-0,98
Молочної ковбаси	0,600	1,50	0,244	0,0305	645	652,0	-1,09
	0,619	1,62	0,234	0,0315	605	610,7	-0,94
	0,623	1,65	0,230	0,0315	605	613,8	-1,45
	0,634	1,73	0,224	0,0320	585	589,6	-0,79
	0,640	1,78	0,220	0,0320	585	580,4	0,79
Діабетичної ковбаси	0,610	1,56	0,220	0,0280	765	776,5	-1,50
	0,622	1,64	0,214	0,0280	765	745,4	2,56
	0,638	1,76	0,207	0,0290	715	693,6	2,99
	0,640	1,78	0,190	0,0270	825	814,7	1,25
	0,655	1,90	0,183	0,0280	767	772,6	-0,73
	0,670	2,03	0,177	0,0290	715	725,7	-1,50
Дієтичної ковбаси	0,694	2,26	0,0880	0,0220	1240	1246,2	-0,50
	0,719	2,56	0,0815	0,0230	1135	1117,4	1,55
	0,730	2,70	0,0639	0,0230	1135	1132,0	0,26
	0,737	2,80	0,0755	0,0240	1040	1035,8	0,40
	0,750	3,00	0,0590	0,0240	1040	1023,3	1,60
	0,765	3,26	0,0548	0,0250	960	941,0	2,02

### Автоматизація процесу подрібнення фаршу

В результаті досліджень, виконаних у дисертації, отримані еталонні реологічні показники ковбасних фаршів, що забезпечують при певному хімічному складі максимальний вихід при найкращій якості готових виробів. Ці показники можуть слугувати основою для автоматизації процесу тонкого подрібнення.

Серед засобів автоматизації процесу тонкого подрібнення варто відмітити систему фірми «Laska» (Австрія) для кутера К-130 [1]. Вона включає термореле, механізми відкриття і закриття кришки кутера, привід розвантажувача, механізм гальмування. Цей пристрій дозволяє контролювати тільки температуру харчових продуктів, а автоматичний цикл його роботи задається часом подрібнення і не передбачає контролю реологічних характеристик продукту, що не виключає недоподрібнення або переподрібнення. Відома система управління кутера К-330Vac фірми " Kramer Grebe" (Німеччина), в якій автоматичний цикл задається тільки часом подрібнення [2].

У МДУХБі розроблена система (В.Д. Косой, Ю.В. Самусенко та ін.) управління роботою подрібнювача (рис. Р.1), яку можна використовувати в ковбасному виробництві на автоматично діючих лініях. Робота системи здійснюється наступним чином. Індукційний перетворювач закріплюють на внутрішню частину кришки подрібнювача так, щоб при закріпленій кришці він знаходився за ножами.

Заздалегідь подрібнений фарш завантажують у чашу подрібнювача, наприклад, кутера. Коли фарш досягне рівня перетворювача, електричний сигнал від останнього поступає на блок управління, викликаючи замикання ланцюга. Після досягнення оптимальних або необхідних реологічних властивостей фаршу, сигналом перетворювача ланцюг блока управління розмикається, внаслідок чого включаються в роботу електромагнітна муфта, реле часу і відкривається електромагнітний клапан. Електромагнітна муфта приводить в обертальний рух вивантажувач і, одночасно, включає в роботу гідравлічний насос. Після проходження заздалегідь устанавленого часу, необхідного для вивантаження харчового продукту, реле часу закриває і відкриває відповідні електромагнітні клапани і включає сигнальну лампу.

Поршень вивантажувального гідравлічного циліндра під дією пружини повертається у початкове положення, видаляючи вивантажувальний пристрій з чаші подрібнювача. Одночасно олива з гідравлічного насоса нагнітається в порожнину гідравлічного циліндра для підймання кришки подрібнювача, що забезпечує більш рівномірну закладку сировини у порожнину чаші і дозволяє включати в роботу завантажувальний пристрій. Потім цикл роботи повторюється. Система дозволяє автоматично керувати роботою усіх органів подрібнювача в належній послідовності і, в залежності від оптимального або заздалегідь заданого ступеня подрібнення, контрольованого індукційним

перетворювачем, що знаходиться у контакті з поверхнею подрібнюваного продуктом.

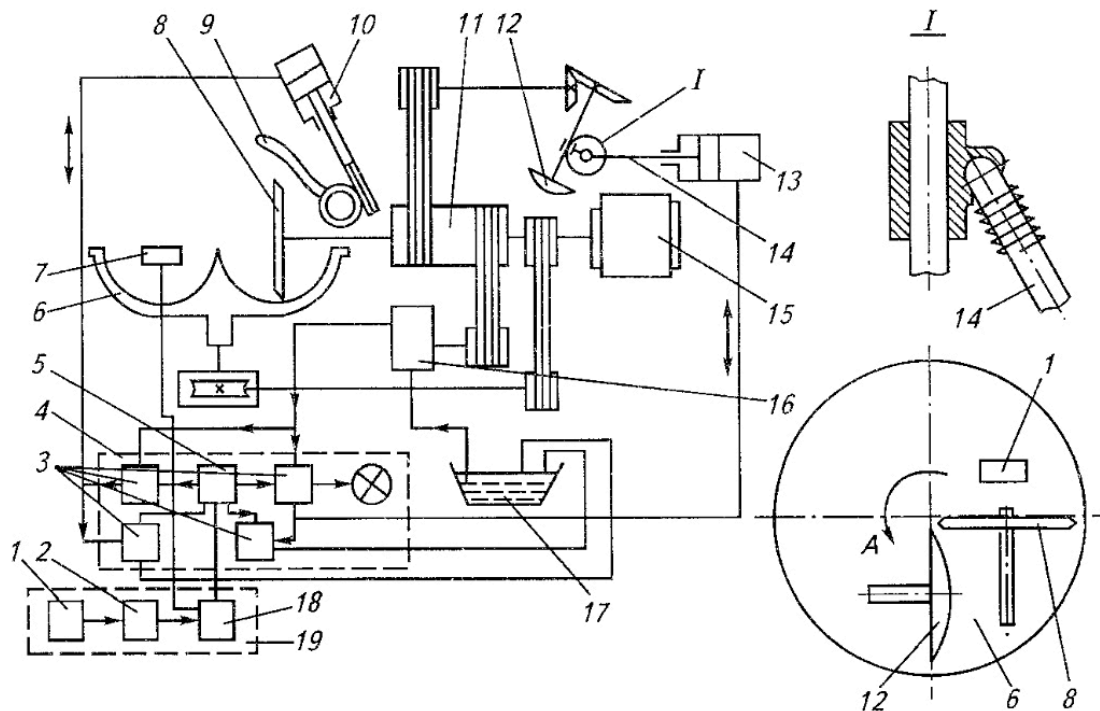


Рис. Р.1 – Система управління роботою подрібнювача: 1 - індукційний перетворювач; 2 - реєструвальний прилад; 3 - електромагнітні клапани; 4 - блок задання тривалості процесу вивантаження; 5 - реле часу вивантаження; 6 - чаша кутера; 7 - перетворювач ступеня заповнення подрібнювача; 8 - ножі; 9 - кришка подрібнювача; 10 - гідравлічний циліндр для підймання і опускання кришки подрібнювача; 11 - електромагнітна муфта; 12 - вивантажувач; 13 - гідравлічний циліндр для опускання вивантажувача в чашу кутера; 14 - шток гідроциліндра; 15 - електродвигун; 16 - гідравлічний насос; 17 - резервуар для оливи; 18 - блок управління з контактним механізмом; 19 – пристрій для контролю за реологічними властивостями продукту

Одним з основних вузлів такої системи є індукційний перетворювач (віскозиметр), оригінальна конструкція якого запропонована нами. Він складається з рухомої і нерухомої частин рис. Р.2.

Нерухома частина складається з корпусу з сердечником і кронштейна. Рухома частина включає давач з рифленою поверхнею, забезпечений нагрівальними елементами, та дифтрансформаторний перетворювач з нерухомих сердечником.

Дифтрансформаторний перетворювач знаходиться всередині давача і жорстко з ним з'єднаний, а сердечник перетворювача укріплений на нерухомому корпусі. Корпус і давач сполучені між собою за допомогою сильфонів. Сильфони одночасно є направляючими для переміщення давача. З їх зовнішньої сторони закріплені кільцеві мембрани з еластичного матеріалу, що служать захистом сильфонів від забивання подрібнюваним продуктом.

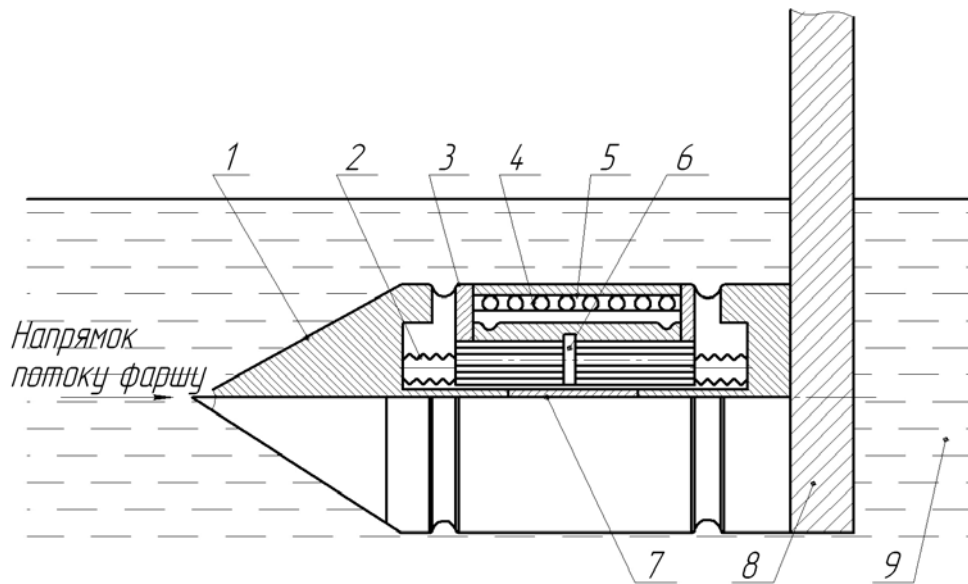


Рис. Р.2 – Конструктивна схема віскозиметра для вимірювання СМХ фаршу в потоці: 1 - корпус; 2-сильфони; 3-кільцеві мембрани; 4-давач з рифленою поверхнею; 5 - нагрівальний елемент; 6 - дифтрансформаторний перетворювач; 7 - сердечник перетворювача; 8 - кронштейн; 9 - фарш

Віскозиметр працює так. На початку встановлюють його в кутер і закріплюють за допомогою кронштейна на корпусі машини. Вузол кріплення дозволяє переміщувати віскозиметр в радіальному напрямку для встановлення однакової швидкості його обтікання. Віскозиметр (давач) має повністю бути зануреним в подрібнюваний фарш. Використовуючи МІКРО-ЕОМ, можна вводити поправку до швидкості обертання чаші кутера. Для підтримки постійної температури на поверхні давача віскозиметра, включаються нагрівальні елементи, що забезпечують за допомогою автоматики постійну температуру.

При включенні кутера подрібнювана сировина починає ковзати по поверхні віскозиметра і, залежно від сили зчеплення, тобто в'язкості продукту, переміщає давач і перетворювач в осьовому напрямі відносно нерухомого сердечника на певну величину. Це викликає зміни напруги на вторинних обмотках перетворювача пропорційно ефективній в'язкості фаршу при відповідній швидкості його переміщення.

Розглянутий віскозиметр, в порівнянні у серійними, має наступні переваги:

- відсутність випадкових коливань перетворювача відносно його сердечника і забезпечення постійного контакту з продуктом за рахунок розташування давача в об'ємі подрібнюваного продукту, який демпфує ці коливання;

- підвищена точність і надійність вимірювання реологічних характеристик за рахунок виключення сухого тертя в напрямних;

- поліпшені санітарно-технічні умови роботи віскозиметра за рахунок герметичної конструкції.

Теоретичне обґрунтування принципу дії віскозиметра наступне. Переміщення давача викликається дією дотичних напружень при його обтіканні потоком в'язко - пластичної маси фаршу. З урахуванням того, що розміри давача на порядок менші радіуса чаші кутера, при постійній швидкості її обертання можна умовно прийняти, що подрібнювана сировина здійснює відносно робочої частини віскозиметра усталений прямолінійно-паралельний рух. Розглянемо обтікання потоком в'язко-пластичної маси із швидкістю  $W_0$  нескінченного циліндра радіусом  $R$ , зануреного в продукт на глибину  $h$  (рис. Р.3). При цьому м'ясну подрібнену сировину умовно приймаємо як в'язку нестискувану рідину. За основу взято диференціальне рівняння Навьє-Стокса в циліндричних координатах, що описує рух в'язкої нестисливої рідини:

$$\partial W_z / \partial r^2 + \partial W_z / (r dr) = 0 \quad (P.1)$$

де  $W_z$  - швидкість потоку в'язко-пластичної системи.

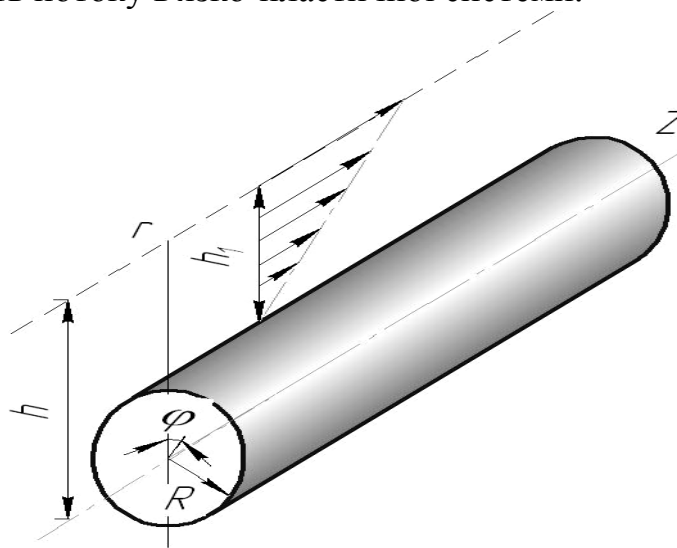


Рис. Р.3 – Схема обтікання потоком фаршу корпуса віскозиметра

Перетворимо записане рівняння:

$$(\partial / r \cdot \partial r) \cdot (r \cdot \partial W_z / \partial r) = 0 \quad (P.2)$$

Після інтегрування отримаємо:

$$W_z = C_1 \cdot \ln r + C_2 \quad (P.3)$$

Постійні інтегрування визначаються з граничних умов:

$W_z=0$ , при  $r=R$

$W_z=W_0$ , при  $r=h$ .

Тоді:

$$\tilde{N}_1 = W_0 / (\ln h - \ln R) = W_0 / \ln(h/R) \quad (P.4)$$

$$C_2 = W_0 \ln R / (\ln h/R) \quad (P.5)$$

$$W_z = W_0 \cdot (\ln r - \ln R) \cdot \ln(h/R) \quad (P.6)$$

В даному випадку узагальнена гіпотеза Ньютона в циліндричних координатах, що встановлює диференціальний зв'язок між величинами напружень і швидкостями руху частинок продукту, представляється наступним співвідношенням:

$$\theta_{zr} = \eta_{ef} \cdot \partial W_z / \partial r, \quad (P.7)$$

де  $\theta_{zr}$  - дотичне напруження, Па;

$\eta_{ef}$  - ефективна в'язкість за певної швидкості потоку ( $W_z$ ) фаршу, Па·с.

Продиференціюємо попередній вираз (P.6) за визначенням  $W_z$  і отримаємо:

$$\partial W_z / \partial r = W_0 / R \cdot \ln(h/R). \quad (P.8)$$

Тоді

$$\theta_{zr} = \eta W_0 / R \cdot \ln(h/R). \quad (P.9)$$

Внаслідок дії дотичних напружень  $\theta_{zr}$  виникає сила  $P$ , діюче на давач віскозиметра, яка дорівнює:

$$P = \theta_{zr} \cdot F = \eta \cdot W_0 F / R \cdot \ln(h/R) \quad (P.10)$$

де  $F$  - площа поверхні давача, тобто робочої частини віскозиметра, м<sup>2</sup>.

При цьому глибина занурення віскозиметра ( $h$ ) в кутер має бути більшою товщини пограничного шару  $h_1$ , тобто  $h_1 = h - R$ , тоді

$$h_1 > 4,6 \sqrt{\eta_{ef} l / \rho \cdot W_0} \quad (P.11)$$

де  $\eta_{ef}, \rho$  - відповідно, ефективна в'язкість (Па·с/(кг/м·с)) і густина (кг/м<sup>3</sup>) фаршу;

$l$  - довжина робочої частини віскозиметра (давача), м.

Для тарування давача можна використати ротаційні віскозиметри з постійною частотою обертання, яка повинна забезпечувати рівність швидкостей зсуву фаршу при обтіканні давача в кутері і в робочому проміжку ротаційного віскозиметра.

Швидкість зсуву в ротаційному віскозиметрі при обертанні внутрішнього циліндра (ротора) вимірюється напруженням на ньому:

$$dW/dr = 2\omega \cdot R_{cm}^2 / (R_{cn}^2 - R_p^2), \quad (P.12)$$

де  $\omega$  - кутова швидкість обертання внутрішнього циліндра;

$R_{c\delta}$ ,  $R_\delta$  - радіуси, відповідно, зовнішнього (склянки) і внутрішнього (ротора) циліндрів.

Прирівнюючи градієнти швидкості зсуву фаршу в кутері, визначені за рівнянням (P.8), і в ротаційному віскозиметрі за рівнянням (P.12), отримаємо:

$$\omega = [W_0 / 2R \ln(h/R)] \cdot [(R_{n\delta}^2 - R_p^2) / R_{c\delta}^2] \quad (P.13)$$

Наприклад, якщо кутер обертається зі швидкістю  $n$  об/хв, а давач встановлений на відстані  $r$  від центру чаші кутера, то



$$\omega = (\pi \cdot n/30) \cdot (r/R) \cdot (\ln h/R)^{-1} \cdot (R_{\bar{n}\delta}^2 - R_{\delta}^2) / R_{\bar{n}\delta}^2 \quad (\text{P.14})$$

При  $n=10$  об/хв.,  $r=200$  мм,  $h=50$  мм,  $R=15$  мм,  $R_{cm}=20$  мм,  $R_p=10,5$  мм швидкість обертання внутрішнього циліндра (ротора) ротаційного віскозиметра буде дорівнювати:

$$\begin{aligned} \omega &= (3,14 \cdot 10/30) \cdot (200/15) / (\ln 50/15)^{-1} (20^2 - 10,5^2) / 20^2 \\ &= (13,956/1,204) \cdot 0,7244 = 8,397 \end{aligned} \quad (\text{P.15})$$

$$n = \omega \cdot 30 / \pi = 9,397 \cdot 30 / 3,14 = 80,2 \text{ об/хв.} \quad (\text{P.16})$$

Таким чином, сила впливу фаршу на давач в процесі тонкого подрібнення м'ясної сировини змінюється за рахунок зміни консистенції, викликаючи переміщення перетворювача в осьовому напрямі відносно нерухомого сердечника, а отже вимірюється і напруження зсуву, яке пропорційне ефективній в'язкості фаршу. Тому розглянутий віскозиметр для вимірювання ефективної в'язкості або напруження зсуву фаршу в процесі тонкого подрібнення є теоретично обґрунтованим і може знайти широке застосування в промисловості.

Для дослідження в'язкості м'ясних фаршів в процесі подрібнення також застосовували віскозиметри «Реотест-2» і РВ-8 [3].

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Technische Dokumentation Kutter K. 130 «Laska».
2. Technische Dokumentation K 330 Yac «Kramer Grebe».
3. Вискозиметр ротационный Rheotest RV [Инструкция по эксплуатации] “Rheotest Messgeräte Medingen GmbH”, ФРГ, 2007, 28 с.

## Вплив вакууму на процес подрібнення

Проблемам вивчення впливу вакууму на СМХ фаршу і якість готових ковбасних виробів присвячений ряд робіт [2, 3]. Дослідження свідчать про те, що вакуумування сприяє зниженню загальних питомих енерговитрат, скороченню тривалості процесу, зміні СМХ фаршу і готових ковбасних виробів, підвищенню стабільності забарвлення і збільшенню виходу продукції. Скорочення тривалості подрібнення пояснюється прискоренням процесу руйнування клітинної структури.

Для вивчення впливу вакууму на тривалість подрібнення фаршу проаналізовані експериментальні дані, отримані авторами робіт [1, 2, 3]. Математична обробка цих результатів дозволила отримати залежність, що дозволяє визначити вплив вакууму на тривалість подрібнення:

$$K_p = 0,74 + 0,26 \cdot p_o / p_a \quad (C.1)$$

де  $\delta_i$  - залишковий абсолютний тиск, Па;  $\delta_a$  - атмосферний тиск, Па.

Знаючи  $\hat{E}_\delta$  можна визначити оптимальну тривалість подрібнення  $\tau_{\hat{e}}^{iio}$  при різному тиску за рівняннями, значення яких заведені у табл. С.1.

Збільшення ГНЗ при зменшенні абсолютного тиску пояснюється створенням міцнішої структури за рахунок послаблення впливу аерації. Крім того, встановлено [1], що створення вакууму при кутеруванні сприяє підвищенню вологозв'язувальної здатності і значень ГНЗ продукту та призводить до збільшення виходу готової продукції.

Отримана залежність ГНЗ від залишкового, абсолютного тиску:

$$\theta_o^e = \theta_o^h (1,17 - 0,17 \cdot p_o / p_a), \text{ Па}, \quad (C.2)$$

де  $\theta_o^e$  - ГНЗ фаршу після дії залишкового тиску в процесі подрібнення, Па;

$\theta_o^h$  - ГНЗ фаршу після подрібнення при атмосферному тиску, Па.

Формули (С.1) і (С.2) справедливі в діапазоні тисків  $(1,0 \div 0,05) \cdot 10^5$  Па. Розрахункові і експериментальні значення ГНЗ приведені в табл. С.1.

Таблиця С.1 – Експериментальні і розрахункові значення ГНЗ і оптимальної тривалості подрібнення м'ясного фаршу за різного рівня вакууму в процесі кутерування

Продукт	Абсолютний тиск, $p \cdot 10^{-5}$ Па	Граничне напруження зсуву, $\theta_o^e$ , Па			Тривалість кутерування, $\tau_k^{om}$ , с		
		дослідне	розрахункове	похибка, %	дослідна	розрахункова	похибка, %
Говядина	0,05	860	842	2,09	270	262	2,96
	0,25	825	817	0,97	285	280	1,75
	0,50	795	787	1,00	305	302	0,99

	0,75	760	756	0,53	330	325	1,52
	1,00	725	725	0	348	348	0
Свинина	0,05	550	522	5,09	180	171	5,00
	0,25	510	507	0,59	185	183	1,08
	0,50	495	488	1,41	200	198	1,00
	0,75	475	469	1,26	215	213	0,94
	1,00	450	450	0	228	228	0
Фарш	0,05	650	639	2,69	240	233	2,92
	0,25	620	614	0,97	250	250	0
	0,50	600	597	0,50	270	270	0
	0,75	577	573	0,70	290	290	0
	1,00	550	550	0	310	310	0

Створення вакууму сприяє підвищенню щільності і міцностних властивостей готових ковбасних виробів за рахунок зменшення об'єму повітряних порожнин. Тиск менший  $0,25 \cdot 10^{-5}$  Па призводить до зайвого ущільнення структури ковбас, погіршуючи їх консистенцію. Крім того, створення глибшого вакууму пов'язане з додатковими енергетичними витратами [1].

### ЛІТЕРАТУРА

1. Зависимость качества фарша и вареных колбас от остаточного давления при куттеровании / Н.К.Журавская, В.И.Ивашов, Е.И. Титов и др. - Мясная Индустрия СССР, 1991, Л 7, с. 31-33.
2. Лысов В.С. Исследование вакуумного куттерования с целью разработки соответствующего оборудования. : Автореф. дис... канд.техн.наук. - М.: 1999, -23 с.
3. Титов Е.И. Изучение свойств фаршей и качества вареных колбас в зависимости от давления газовой среды при куттеровании. - Дис... канд.техн.наук.- М.: ЖИМШ, 1989, - 163с.

### Подрібнення фаршу на кутері та колоїдному млині

Після обробки фаршу на кутері для кращого подрібнення його часом пропускають через колоїдний млин. За об'єкт дослідження вибрані фарші ковбаси нової дослідної та російських сосисок. Методика проведення експериментів не відрізнялася від викладеної раніше. Для додаткового подрібнення використали колоїдний млин КМ-4 "Саксонія-Лейпціг".

Одним з важливих завдань у м'ясній промисловості є використання жирної яловичини в ковбасному виробництві, яку майже не застосовують при виробленні варених ковбас. Кафедрами процесів і обладнання переробки продукції АПК і м'ясних, рибних і морепродуктів НУБіП України, в рамках консультування виконання студентами магістерських робіт зі спеціальності «Технологія м'яса», проведені дослідження з вибору рецептури нового дослідного виду ковбасних виробів з використанням жирної яловичини.

Найвищу оцінку за органолептичними показниками отримала ковбаса, виготовлена з 35% жирної яловичини, 60% напівжирної свинини, 2% сухого молока і 3% борошна або крохмалю. Ця рецептура була вибрана нами для подальших досліджень і впровадження у виробництво в НДГ «Великоснітинське» НУБіП України.

В процесі подрібнення на кутері при постійній кількості доданої вологи через 2,5; 3,5; 4 і 5 хв відбирали проби, які пропускали через колоїдний млин. Параметри досліджуваних фаршів були наступними: вологість  $0,624 \div 0,675$ ; вологовміст  $1,632 \div 2,077$ ; вміст жиру  $0,221 \div 2,077$ . Сутність і характер змін властивостей, в залежності від тривалості попереднього подрібнення, аналогічні попереднім.

Для визначення  $\tau_{\epsilon}^{ind}$  ковбасного фаршу з розглянутою рецептурою при використанні кутерів інших конструкцій необхідно користуватися узагальненою кінематичною характеристикою кутера  $\Omega$ . Тривалість подрібнення обернено пропорційна  $\Omega$ , яка для використовуваного кутера з місткістю чаші 80 л дорівнює 18500 при  $\tau_{\kappa}^{onm} = 3,5$  хв. Тоді  $\tau_{\kappa i}^{onm}$  для будь-якого кутера, що характеризується  $\Omega_s$ , при оптимальному вологовмісті фаршу буде наступною:

$$\tau_{\kappa i}^{onm} = \tau_{\kappa}^{onm} \cdot \Omega / \Omega_i \quad (Т.1)$$

Екстремальні характеристики подані на рис. Т.1. Еталонні характеристики фаршу для зруйнованої і незруйнованої структури такі:  $\theta_i = 430/580$  Па;  $\eta = 4,65/5,12$  Па·с;  $B = 2,15/2,0$  Па·с;  $m = 0,758/0,853$ .

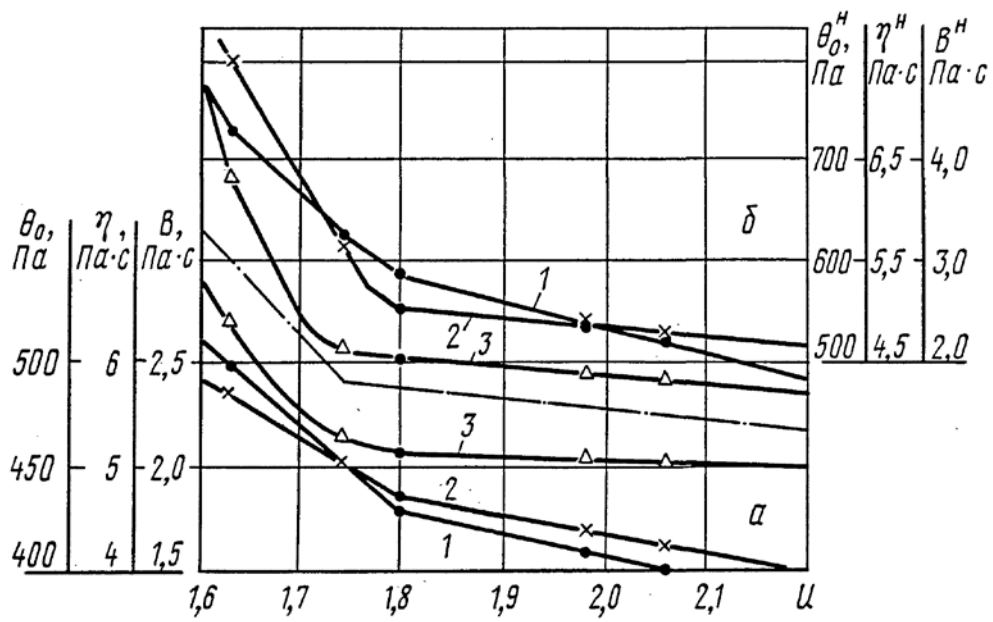


Рис. Т.1 – Залежність екстремальних характеристик фаршу від вологовмісту: а - для зруйнованої структури; б - для незруйнованої структури; 1-  $\theta_0$ ; 2-  $\eta$ ; 3-  $B$

## Методика розрахунку оптимальних режимів подрібнення фаршів

Виходячи з результатів виконаних досліджень для розрахунку режиму подрібнення ковбасних фаршів, можна запропонувати два методи.

**Перший (наближений) метод** розрахунку полягає в наступному.

Визначають оптимальну тривалість подрібнення для будь-яких конструкцій і типів подрібнювальних машин за залежністю (3.111). Для цього розраховують коефіцієнт пропорційності, який враховує нерівномірність зусиль, необхідних на розрізання різних сортів яловичини і свинини, що входять у вибрану рецептуру фаршу за залежністю (3.112); технічну характеристику машини для тонкого подрібнення і узагальнену кінематичну характеристику для кутера за формулою (3.108) величину  $\hat{E} \cdot \exp(0,25 \cdot m_{\text{вѣтá}} + 0,46)$ , яка залежить від виду і рецептури ковбасного виробу.

Визначають кількість вологи, що додається, за залежностями:

$$m_e = (W_n^{onm} - W_n) \cdot m_c / (1 - W_n^{onm}) = (U_n^{onm} - U_n) \cdot m_c / (1 + U_n), \quad (У.1)$$

$$U = W / (1 - W) \quad (У.2)$$

(при відомій усередненій вологості і масі сировини, що входить в рецептуру) або

$$m_e = \sum (W_n^{onm} - W_{ni}) \cdot m_{ci} / (1 - W_n^{onm}) \quad (У.3)$$

(при відомій вологості і масі окремих компонентів сировини, які входять в рецептуру).

Порядок розрахунку  $m_{\hat{a}}$  наступний: оптимальний вологовміст бесшпикових ковбасних фаршів у першому наближенні визначають за формулою (3.105); оптимальну вологість  $W_i^{\hat{a}}$  знаходять за відомим  $U_i^{\hat{a}}$ ; величину  $W_n$  приймають на підставі статистичних даних як середнє значення вологості сировини в літньо-осінній і зимово-весняний періоди. На підприємствах малої продуктивності худоба в ці періоди поступає, в основному, з одних і тих же регіонів, що забезпечує незначні коливання вологості сировини в межах одного гатунку.

**Другий метод** ґрунтується на попередньому аналізі вологовмісту і жирності сировини. Цей метод при перевірці у виробничих умовах дав позитивні результати і застосування його особливо вигідне на середніх і дрібних підприємствах. Для розрахунку оптимального терміну подрібнення необхідно визначити наступні величини: середнє значення вологовмісту і жирності сировини (не менше 10 проб, що відбираються з різних місць після її перемішування в мішалці з сіллю або сольовим розчином перед дозріванням); комплексну характеристику фаршу за формулою (3.106); оптимальну тривалість подрібнення за формулою (3.114) з використанням рівнянь для кутера (3.108), вакуум-кутера (С.1); оптимальний вологовміст бесшпикових

ковбасних фаршів за формулою (3.107); необхідна кількість вологи, що додається, за формулою (У.1).

На підставі проведених розрахунків для вибраних рецептур ковбасних виробів і подрібнювальної машини складають таблицю тривалості подрібнення і кількості вологи, що додається до фаршу. Таблицю треба вивішувати на видному місці поряд з лічильником часу, на якому оператор задає оптимальний час подрібнення.

Варто зазначити, що для кутера тривалість подрібнення не повинна бути меншою 4 хв, тому що це мінімальна тривалість процесу для більш повного зв'язування вологи. Інакше, при термообробленні, стрімко зростають втрати бульйону, що негативно позначається на якості і виході готових виробів. У зв'язку з цим є два шляхи збільшення тривалості кутерування. Перший - виконувати подрібнення на малих швидкостях, другий - проводити первинне подрібнення на високих швидкостях, а кінцеве подрібнення - на низьких. Другий шлях знижує тривалість процесу до оптимального мінімуму, але вимагає точних розрахунків і більш досконалої техніки.

### Забезпечення якості ковбасних виробів з фаршів, подрібнених на різних машинах

Поряд з термообробкою в пароварочних камерах, останніми роками в Україні і за кордоном намітилась тенденція виготовлення ковбасних виробів без оболонки з використанням перспективних способів термообробки (у закритій формі під тиском, електроконтактний, в полі СВЧ, запіканням тощо). Застосування цих способів відповідає сучасним вимогам розвитку ковбасного виробництва, тому що значно підвищується продуктивність праці і створюються передумови для автоматизації процесів.

Для оптимізації виробництва ковбасних виробів з фаршів, приготовлених на різних подрібнювальних машинах при використанні названих способів термооброблення, проведені комплексні дослідження з визначенням тривалості процесу, виходу і якості готових виробів в залежності від СМХ і технологічних характеристик фаршу. У зв'язку з цим визначалися наступні показники: втрати маси продукту при термообробленні, вологість або вологовміст, активність води; реологічні міцності (напруження зрізу, робота зрізу і зминання), компресійні (при об'ємних деформаціях) та інші властивості, що характеризують консистенцію продукту, яка визначалась також органолептично.

Вихід готової продукції ( $m_{вих}$ , кг/кг сирого соленого м'яса,  $m_{вих}^*$ , кг/кг сухого залишку, втрати маси в процесі термообробки  $m_{е}$ , кг рідини/кг сирого фаршу) розраховували за рівняннями матеріального балансу. Зразки продукції зважували до і після термообробки та охолодження при 4-5°C протягом 2 год на вагах ВЛКТ-2кг/100 з точністю 0,001. Обчислення проводили за формулами:

$$m_{вих} = m_{зв} / m_m = m_{зв} (1 + m_g) / m_{с.ф.} = (1 + U_k) / (1 + U_m); \quad (\Phi.1)$$

$$m_{вих}^* = m_{зв} / m_{сух.м.} = U_k + 1; \quad (\Phi.2)$$

$$m_{жс} = (m_{с.ф.} - m_{зв}) / m_{с.ф.} = \Delta m_{жс} / m_{с.ф.} = \Delta U / (1 + U_n) \quad (\Phi.3)$$

де  $m_{зв}$  - маса готового виробу, кг;  $m_m$  - маса початкового соленого м'яса, включаючи жир, кг;  $m_g$  - кількість води і льоду, доданих до м'яса при подрібненні, кг/кг соленого м'яса;  $m_{с.ф.}$  - маса сирого фаршу, кг;  $U_k$  - вологовміст готового продукту, кг/кг сухого продукту;  $U_m$  - вологовміст соленого м'яса кг вологи/кг сухого м'яса;  $m_{сух.м.}$  - маса сухого м'яса і жиру, кг;  $\Delta U$  - різниця вологовмісту ( $\Delta U = U_n - U_k$ ) кг/кг;  $U_n$  - початковий вологовміст фаршу, кг/кг.

Розрахунок виходу продукції на 1 кг початкової сировини (м'яса) не відбиває дійсного стану процесу, оскільки при цьому не враховується вологість



м'яса. Тому вихід треба відносити до маси сухого залишку сировини, а точніше - до сухого залишку м'язової тканини (білку) [1, 2].

Відносну вологість початкового соленого м'яса (шроту) - суміші яловичини і свинини визначали за формулою

$$W_m = \sum m_i \cdot W_i / m_m, \quad (\Phi.4)$$

де  $W_m$  - відносна вологість соленого м'яса, кг вологи/кг сирової суміші;  $m_i$ ,  $W_i$  - відповідно, маса і відносна вологість компонентів, що складають початковий шрот;  $m_m$  - маса вихідної суміші шроту.

Активність води визначали на вакуумній установці. Реологічні властивості готових ковбасних виробів (граничне напруження зрізування, робота зрізування і зминання) досліджували на приладі ПМ-3; ступінь penetрації, яка характеризує консистенцію продукту - на пенетрометрах ПП-3М, ПП-4.

### Ф.1. Ковбаси з кутерованого фаршу

Для проведення комплексних досліджень були вибрані чотири види ковбасних виробів, приготовлених з фаршу яловичих і свинячих сардельок, докторської ковбаси і російських сосисок, що включають різні кількості жиру і вологи, технологічні і реологічні характеристики яких приведені у табл. 3.7. дисертації.

Важливою технологічною величиною, що характеризує вологовз'язувальну здатність фаршу, є втрати маси при термообробці  $m_w$ , які, зокрема, залежать від тривалості подрібнення (рис. Ф.1).

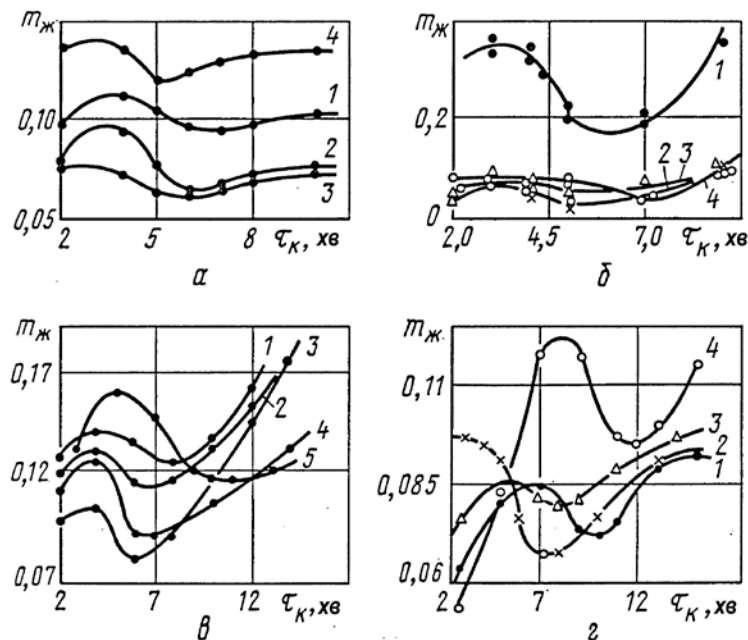


Рис. Ф.1 – Залежність втрат маси  $m_w$  від тривалості кутерування  $\tau_k$  і вологовмісту  $U_i$  фаршу для різних ковбасних виробів: а - російських сосисок при  $U_i$ : 1 - 2,09; 2 - 2,22; 3 - 2,55; 4 - 2,98; б - свинячих сардельок при  $U_i$ : 1 - 1,09; 2 - 1,31; 3 - 1,24; 4 - 1,45; в - яловичих сардельок при  $U_i$ : 1 - 2,75; 2 - 3,41; 3 - 3,90; 4 - 4,78; г - докторської ковбаси при  $U_i$ : 1 - 1,48; 2 - 1,65; 3 - 2,06; 4 - 2,29

При варінні фаршу, який кутерували до закінчення підготовчого періоду подрібнення, втрачається максимальна кількість маси у вигляді бульйону. При подальшому збільшенні  $\tau_k$  втрати маси зменшуються до мінімальних значень, що відповідає закінченню першого періоду подрібнення, а потім знову зростають (другий період подрібнення). Мінімальні втрати маси для кожного виду фаршу відповідають екстремальній тривалості подрібнення. Найменші втрати маси в процесі термообробки відповідають оптимальним значенням вологовмісту і тривалості подрібнення.

Графічна залежність зміни вологовмісту готового продукту  $U_k$  (на прикладі сосисок російських), від вологовмісту фаршу  $U_n$  за різної тривалості подрібнення  $\tau_k$  подана на рис. Ф.2. За цим графіком визначаються екстремальні значення  $U_{k.e.}$ . Мінімальне (критичне) значення різниці вологовмісту ( $\Delta U = U_{n.e.} - U_{k.e.}$ ) відповідає оптимальному вологовмісту фаршу (рис. Ф.3). При відхиленні  $U_n$  від  $U_n^{opt}$  втрати маси збільшуються.

Залежність  $m_{вих} = f(U_k)$  можна отримати тільки у тому випадку, коли вологовміст м'ясної сировини  $U_m$  постійний. У нашому випадку  $U_m \approx 1,665$  з відхиленням не більше  $\pm 1,1\%$  (див. табл. 3.7. дисертації). Характер зміни  $m_{вих}^*$  аналогічний (див. залежність (Ф.2)).

Після обробки експериментальних даних отримані оптимальні значення  $U_k^{opt}$  які також, як і  $U_n^{opt}$  залежать від комплексної характеристики фаршу ( $K_B$ ). Математична обробка даних експериментів дозволила отримати наступну залежність:

$$U_k^{opt} = K_\phi \cdot K_{m.u.} \cdot K_c \cdot \exp(1,71K_B + 0,328), \quad (\text{Ф.5})$$

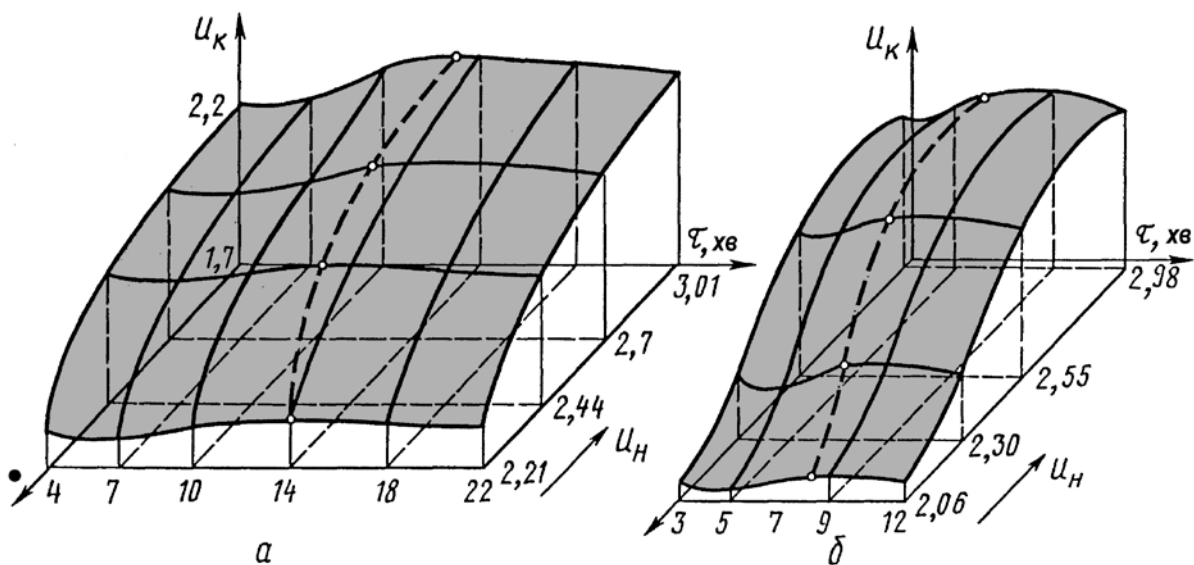


Рис. Ф.2 – Залежність вологовмісту готових виробів від початкового вологовмісту і тривалості подрібнення на кутері: а - малої; б - великої моделі

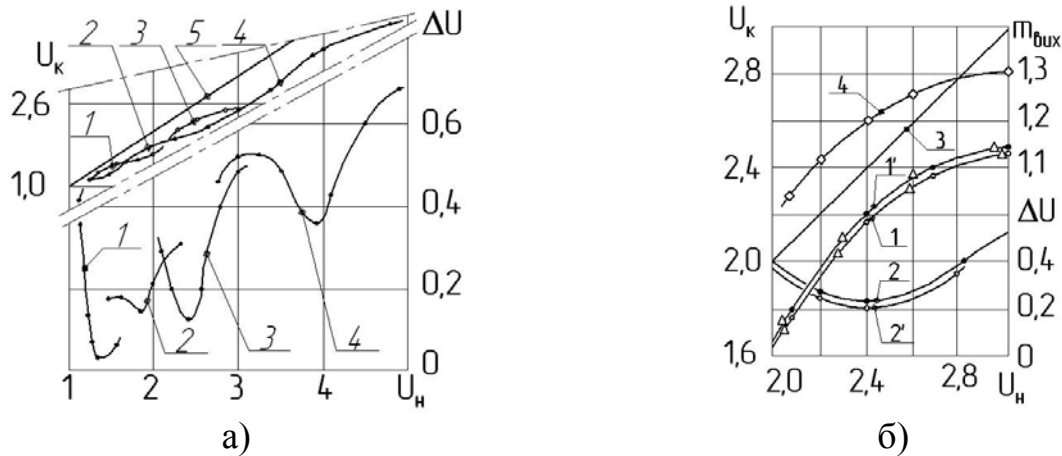


Рис. Ф.3 – Залежності вологовмісту, виходу готових ковбасних виробів і різниці вологовмісту сирого фаршу і готових виробів при екстремальній тривалості кутерування від вологовмісту фаршу: а – для різних видів ковбасних виробів: 1 – свинячих сардельок; 2 – докторської ковбаси; 3 – сардельок російських; 4 – сардельок яловичих; б – для російських сосисок: 1,1' - вологовміст сосисок; 2,2' - різниця вологовмісту; 3 – лінія однакового початкового і кінцевого вологовмісту; 4 – вихід готової продукції при постійній вологості м'ясної сировини

де  $K_\phi$  - коефіцієнт, залежний від форми подрібненої частки (для кулястої форми, що отримується на кутері  $K_\phi = 1$ );  $K_{m.u.}$  - коефіцієнт, залежний від виду термообробки (у пароварочній камері за жирності фаршу від 0 до 0,40 -  $K_{m.u.} = 1$ );  $K_c$  - коефіцієнт, залежний від термічного стану сировини (охолоджена -  $K_c = 1$ , розморожена -  $K_c = 0,9$ ).

Відхилення експериментальних даних від обчислених за рівнянням (Ф.5) не перевищує 1%. Мінімальну величину  $m_{\text{ж}}$  знаходимо за залежністю (Ф.3), підставляючи до неї оптимальні значення вологовмісту фаршу і готових виробів. Для фаршів з різним хімічним складом співвідношення втрат вологи ( $m_w$ ) і жиру ( $m_\phi$ ) різні і можуть бути визначені за наступними формулами:

$$m_{\text{ж}} = m_w + m_\phi \quad (\text{Ф.6})$$

$$m_\phi = K_\phi \cdot m_{\text{ж}} \quad (\text{Ф.7})$$

де  $K_\phi$  - коефіцієнт, залежний від хімічного складу фаршу.

На підставі експериментальних даних отримана формула для визначення  $K_\phi$ :

$$K_\phi = \exp[-(2,92K_B + 0,8)] \quad (\text{Ф.8})$$

Оптимальну дійсну вологість  $W_{\text{к.д.}}^{\text{opt}}$  і жирність  $\phi_{\text{к.д.}}^{\text{opt}}$  готових ковбасних виробів можна визначити за наступними формулами:

$$W_{\text{к.д.}}^{\text{opt}} = [W_n - (m_{\text{ж}} + m_\phi)] / (1 - m_{\text{ж}}), \quad (\text{Ф.9})$$

$$\varphi_{к.д.}^{онт} = (\varphi_n - m_\varphi) / (1 - m_{жс}) \quad (\Phi.10)$$

Важливою характеристикою готових виробів є їх консистенція. Найбільш об'єктивними показниками консистенції готових ковбасних виробів є зусилля і робота зрізу і зминання (рис. Ф.4) [1]. Напруження зрізу готового продукту, подібно до ГНЗ сирого фаршу, досягає максимального значення ( $\sigma_e$ ) при конкретній тривалості подрібнення ( $\tau_{к.е.}$ ).

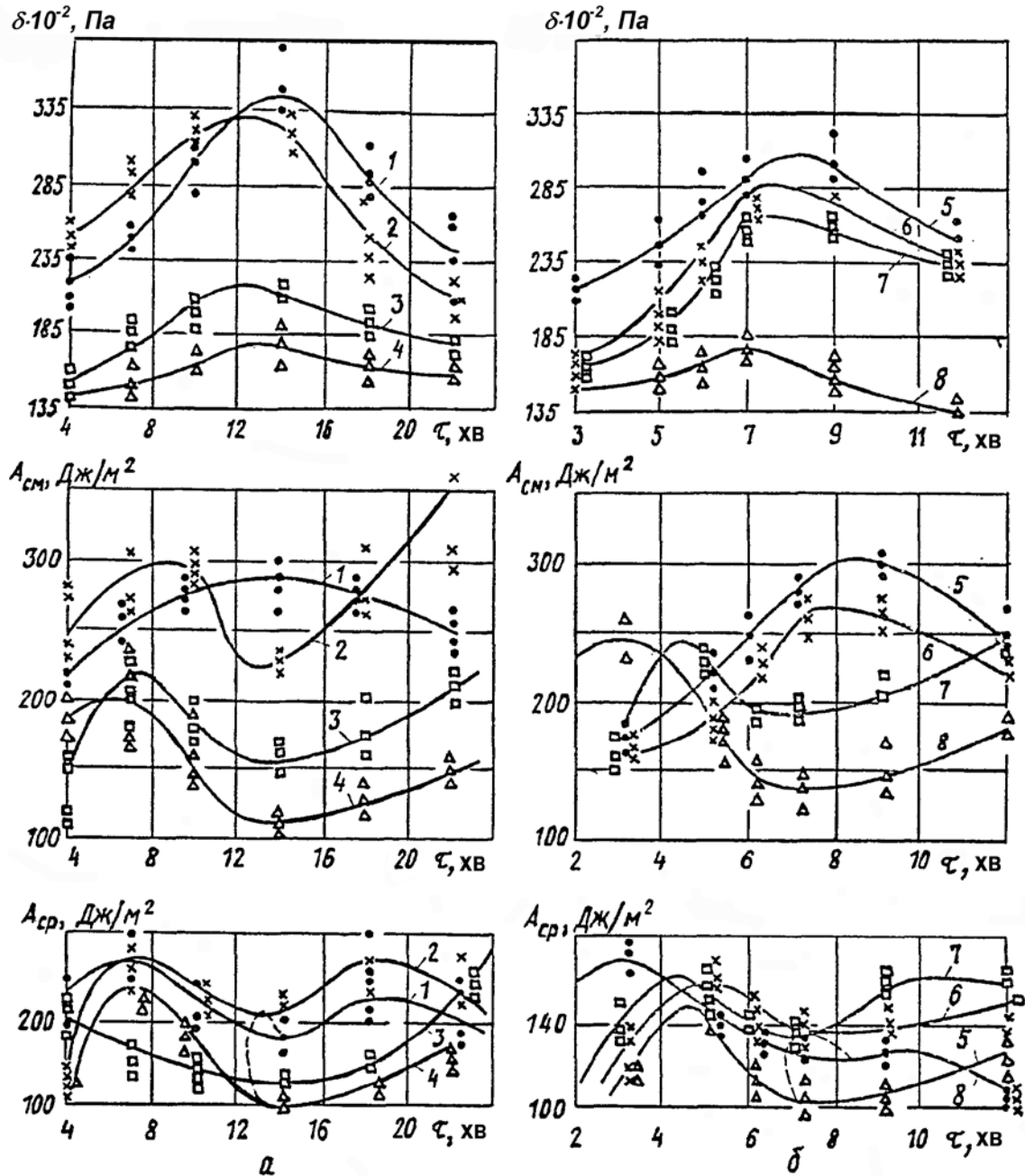


Рис. Ф.4 – Залежність граничного напруження зрізу, питомої роботи зминання і зрізу від тривалості кутерування: а - на малій моделі кутера фаршу з різним вологовмістом і жирністю: 1 -  $U_n = 2,21$ ,  $\varphi_n = 0,188$ ; 2 -  $U_n = 2,44$ ,  $\varphi_n = 0,148$ ; 3 -  $U_n = 2,7$ ,  $\varphi_n = 0,127$ ; 4 -  $U_n = 3,01$ ,  $\varphi_n = 0,111$ ; б - на великій моделі кутера : 5 -  $U_n = 2,08$ ,  $\varphi_n = 0,183$ ; 6 -  $U_n = 2,30$ ,  $\varphi_n = 0,158$ ; 7 -  $U_n = 2,55$ ,  $\varphi_n = 0,154$ ; 8 -  $U_n = 2,98$ ,  $\varphi_n = 0,113$

Структура фаршу при нагріванні з коагуляційної переходить у конденсаційно - кристалізаційну, проте міцність останньої обумовлена міцністю першої і здатністю денатурованих білків утримувати воду. Зміна відносної міцності зсуву ( $\sigma/\sigma_e$ ) залежить від відносної тривалості подрібнення і описується формулою:

$$\sigma/\sigma_e = 1 - 0,4 \left| \tau_k / \tau_{k.e.} - 1 \right| \quad (\Phi.11)$$

При збільшенні вологовмісту готового продукту максимальне напруження зрізу, знайдене при  $\tau_{k.e.}$ , зменшується. Точка перегину темпу зміни  $\sigma_e$  від  $U_k$  або  $U_n$  практично співпадає зі значенням оптимального вологовмісту, знайденого дослідним шляхом при визначенні  $\Delta U$  і  $m_{вих}^*$ . На підставі експериментальних даних отримана залежність зміни  $\sigma_e$  для ковбасних виробів від їх  $U_k$  і  $\varphi_k$ :

$$\sigma_e = K_\sigma \cdot K_{т\sigma} \cdot \exp[3 - (7,35 \cdot \varphi_k - 0,3)U_k] \quad (\Phi.12)$$

де  $K_\sigma$  - коефіцієнт, що характеризує якість подрібненого фаршу, залежний від типу і конструкції машин (для кутера  $K_\sigma = 10^4$ );  $K_{т\sigma}$  - коефіцієнт, залежний від способу термообробки (у пароварочній камері  $K_{т\sigma} = 1$ )

Відхилення розрахункових даних від експериментальних не перевищує  $\pm 5\%$ .

Робота зминання  $A_{см}$  фаршу, яка залежить від тривалості подрібнення (рис. Ф.4), має екстремальні значення при  $\tau_{k.e.}$ . Функція  $A_{см}(U)$  має точку перегину при оптимальних значеннях вологовмісту фаршу і готових виробів. Екстремальні величини  $A_{см}$  зразків виготовлених з фаршу, отриманого на кутерах малої і великої моделі, однакові (рис. Ф.5).

Робота зрізу ( $A_{ср}$ ) на відміну від  $A_{см}$  при  $\tau_{k.e.}$  і будь якому вологовмісті має найменше значення  $A_{ср.e.}$ . При відхиленні  $\tau_k$  від  $\tau_{k.e.}$  (рис. Ф.4)  $A_{ср}$  збільшується. Робота зрізу зразка з фаршу, отриманого на кутері малої моделі, значно більша, чим на кутері великої моделі, особливо при  $U_i < 2,22$ . Це пояснюється тим, що у першому випадку сполучна тканина подрібнюється гірше. У області  $U_n > 2,3 - 2,4$  робота зрізу продукту в обох випадках однакова. При збільшенні вологовмісту  $A_{ср.e.}$  зростає, досягаючи найбільшого значення при  $U_k^{onm}$  і  $U_n^{onm}$ , а потім зменшується (рис. Ф.5). При  $U_n = U_n^{onm}$  волога найміцніше пов'язана з продуктом, хоча міцність структури не є максимальною.

При  $U_n > U_n^{onm}$  відділення рідини збільшується. Під дією зусилля стискаються пори продукту і виділяється вільна волога. Дійсна товщина і площа зразка до моменту початку зрізу тим менша, чим більше відокремилася рідини і більше ущільнені пори.

Характерним для усіх залежностей механічних параметрів від початкового і кінцевого вологовмісту є найбільше їх зближення при  $U_n^{opt}$  і  $U_k^{opt}$ ; при менших і більших значеннях  $U$  вони розходяться.

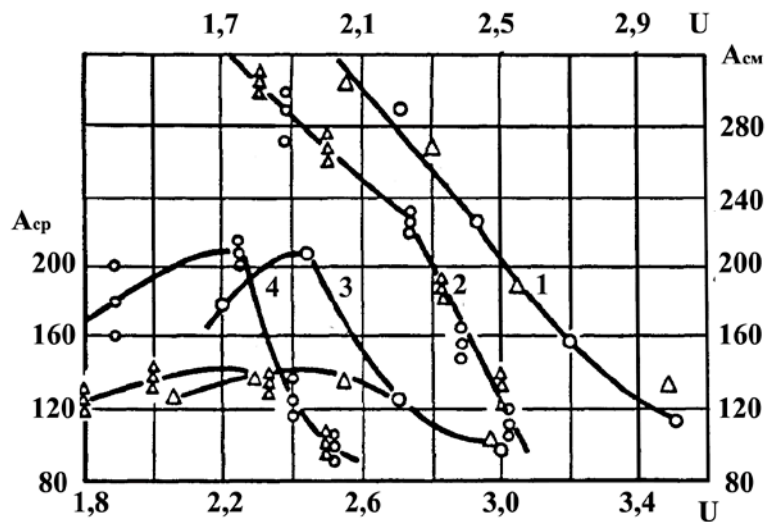


Рис. Ф.5 – Залежність питомої роботи змінання і зрізу від вологовмісту: 1,2 - залежності роботи змінання готового виробу від вологовмісту, відповідно, сирого фаршу і вареної ковбаси; 3,4 - залежності роботи зрізу готового продукту від вологовмісту, відповідно, сирого фаршу і вареної ковбаси

Екстремальні величини загальної роботи  $A_{общ}$ , рівної сумі робіт  $A_{см}$  і  $A_{сп}$ , змінюються залежно від вологовмісту аналогічно напруженню зрізу.

Таким чином, граничне напруження зрізу характеризує міцність структури, яка залежить від якості подрібнення м'язової, сполучної і жирової тканин, а також вологовмісту продукту. Цей параметр легко визначити по діаграмах, і він може служити об'єктивною характеристикою якості продукту у виробничих умовах. Робота сил змінання характеризує деформування і пружність продукту, а при вологовмісті більшому від оптимального значення по ній можна судити про інтенсивність відділення вологи з продукту при стисканні. Робота зрізу характеризує наявність слабкозв'язаної вологи у готовому виробі, якість подрібнення м'язової і сполучної тканин м'яса. Загальна робота змінюється аналогічно напруженню зрізу, і подібно до нього характеризує (за механічними властивостями) якість продукту.

Використовуючи встановлений взаємозв'язок механічних характеристик готових ковбасних виробів з  $\tau_k$ ,  $U_n$  і СМХ фаршу можна змінювати оптимальні властивості відповідно до вимог, що висуваються до готових виробів. Змінюючи СМХ фаршу, на основі об'єктивних критеріїв їх оцінки, можна добитися отримання продукції високої якості. Комплекс СМХ потрібний також для прогнозування властивостей нових видів продуктів, у тому числі і комбінованих, з використанням різних білкових добавок. В умовах

виробництва визначення їх трудомістке і вимагає певних навичок у оператора. Тому для оцінки консистенції готової продукції у виробничих умовах, необхідно вибрати і науково обґрунтувати таку характеристику, яку можна було б вимірювати експрес-методом. Дослідження показали, що такою характеристикою є ступінь пенетрації  $h_n$ . Знаючи  $h_n$  легко розрахувати відносне пенетраційне напруження ( $\theta_n^* = h_n^{-2}$ ) або пенетраційне напруження ( $\theta_n = m_p \cdot g \cdot \theta_n^*$ ), величини яких пропорційні ГНЗ фаршу ( $\theta_o = K \cdot m_p \cdot h^{-2}$ ). При дослідженнях використовували науково-обґрунтований чотирьохголчастий індентор (голки № 10) з масою рухомої частини приладу (включаючи масу індентора і додаткового вантажу)  $m_p = 0,146$  кг. Математична обробка експериментальних даних з визначенням величин  $\theta_i^*$  і  $\theta_i$  в залежності від  $U_k$  і  $\varphi_k$  ковбасних виробів, виготовлених з фаршу із заміною м'яса білковими компонентами до 17%, дозволила отримати рівняння виду:

$$\theta_n^* = K_\sigma \cdot K_{\tau\sigma} \cdot \exp\left[(21\varphi_k - 1,4) - 56\varphi_k^2 \cdot U_k\right], \text{ м}^{-2} \quad (\text{Ф.13})$$

$$\theta_n = m_p \cdot g \cdot \theta_n^* = 0,146 \cdot 9,8 \cdot \theta_n^* = 1,43\theta_n^*, \text{ Па} \quad (\text{Ф.14})$$

За рівнянням (Ф.13) і експериментальними даними, побудували номограму для готових виробів (рис. Ф.6), аналогічну номограмі для сирого фаршу. По ній можна судити про якість готових виробів в залежності від вмісту в них вологи і жиру. Аналіз номограми (рис. Ф.6,а) свідчить про зростання міцністних властивостей ковбас зі збільшенням жирності від 0 до певного значення, який відповідає екстремуму на кривих. Подальше збільшення жирності викликає зменшення міцністних характеристик готового виробу. Збільшення вологовмісту (рис. Ф.6,б) веде до зміщення екстремального значення консистенції у бік зменшення кількості жиру в продукті.

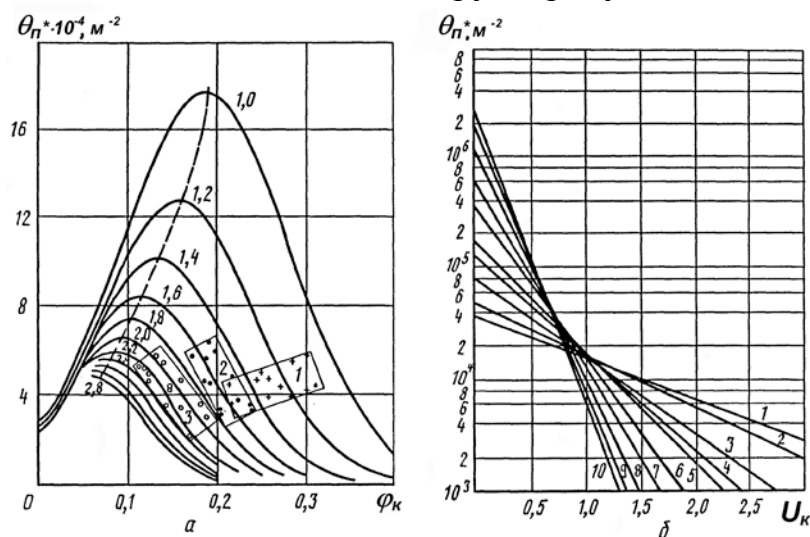


Рис. Ф.6 – Номограми для визначення у виробничих умовах консистенції готових виробів за відносною величиною  $\theta_n^*$  від вологовмісту і жирності: а - прості шкали: 1 - молочні сосиски; 2 - молочна ковбаса; 3 - столова ковбаса; б – напівлогарифмічна шкала, при жирності: 1 – 0,129; 2 – 0,143; 3 – 0,173; 4 – 0,190; 5 – 0,200; 6 – 0,233; 7 – 0,260; 8 – 0,290 9 – 0,315; 10 – 0,326

Використання номограм для сирого фаршу і готових виробів забезпечує отримання ковбас з оптимальними властивостями. Метод отримання готових виробів з оптимальними технологічними характеристиками передбачає вимірювання консистенції фаршу, зіставлення її з еталонними показниками по номограмі для фаршу, внесення змін у процес фаршеприготування, термообробку фаршу в оболонці, вимір консистенції готових виробів і порівняння її з еталонними характеристиками, отриманими за номограмою для готових виробів. Практичне використання розглянутого методу ще більш доцільне за умови швидкого вимірювання вмісту вологи і жиру в сировині і фарші. В результаті досліджень встановлена аналогія зміни технологічних і реологічних характеристик готових виробів і сирого фаршу, причому їх оптимальні (екстремальні) величини припадають на однакові значення змінних. Отже, за оптимальними параметрами ковбасного фаршу можна контролювати еталонні характеристики різних видів ковбас. Це дозволяє прогнозувати властивості готових виробів, знаючи характеристики сирого фаршу. Основні еталонні характеристики для більшості видів фаршу і готових ковбасних виробів, розраховані за отриманими залежностями і перевірені у виробничих умовах, приведені в табл. Ф.1.

Таблиця Ф.1 – Основні еталонні характеристики фаршу (подрібненого на кутері) і ковбасних виробів

Ковбасні вироби	$K_B$ (3.106)	$\frac{U_n^{onm}}{W_t^{i\delta}}$	$\varphi_n^{onm}$	$\theta_o^n$ , Па (3.119)	$U_k^{onm}$ (Ф.5)	$m_W \cdot 10^2$ (Ф.6)	$m_\phi \cdot 10^3$ (Ф.7)	$\frac{U_{к.д.}^{onm}}{W_{к.д.}^{onm}}$ (Ф.9)	$\varphi_{к.д.}^{onm}$ (Ф.10)	$\sigma_e$ , Па (Ф.12)	$\theta_n$ , Па (Ф.14)
Яловичі сардельки	0,925	$\frac{3,888}{0,796}$	0,106	388	3,503	7,66	2,4	$\frac{3,545}{0,780}$	0,112	31010	3070
Дієтична ковбаса	0,808	$\frac{3,165}{0,760}$	0,130	435	2,868	6,80	3,0	$\frac{2,922}{0,745}$	0,137	25450	2910
Російські сосиски	0,652	$\frac{2,405}{0,706}$	0,178	414	2,197	5,69	4,1	$\frac{2,226}{0,690}$	0,185	18780	2408
Столова ковбаса	0,523	$\frac{1,916}{0,655}$	0,220	403	1,762	4,78	5,2	$\frac{1,873}{0,652}$	0,227	15480	1860
Молочна ковбаса	0,510	$\frac{1,873}{0,642}$	0,230	447	1,723	4,67	5,3	$\frac{1,778}{0,640}$	0,237	15640	1905
Докторська ковбаса	0,493	$\frac{1,818}{0,643}$	0,239	426	1,674	4,46	5,4	$\frac{1,703}{0,630}$	0,246	15470	1925
Свиняча І с ковбаса	0,460	$\frac{1,715}{0,632}$	0,252	347	1,582	4,33	5,7	$\frac{1,632}{0,620}$	0,259	14830	1768
Свинячі сардельки	0,317	$\frac{1,334}{0,572}$	0,325	267	1,239	3,37	7,3	$\frac{1,326}{0,570}$	0,331	12450	1080

## Ф.2. Ковбаси з фаршу, приготовленого комплексним подрібненням на кутері і колоїдному млині

Цей метод подрібнення застосовують, в основному, при отриманні гомогенного продукту, наприклад, сосисок, продуктів дитячого харчування



тощо. Використання двох типів машин дозволяє скоротити тривалість подрібнення фаршу та збільшити продуктивність процесу.

В якості об'єктів дослідження вибрано два види ковбасних виробів: традиційні російські сосиски і ковбаса нова дослідна з використанням жирної яловичини (див. підрозділ 3.5.5). Фарш для російських сосисок і нової дослідної ковбаси готували на кутері з подальшим подрібненням на колоїдному млині.

Основні технологічні і фізико-механічні характеристики готових виробів змінюються аналогічно розглянутим вище. Екстремальні характеристики готових виробів подані на рис. Ф.7, по них визначаються еталонні показники для цього виду ковбасних виробів (табл. Ф.2).

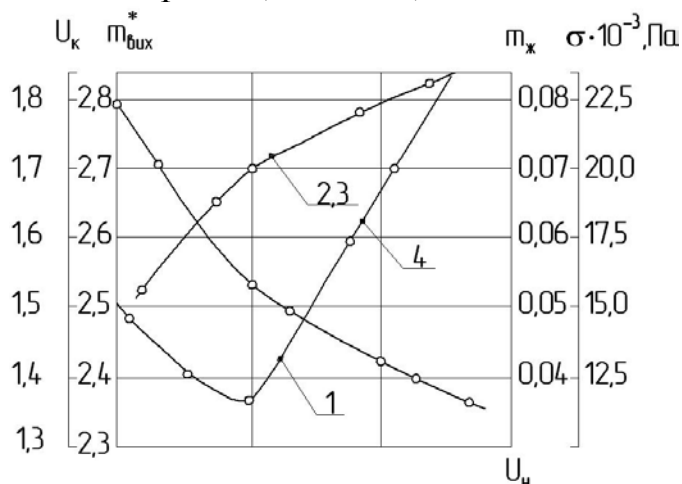


Рис. Ф.7 – Зміна екстремальних характеристик готової ковбаси від вологовмісту: 1 -  $m_{ж}$ ; 2,3 -  $U_k, m_{вих}^*$ ; 4 -  $\sigma$

Таблиця Ф.2 – Еталонні характеристики ковбасних виробів з фаршу, подрібненого на кутері з використанням колоїдного млина

Ковбасні вироби	$W_n$	$U_n$	$m_{ж}$	$W_k$	$U_k$	$m_{вих}^*$	$\Delta U$	$\sigma \cdot 10^{-3}$
Нова ковбаса	0,643	1,80	0,036	0,63	1,70	2,70	0,1	16,3
Російські сосиски	0,708	2,42	0,060	0,69	2,22	3,22	0,20	20,2

Використання двох видів машин (кутера і колоїдного млина) дозволяє скоротити тривалість подрібнення, а величини еталонних характеристик готових ковбасних виробів залишаються такими ж, як і при подрібненні на одній з вибраних машин.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Горбатов А.В. Влияние длительности куттерования и влажности на технологические характеристики фарша и готовых изделий / А.В.Горбатов, В.Д. Косой, Б.Т.Спирин [Текст]/. - М.: ЦНИИТЭИмясомолпром, 1989, с.3-13; 30-49.
2. Горбатов А.В. Реология мясных и молочных продуктов: [Текст] / А.В. Горбатов. . - М.: Пищ. пром-сть, 1999. - 384 с.

### Методи диспергування твердих тіл

На рис. X.1 приведені три основні методи силового впливу на матеріал і їх окремі випадки прояву, реалізовані на сьогодні або можливі до реалізації, що викликають плоский або лінійний напружений стан.

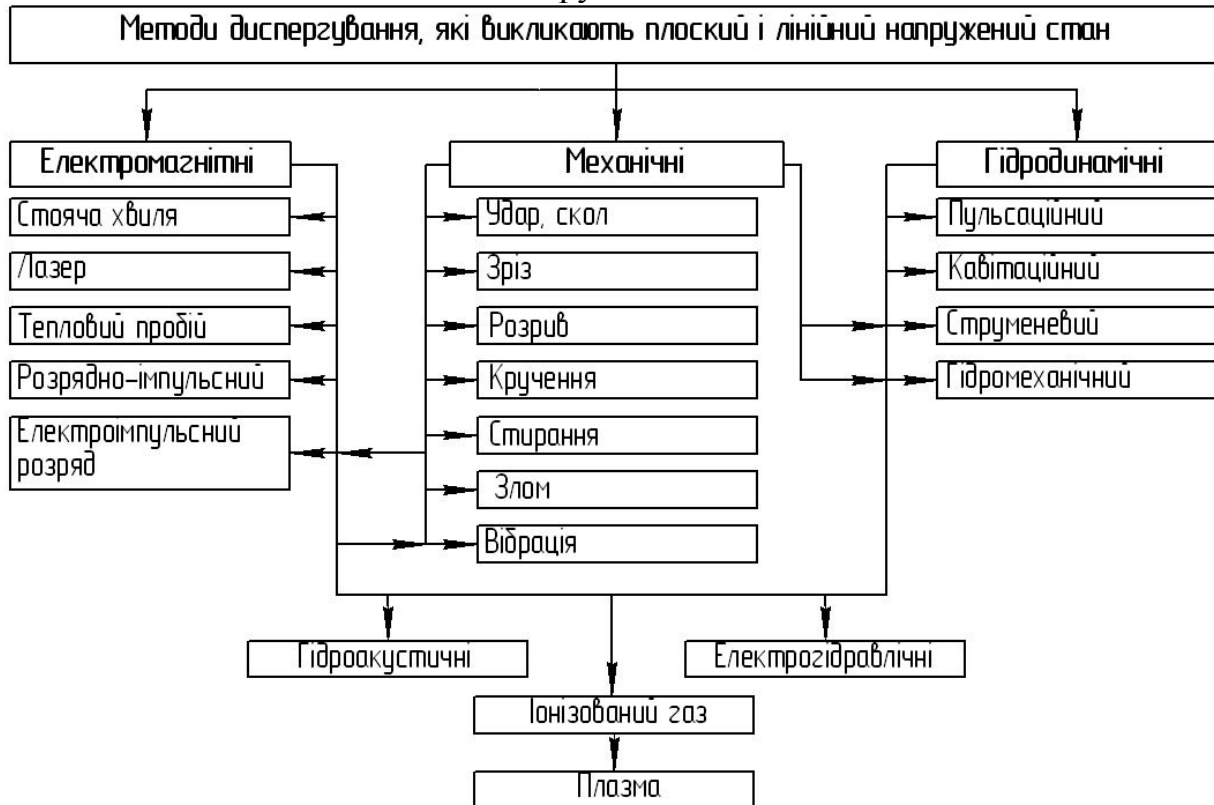


Рис. X.1 – Класифікація способів диспергування матеріалів за видом напруженого стану і методами зовнішнього впливу, що викликають плоский або лінійний напружений стан

Подальший розвиток способів руйнування цієї класифікаційної групи можливий комбінуванням указаних методів.

Другу велику групу процесів диспергування складають методи, що викликають об'ємний напружений стан у руйнованому матеріалі рис. X.2.

Об'ємний напружений стан може бути викликаний практично будь-якою силовою дією, наприклад, усебічним механічним стисканням або електрогідравлічним ударом. Тому на рис. X.2 деталізовані тільки ті види силової дії, які не призводять до лінійного або плоского напруженого стану. Багато методів добре відомі і давно застосовуються в промисловості, інші, наприклад, електродіаліз відомі, але для цілей диспергування і руйнування не застосовуються. Хоча, добре відомо, що при набряканні колоїдних і капілярно-пористих структур в результаті осмосу вологи (розчинника) через напівпроникну мембрану структуротворних клітин розвивається колосальне напруження. При накладенні електромагнітного поля явище осмосу можна значно прискорити - це і є електродіаліз.

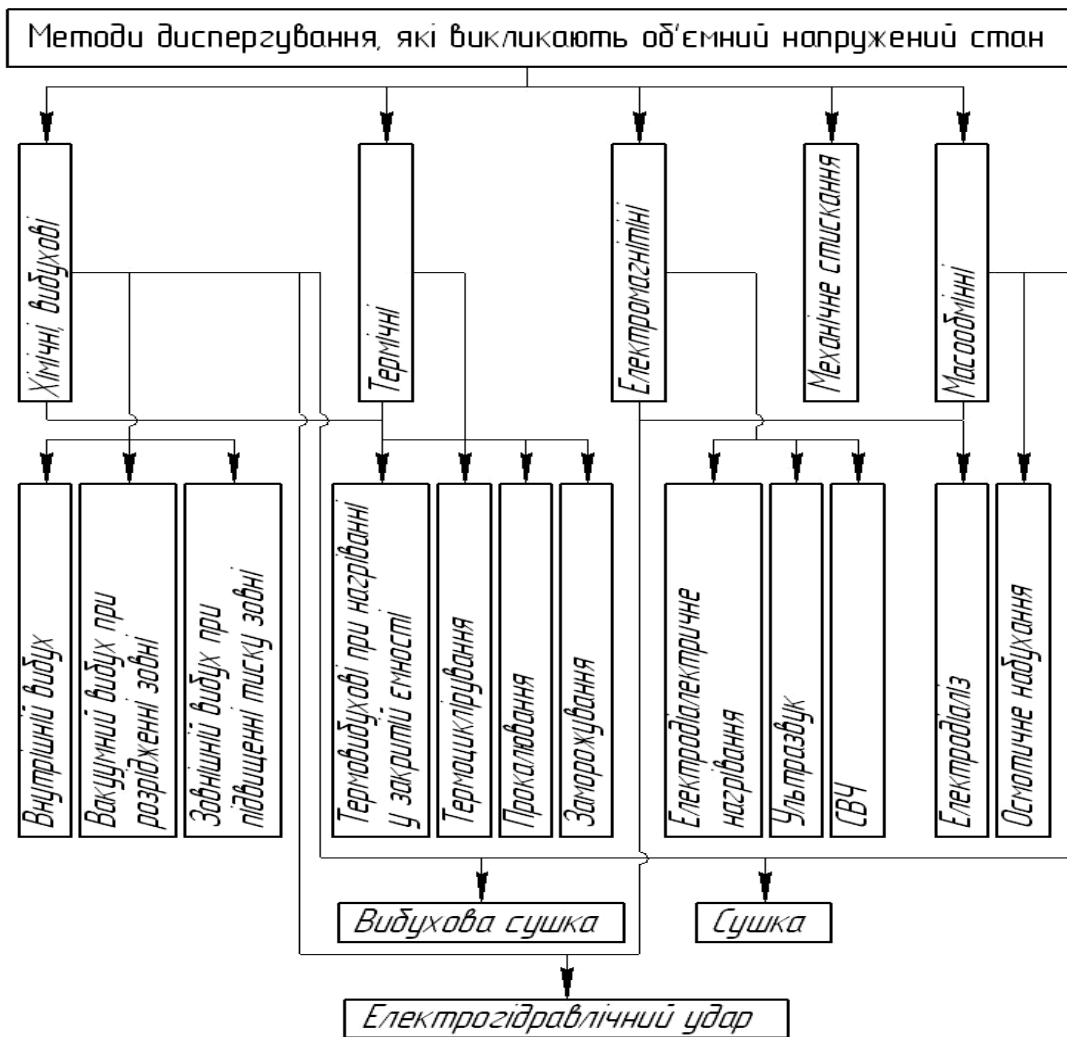


Рис. X.2 – Класифікація способів диспергування матеріалів за видом напруженого стану і методами зовнішнього впливу, що викликають об'ємний напружений стан

Основним способом обробки матеріалів все ж залишається механічне подрібнення. Величезне різноманіття конструкцій подрібнювальних машин свідчить не лише про творчий пошук їх творців, але і про відсутність єдиного підходу до створення і проектування нового устаткування (див. розділ 1). На наш погляд, такий однозначний підхід може забезпечити проста і наочна класифікація, яка аналізує механізм навантаження одиначної частини руйнованого матеріалу.

До недавнього часу до способів механічного руйнування відносили лише удар, стирання, розчавлювання, розколювання, розпилювання та різні їх видозміни.

При аналізі машин з різною кінематикою найзручніше оперувати не поняттям способу навантаження, наприклад злам, а поняттям механізму напруженого стану - згин. При цьому з'являється можливість абстрагування від окремих проявів конкретного стану і, на основі простих структурних схем, здійснювати моделювання і синтез різних напружених станів.

Оперуючи поняттями опору матеріалів, основними напруженими станами матеріалу можуть бути: стискання (розчавлювання), розтягування (розривання),

згинання (злам), кручення (скручування), зсув (зріз, стирання). При такій класифікації залишаються поза нею такі способи руйнування, як удар і розкол. Проте, при силовому аналізі цих способів легко виявити, що від розчавлювання вони відрізняються: вільний удар - замикання силового ланцюга здійснюється інерційними силами самого матеріалу, розкол - вид зосередження стискання.

Напруження, які розвиваються в матеріалі, залежать не лише від виду напруженого стану, але і від характеру зміни навантаження, що розвивається в часі. Стискання кускового матеріалу може здійснюватися статично і динамічно. При статичному навантаженні швидкість зміни зусилля в часі надзвичайно мала і прагне до нуля  $dF/d\tau \rightarrow 0$ . При динамічному,  $dF/d\tau \rightarrow \infty$ . При повільному навантаженні більшість матеріалів витримують колосальні навантаження до руйнування, що в 10-40 разів перевищують зусилля розривання.

Високошвидкісне динамічне навантаження формує в об'ємі матеріалу хвилю стискання, а відбита або зворотня хвиля викликатиме в матеріалі розтягування. В цьому випадку релаксації (зменшення в часі) напруження не відбувається, і руйнування настає при набагато менших зусиллях. При динамічній дії в матеріалі також можуть формуватися усі види напруженого стану. Це всебічне динамічне стискання (зовнішній об'ємний вибух) або розтягування (внутрішній вибух). Локальне стискання або удар (вільний - в зваженому стані або обмежений - у разі обмеження руху матеріалу). Динамічний згин (ударне навантаження двоопорної балки) або високошвидкісний зсув (розрубування, розтин тощо). Такі ж напруження зсуву формуються, якщо динамічна сила спрямована по дотичній до поверхні матеріалу, а руйнування називається стиранням.

Динамічне розосереджене стискання в техніці зустрічається в пресах. Технічна реалізація зосередженого стискання або розколювання спостерігається при дії на матеріал в промислових млинах або дробарках ударної дії, де реалізується принцип зосередженого стискання або удару. Це, передусім, молоткові млини, дезінтегратори, роторні і роторно-ланцюгові дробарки. Розколювання формується в шоківих дробарках, гідравлічних і механічних колунах.

Руйнування тертям спостерігається при дії на матеріал будь-яким абразивним інструментом: диском картоплечистки або декою при шліфуванні крупи. У подрібнювальних агрегатах стирання часто виступає як супутній процес разом з ударом або розчавлюванням, наприклад, у барабанних млинах самоподрібнення або багатовалкових терках, роторних терках тощо.

Напружений стан вигинання формується при стисканні або ударі по шматку матеріалу, встановленого на двох опорах, наприклад, в шоківих дробарках зі зміщеними рифлями, або в зубчастих валкових дробарках, якщо зуби розташовані за принципом шпилька-паз. Удар у вільному стані по довгомірному шматку в центрі або двома молотками одночасно по краях, також формує напруження вигинання.

Кручення, як метод подрібнення, нині практично не використовується, хоча спостерігається в різних деталях машин і в змішувачах. Разом із зсувом матеріал піддається і крутильному напруженню.

Навантаження зсуву формується при дії різальним інструментом – ножем або пилкою.

Особливим видом динамічної силової дії є вібраційне навантаження силою змінної амплітуди (рис. X.3,а). Величина діючої сили в часі  $t$  може змінюватися від нуля до деякого максимального значення (рис. X.3,а)

$$F = F_0 + F_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (X.1)$$

або мінятися за величиною і напрямом, тобто мати знакозмінний характер (рис. X.3, б)

$$F = F_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (X.2)$$

Коливання в реальних динамічних системах, в результаті дії сил опору, носять затухаючий характер і змінюються за складнішим законом

$$F = F_0 \cdot \exp(-\delta \cdot t) \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (X.3)$$

де  $F_0$  - амплітудне значення зусилля, Н;  $\omega$  - циклічна частота коливань, 1/с;  $\varphi$  - початкова фаза коливань, град;  $\delta$  - коефіцієнт загасання коливань, 1/с.

Безпосередньо з коефіцієнтом загасання  $\delta$  пов'язано поняття часу релаксації  $\tau$ , тобто проміжку часу, впродовж якого амплітуда затухаючих коливань зменшується у  $e$  разів

$$\tau = 1/\delta \quad (X.4)$$

У будь-якому випадку характер напружень, які розвиваються в матеріалі при динамічній знакозмінній дії не порівнянний ні з одним з вищеперерахованих випадків, і може бути визначений як вібронапружений стан. Суперпозиція (накладання) прямих і зворотних хвиль призводить до локального складання або віднімання амплітуд динамічного навантаження, внаслідок чого з кроком, близьким до довжини хвилі  $\lambda$ , виникають зони подвоєного напруження.

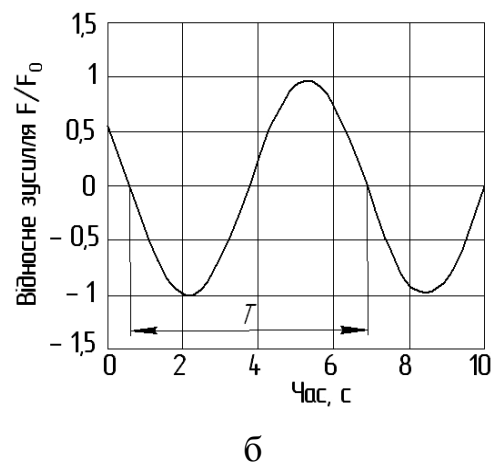
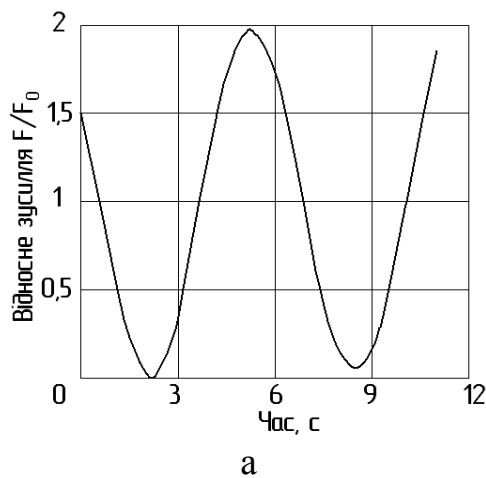


Рис. X.3 – Характер зміни зусилля при динамічному навантаженні зі змінною (а) і знакозмінною амплітудами (б)

$$\lambda = v \cdot \Delta \quad (X.5)$$

де  $\nu$  - швидкість поширення хвиль в твердому тілі (ця швидкість близька до швидкості поширення звуку в твердому тілі в поздовжньому і поперечному напрямках), м/с;

$T$  - період коливань, с.

Це дозволяє досягати граничного напруження руйнування навіть у разі дії сили меншої інтенсивності, порівняно із статичним навантаженням.

Найбільшого результату можна добитися при дії сили на руйноване тіло з частотою близькою до частоти власних коливань. У цьому випадку спостерігається явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань, тобто резонанс. Якщо тіло, має пружні властивості, то власна частота коливань дорівнює

$$\omega_0 = \sqrt{k/m} \quad (\text{X.6})$$

де  $k$  - коефіцієнт пружності тіла, Па;  $m$  — маса тіла, кг

Для затухаючих коливань резонансна частота зовнішньої сили буде рівна

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2} \quad (\text{X.7})$$

Вібраційне навантаження можливе практично при всіх видах механічної дії, зокрема в колоїдних млинах під дією кавітації [1].

## ЛІТЕРАТУРА

1. Романов А.А. Механизация производства рыбной продукции: [Текст] / А.А. Романов . - М.: Пищевая промышленность, 1994. - 171 с.
2. Сухенко В.Ю. Моделирование процесів подрібнення м'яса і синтез технологічних машин: [Монографія] / В.Ю. Сухенко. - Київ: ТОВ ЦП "Компринт", 2013. - 227с.

### Формування тріщин при подрібненні м'яса

Велике практичне значення має зміщення виду 1, що спостерігається при відривному русі берегів тріщин. При цьому виді деформації береги тріщин зміщуються відносно свого початкового положення у площинах, паралельних площинам  $YX$  і  $XZ$ . При ковзанні берегів тріщини у напрямі осі  $OX$  в околицях вершини тріщини виникають поля напружень, відповідні деформації типу II - поперечного зміщення.

При зміщенні берегів тріщини паралельно площині  $XZ$  в протилежні напрямки по осі  $Z$  (антиплоска деформація) має місце деформація типу III. Таке зміщення називається поздовжнім зміщенням і спостерігається при розрізанні тіл ножицями [1].

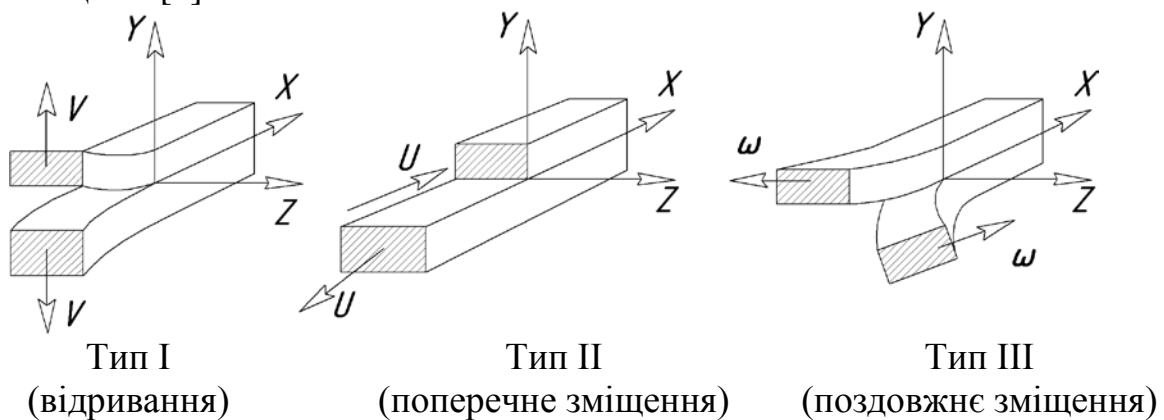


Рис. Ц.1 – Три основні типи зміщення берегів тріщин при руйнуванні матеріалів

Якщо помістити точку початку полярних координат  $r$  і  $\theta$  у вершині тріщини (рис. Ц.2,а) і подати напружений стан елементарного об'єму тіла в області вершини тріщини відповідно до рис. Ц.2,б, то напружений стан і переміщення елементарного об'єму в довільній точці  $M$  при руйнуванні тіла за типом I (відривне руйнування) описується рівняннями математичної теорії тріщин [1]:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{K_1}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_y &= \frac{K_1}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \cos \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_z &= \mu \cdot (\sigma_x + \sigma_y)\end{aligned}\quad (\text{Ц.1})$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2}; \quad \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (\text{Ц.2})$$

$$U = \frac{K_1}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - 2\mu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (\text{Ц.3})$$

$$V = \frac{K_I}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \left( 1 - 2\mu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (\text{Ц.4})$$

де  $K_I$  - коефіцієнт інтенсивності напружень в даній точці об'єму, прилеглому до вершини тріщини;

$r$  - відстань від вершини тріщини до точки  $M$ ;

$\theta$  - кут між віссю  $X$  і радіус-вектором  $r$ .

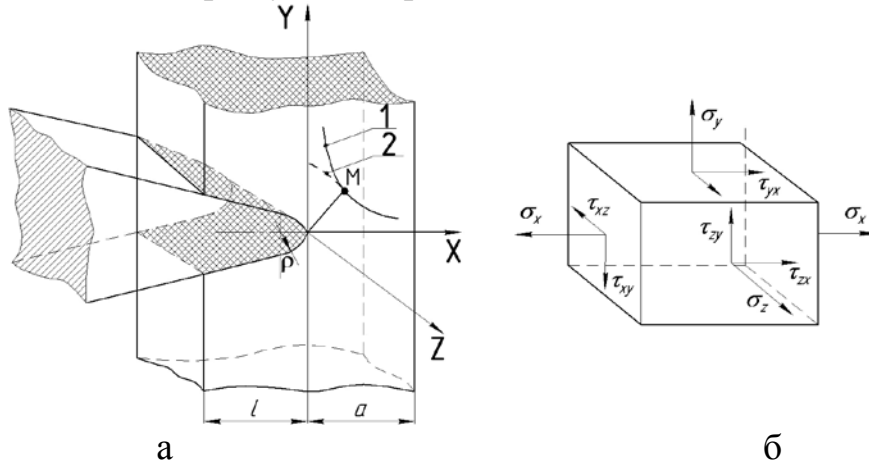


Рис. Ц.2 – Схема розподілу напружень вздовж осі  $X$  при утворенні крайової тріщини методом відривання

У разі дії розтягуючих напружень, розподілених уздовж осі  $X$  ( $Y=0$ ), їх величина дорівнює:

$$\sigma_y = K_I / \sqrt{2\pi \cdot X} \quad (\text{Ц.5})$$

Аналогічні рівняння отримані для визначення напружень і переміщень в об'ємах, прилеглих до тріщин при II і III типах зміщення берегів тріщин. Для III типу зміщення берегів тріщини ці рівняння, наприклад, мають вигляд [2, 3]:

$$\begin{aligned} \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 0 \\ \tau_{xz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \quad \tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \end{aligned} \quad (\text{Ц.6})$$

$$\omega = \frac{K_{III}}{G} \cdot \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \cdot \sin \frac{\theta}{2},$$

де  $K_{III}$  - коефіцієнт інтенсивності напружень для III типу зміщень берегів тріщин.

Коефіцієнт інтенсивності напружень може бути визначений через коефіцієнт концентрації напружень  $K$  в околиці вершини надрізу, якщо радіус округлення  $\rho$  вершини надрізу (див. рис. Ц.2) наближається до нуля [1, 5]:

$$K_I = 0,5 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \sigma_{\max} \cdot \sqrt{\rho} = 0,5 \cdot \sqrt{\pi \rho} \cdot \sigma_{\text{ном}} \quad (\text{Ц.7})$$

де  $\sigma_{\max}$  - напруження у вершині надрізу;

$\sigma_{\min}$  - величина розтягуючих напружень у вершині надрізу.



Рівняння (Ц.1) має сингулярний член  $1/\sqrt{r}$  і при його рішенні отримуємо, що величина розтягуючого (зсувного) напруження в області вершини тріщини прагне до нескінченності (крива 1, рис. Ц.2, а). Це означає, що руйнування (розрізання) тіла в області, прилеглої до вершини тріщини, настає при будь-якій незначній величині зовнішнього зусилля. Умови мимовільного поширення тріщин характерні для порівняно однорідних за структурою крихких тіл, які мають значну внутрішню енергію, наприклад, пружну деформацію, неурівноваженість внутрішнього напруження та ін. чинникам.

Перерозподіл напружень в області тіла, прилеглої до вершини тріщини, можна охарактеризувати коефіцієнтами інтенсивності напружень  $K_I$ ,  $K_{II}$ ,  $K_{III}$  (залежно від характеру навантаження) [4].

### ЛІТЕРАТУРА

1. Kapsalis J. G. Texture Stud: [Текст] / J.G. Kapsalis, T.E. Walker, M.I. Wolf. - 1990. - № 1. - 464 p.
2. Walker P.I., Dickinson E.A. Режущие свойства порошковой быстрорежущей стали с покрытием из TiC. - London: «Towards Improved Performance Tool Mater. Proc. Int. Conf., Teddington, 28-29 Apr., 1991», 1992 - С.89-92.
3. А.с СССР № 686765, кл. В 02 С 18/36. Устройство для обеспечения постоянства усилия затяжки режущего механизма волчка / Андрианов А. С. — 1999.
4. Сухенко В.Ю. Моделивання процесів подрібнення м'яса і синтез технологічних машин: [Монографія] / В.Ю. Сухенко. - Київ: ТОВ ЦП "Компринт", 2013. - 227с.
5. Юрков С.Г. Импульсное резание мясокостного сырья: [Текст] / С.Г. Юрков, Б.В. Кулишев // Мясная индустрия СССР. - 1998. - №9. - С.35-38.

### Складові загальної роботи вільного різання м'яса

Роботу на переборення сил зчеплення структурних зв'язків продукту можна визначити зі співвідношення:

$$A_1 = \sum_{i=1}^n dA_1 = \int_0^l \int_0^{\tau} \sigma_H(l) \cdot dl \cdot V_n \cdot d\tau, \quad (\text{Ш.1})$$

де  $\sigma_H(l)$  - питоме зусилля розривання структурних зв'язків, Н/м;

$l$  – довжина різального леза, м;

$V_n$  – швидкість впровадження різального леза в продукт, м/с;

$\tau$  – час впровадження різального леза в продукт, с.

За міру величини питомого зусилля руйнування структурних зв'язків прийнята середня інтегральна величина зусилля розривання структурних зв'язків, яка може бути найбільш точно визначена емпіричним шляхом.

Швидкість впровадження інструмента в продукт може бути постійною по всій довжині леза і тоді процес схожий на рубання, або змінною при деяких видах ковзного різання. При ударних режимах взаємодії різального інструмента з продуктом сила в зоні контакту зростає стрибкоподібно.

Для наближеної оцінки зусилля в довільний момент перерізання м'ясопродукту дільницю наростання сили можна апроксимувати четвертою частиною синусоїди гармонічного закону навантаження сировини [3].

$$P = P_0 \cdot \sin \omega t, \quad (\text{Ш.2})$$

де  $P_0 = \sigma_H(l) \cdot l$ , - величина сили різання, Н;

$\sigma_H(l)$  - питоме зусилля різання, Н/м;

$l$  – довжина різального леза, що приймає участь у різанні, м;

$\omega$  – поточна величина кутової швидкості, рад/с.

Враховуючи, що девіатор тензора напружень при деформуванні в'язко-пружних тіл пропорційний девіатору тензора переміщень [1, 6] будемо вважати, що переміщення таких тіл при деформуванні перед перерізанням також має гармонічний характер, а тому

$$x = x_0 \cdot \sin(\omega t - \varphi), \quad (\text{Ш.3})$$

де  $x_0$  – шлях, який проходить лезо при зануренні його в продукт перед перерізанням;

$\varphi$  – відставання деформації від фази росту сили.

$\omega$  – поточна величина кутової швидкості різального леза, рад/с.

Робота, яку виконує гармонічна сила на малому переміщенні  $dx$  дорівнює

$$A' = P \cdot \frac{dx}{dt} \cdot dt.$$

Очевидно, що робота на попередню деформацію продукту перед перерізанням при гармонічному законі зміни сили різання дорівнює:

$$\begin{aligned}
A_2 &= \int_0^{\pi/2} P_0 \cdot \sin \omega t \cdot x_0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t - \varphi) \cdot dt = \\
&= P_0 \cdot x_0 \cdot \int_0^{\pi/2} \sin \omega t \cdot \cos(\omega t - \varphi) \cdot d(\omega t) = \\
&= \int_0^{\pi/2} P_0 \cdot x_0 \cdot \sin \omega t \cdot (\cos \omega t \cdot \cos \varphi + \sin \omega t \cdot \sin \varphi) \cdot d(\omega t)
\end{aligned} \tag{Ш.4}$$

Враховуючи, що  $\sin^2 \omega t = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\omega t)$  та інтегруючи рівняння (Ш.4) по частинах

отримаємо: 
$$A_2 = \frac{\pi}{4} \cdot P_0 \cdot x_0 \cdot \sin \varphi. \tag{Ш.5}$$

Величина  $\varphi$  постійна для заданих режимів різання, але вона залежить від швидкості взаємодії різального леза з продуктом. За допомогою метода накатаних сіток (див. додаток КЗ) було встановлено, що для статичних режимів різання  $\varphi = 90^\circ$ , а зі зменшенням швидкості різання  $\varphi$  поступово зменшується і при переміщенні гострого леза з швидкістю більшою за 3...5 м/с величина  $\varphi$  наближається до нуля ( $\varphi \approx 0$ ).

Робота по ущільненню продукту перед перерізанням є змінною величиною. Вона найбільша при статичних режимах різання, коли величина деформації сягає найбільшого значення, і зменшується при збільшенні швидкості різання [2]. Крім того, величина зовнішньої сили, достатня для перерізання продукту, залежить від ряду чинників, зокрема від радіуса заокруглення різального леза. Експериментально встановлено [5], що величина зусилля різання при впровадженні різального леза у продукт поступово збільшується до забезпечення руйнування структурних зв'язків. Робота цієї сили може бути знайдена із співвідношення:

$$A_2 = \sum_{i=1}^n dA_2 = \int_0^{\pi} \sigma_H(\rho, l) \cdot V_n \cdot d\tau \cdot dl, \tag{Ш.6}$$

де  $\sigma_H(\rho, l)$  - питома величина лінійної сили перерізання, Н/м;

$\tau$  - термін занурення різального леза до перерізання структурних зв'язків продукту за даних режимів, с;

$l$  - довжина різального леза, м;

$\rho$  - радіус заокруглення леза інструменту, м.

Робота на переміщення боковин продукту при перерізаннях в основному витрачається на деформування прилеглих до зони різання об'ємів. Величина цієї роботи визначається добутком сил, розподілених по робочих гранях клина різального леза, на величину прилеглих до цих граней поверхонь розтину:

$$dA_3 = P_{ij} \cdot V_i \cdot ds \cdot d\tau,$$

або 
$$A_3 = \iint_S \overline{P}_n \cdot \overline{V}_i \cdot d\tau \cdot ds = \iint_S P_{ij} \cdot \overline{n}_j \cdot \overline{V}_i \cdot ds \cdot d\tau, \tag{Ш.7}$$

де  $\overline{V}_i \cdot d\tau$  - величина переміщення поверхні розтину;

$ds$  - елементарна площа на робочій грані клина;

$\overline{P}_n = P_{ij} \cdot n_j$  - величина напружень вповдовж нормалі до бокової грані, викликаючих переміщення поверхні розтину.

Величина роботи на переміщення боковин розтину продукту у загальному випадку дорівнює роботі сил, затраченій на деформування об'єму продукту, що прилягає до зони розтину [4]:

$$A_3 = \iiint_V P_{ij} \cdot \xi_{ij} \cdot d\tau \cdot dV, \quad (\text{Ш.8})$$

де  $\xi_{ij}$  - тензор швидкостей деформацій в об'ємі  $V$ ;

$\xi_{ij} \cdot d\tau$  - тензор деформацій в об'ємі  $V$ .

Враховуючи, що час релаксації напружень значно більший за час контакту інструмента з продуктом, умовно вважаємо, що сили стискання м'ясопродукту лезом інструмента залишаються постійними при подальшому (після занурення леза у продукт) русі різального інструмента у в'язко-пластичному середовищі.

Очевидно, що розподілені сили  $P_{ij}$  викликають при зміщенні бокових поверхонь різального клина відносно продукту сили тертя, які також виконують деяку роботу:

$$A_4 = A_4' + A_4'', \quad (\text{Ш.9})$$

де  $A_4'$  - робота сил тертя продукту по робочих гранях леза;

$A_4''$  - робота сил тертя продукту по бокових гранях тіла різального інструмента.

$$\text{Або} \quad A_4 = 2 \left( \iint_{S_1} f \cdot P_{ij} \cdot n_j \cdot V_i \cdot d\tau \cdot dS_1 + \iint_{S_2} f \cdot P_{ij} \cdot n_j \cdot V_i \cdot d\tau \cdot dS_2 \right), \quad (\text{Ш.10})$$

де  $S_1, S_2$  - площі, відповідно, бокової грані леза і бокової поверхні тіла різального інструмента;

$f \cdot P_{ij} = \sigma_\tau$  - інтенсивність сил тертя ковзання.

Очевидно, що площі  $S_1$  і  $S_2$  залежать від геометричних параметрів інструмента, а довжина  $V_i \cdot d\tau$  взаємного контакту різального інструмента і продукту визначається з урахування площі перетину продукту. Величина  $P_{ij}$  також може бути визначена експериментально. Сили тертя легко визначаються дослідним ляхом в умовах, що відповідають умовам тертя при різанні.

Робота на надання кінетичної енергії відрізанним шматкам продукту визначається з урахуванням їх маси і швидкості руху:

$$A_5 = \iiint_V dA_5 = \iiint_V m_i \cdot V_i \cdot dV \cdot dV = mV_0^2/2, \quad (\text{Ш.11})$$

$V_0$  - швидкість центра маси відрізаного шматочка;  
 $m$  - маса відрізаного шматочка продукту;  
 $V_i$  - швидкість руху  $i$ -го шматочка;  
 $V$  - об'єм шматочка.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Гольберг И.И. Механическое поведение полимерных материалов: [Текст] / И.И. Гольберг. - М.: Химия, 1990. - 190 с.
2. Пелеев А.И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности: [Текст] / А.И. Пелеев. - М.: Пищевая промышленность, 1991. - 519 с.
3. Приборы и системы для измерения вибрации, шума, удара: [Справочник] / Под ред. В.В. Клюева. - М.: Машиностроение, 1998. - В 2-х кн. кн.1. - 448 с.
4. Седов Л.И. Механика сплошной среды: [Текст] / Л.И. Седов. - М.: Наука, 1996. - т.1, т.2. - 576 с.
5. Технологія м'яса і м'ясних продуктів: [Підручник] / М.М. Клименко, Л.Г. Віннікова, І.Г. Береза та ін.; За ред. М.М. Клименка. - К.: Вища освіта, 2006. - 640 с.
6. Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров: пер. с англ. [Текст] / Дж. Ферри. - М.: Издательство иностранной литературы, 1963. - 535 с.
7. Сухенко В.Ю. Енергетичні показники процесу вільного різання м'ясопродуктів для ковбасних виробів [Текст] / В.Ю. Сухенко // Науковий вісник НУБіП України, 2010. Вип. 144 ч.4 серія «Техніка і енергетика АПК» с. 326-334.

### Моделювання руху м'яса і деформування шнека у вовчках

Вважаємо, що механічна система (рис. Ш.1, а), яка складається зі шнека разом з ножем і продуктом, що знаходиться між поверхнею шнека і внутрішньою поверхнею корпусу, має одну ступінь свободи. Це означає, що кінематичні характеристики шнека, ножа і рухомого подрібнюваного продукту повністю визначаються обертальним рухом шнека.

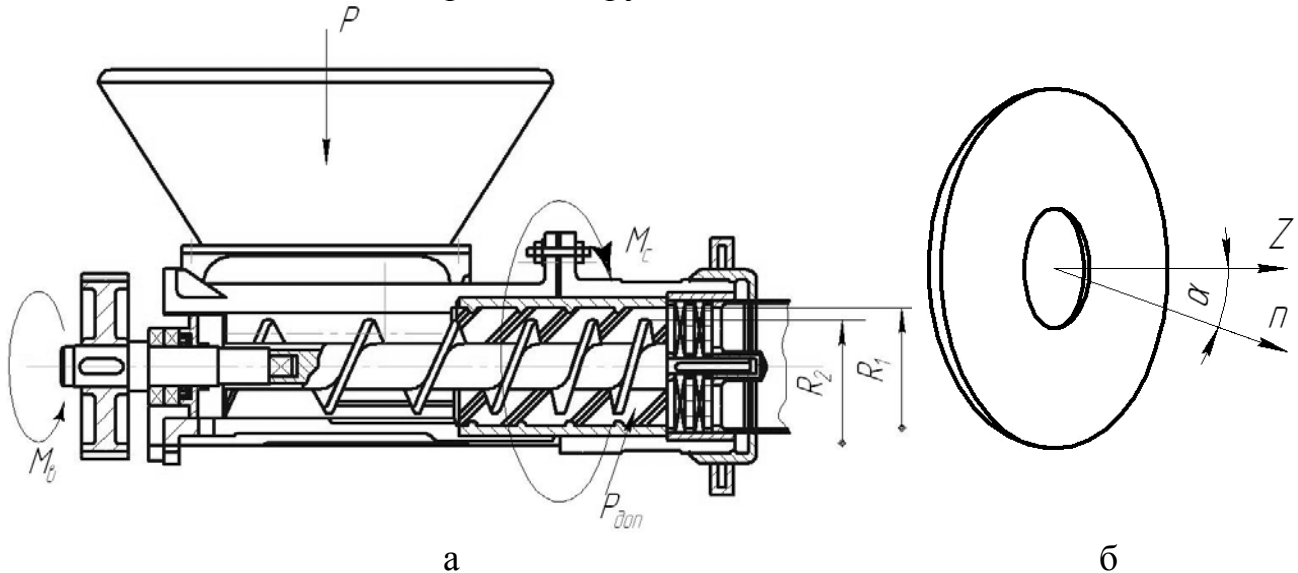


Рис. Ш.1 – Механічна система вовчка (а):  $P$  – тиск на вході у вовчок;  $P_{дон}$  – допустимий тиск перед ґраткою і схема витка шнека (б)

Приймаємо, що процес руху продукту є сталим і баланс силових дій на шнек з боку двигуна і продукту призводить до одного рівняння рівноваги, яке записується за допомогою принципу можливих переміщень для системи з одним ступенем свободи так:

$$(M_g - M_c) \cdot \delta\varphi - (1 - K) \cdot P_{дон} \cdot S_2 \cdot \delta S = 0 \quad (\text{Ш.1})$$

де  $M_g$  - обертовий момент, що прикладається до шнека з боку вовчка, Н·м;  $M_c$  - момент сил опору обертанню, обумовлений наявністю тертя продукту по поверхні шнека при його обертальному русі і опором, що виникає в парі ґратка-ніж, Нм;  $\delta\varphi$  - можливе кутове переміщення шнека навколо вісі  $z$ ;  $(1 - K) \cdot \delta S$  - можливе переміщення продукту уздовж корпусу за наявності обертання продукту навколо вісі  $z$ ;  $K$  - коефіцієнт, що враховує міру втягування продукту в обертальний рух ( $K = 0$  - немає обертального руху продукту,  $K = 1$  - повне втягування продукту в обертальний рух);  $P_{дон}$  - допустимий тиск на продукт перед ґраткою, Па;  $S_2$  - площа перерізу шнека, перпендикулярного осі  $z$ , м<sup>2</sup>;  $\delta S$  - можливе переміщення продукту уздовж корпусу за повної відсутності обертання продукту навколо вісі  $z$ , тобто тільки при його поступальному переміщенні, м.

Визначення залежності коефіцієнта  $K$  від фізичних характеристик м'ясної сировини, геометричних параметрів установки і кутової швидкості обертання шнека має вагоме значення для моделювання процесу витікання продукту. Цей процес матиме найбільшу ефективність при наближенні  $K$  до нуля і, навпаки, найменшу ефективність, якщо величина  $K$  наближається до одиниці. У останньому випадку, як видно з рівняння (Щ.1), зусилля стискування продукту між шнеком і ґратками дорівнює нулю і обертальний момент двигуна  $M_e$  витрачатиметься тільки на подолання опору тертя  $M_c$  при обертанні продукту.

Коефіцієнт  $K$ , який можна назвати коефіцієнтом повертання продукту, в першому наближенні можна визначити як відношення кутової швидкості обертання  $\omega_1(c^{-1})$  продукту на поверхні шнека при  $r=R_2$  (координата  $r$  відлічується від осі  $z$ ) до кутової швидкості обертання шнека  $\omega(c^{-1})$ :

$$K = \omega_1 / \omega \quad (\text{Щ.2})$$

Коефіцієнт  $K$  можна виразити, як у роботі [1]:

$$K = \cos^2 \alpha - 0,5 \cdot f \cdot \sin^2 2\alpha \quad (\text{Щ.3})$$

де  $f$  - коефіцієнт тертя м'яса по гвинтовій поверхні.

Треба мати на увазі, що кутова швидкість обертання продукту  $\omega_1$  комплексно залежить від усіх фізичних і геометричних параметрів процесу. Залежність між можливими переміщеннями  $\delta\varphi$  і  $\delta S$  знаходиться з співвідношення:

$$h / \delta S = 2\pi / \delta\varphi, \quad (\text{Щ.4})$$

де  $h$  - крок гвинтової лінії на радіусі шнека  $R_2$ , м.

Із співвідношення (Щ.4) отримуємо:

$$\delta\varphi = \frac{2\pi}{h} \delta S \quad (\text{Щ.5})$$

На основі (Щ.5) рівність (Щ.1) прийме вигляд:

$$(M_e - M_c) \frac{2\pi}{h} (1 - K) \cdot P_{\text{дон}} S_2 = 0 \quad (\text{Щ.6})$$

Величину  $S_2$  знаходимо за формулою:

$$S_2 = \pi R_2^2 \cdot \cos \alpha \quad (\text{Щ.7})$$

де  $\alpha$  - кут нахилу гвинтової лінії шнека, град (рис. Щ.1, б).

З рівняння (Щ.6) враховуючи (Щ.7), знаходимо залежність між обертальним моментом двигуна  $M_e$ , кутовою швидкістю обертання шнека  $\omega$  і граничним тиском на продукт  $P_{\text{дон}}$ :

$$M_e = M_c + \frac{\omega - \omega_1 \cdot P_{\text{дон}} \cdot R_2^2 \cdot h}{2\omega} \cdot \cos \alpha \quad (\text{Щ.8})$$

Момент сил опору  $M_c$  також є складною функцією фізичних, геометричних і кінематичних параметрів процесу. Величину цього моменту

зручно виразити через різницю  $\omega - \omega_1$ . Це має фізичний сенс, оскільки при  $\omega = 0$  момент сил опору є найбільшим. Якщо ж  $\omega = \omega_1$ , то в цьому випадку продукт не ковзає по поверхні шнека і момент сил опору дорівнює нулю. Вважаємо, що продукт не прилипає до стінок шнека і в цьому випадку момент сил опору може бути знайдений за формулою:

$$M_c = f(\omega) \cdot (\omega - \omega_1) \quad (\text{Щ.9})$$

де функція  $f(\omega)$  може бути знайдена тільки експериментальним шляхом і тільки для конкретного обладнання.

З урахуванням рівності (Щ.9) формула (Щ.8) прийме вигляд:

$$M_g = (\omega - \omega_1) \cdot \left( f(\omega) + \frac{P_{дон} \cdot R_2^2 \cdot h}{2\omega} \cos \alpha \right) \quad (\text{Щ.10})$$

Подамо величину  $\omega - \omega_1$  через масову витрату продукту. Якщо зворотний рух продукту в шнековому каналі вовчка відсутній, то масова витрата продукту  $Q_i$  визначиться формулою:

$$Q_m = V \cdot S_p \cdot \rho = V \frac{\pi d^2}{4} n, \quad (\text{Щ.11})$$

де  $V$  - швидкість руху продукту вздовж осі каналу (подавальна швидкість), м/с;  $\rho$  - щільність продукту, кг/м<sup>3</sup>;  $S_p$  - сумарна площа отворів ґратки, м<sup>2</sup>

$$S_p = \frac{\pi d^2}{4} n \quad (\text{Щ.12})$$

$d$  - діаметр отворів ґратки, м;  $n$  - кількість отворів, шт.

Швидкість поступального руху продукту знайдемо, використовуючи залежність між дійсними нескінченно малими переміщеннями поступального руху продукту і кутовим переміщенням :

$$d\varphi = (1 - K) \cdot \frac{2\pi}{h} dS \quad (\text{Щ.13})$$

Поділивши ліву і праву частину рівняння (Щ.13) на нескінченно малий проміжок часу  $dt$ , і, з урахуванням значення  $K$  з формули (Щ.3), знайдемо:

$$V = (\omega - \omega_1) \cdot \frac{h}{2\pi} \quad (\text{Щ.14})$$

На підставі формули (Щ.14) вираз для масової витрати продукту прийме вигляд:

$$Q_m = (\omega - \omega_1) \frac{h \cdot d^2 \cdot n \cdot \rho}{8} \quad (\text{Щ.15})$$

Визначаючи з рівняння (Щ.15) різницю  $\omega - \omega_1$ , і, підставляючи її у вираз (Щ.10), знайдемо шукану залежність:



$$M_{\epsilon} = \frac{8Q_m}{h \cdot d^2 \cdot n \cdot \rho} \left( f(\omega) + \frac{P_{don} \cdot R_2^2 \cdot h}{2\omega} \cos \alpha \right) \quad (\text{Щ.16})$$

У рівнянні (Щ.16) величина  $P_{don}$  для різних видів сировини має бути отримана шляхом проведення серії експериментальних досліджень для визначенням граничних тисків, що не порушують структури продукту. Тоді рівняння (Щ.16) може бути використане для експериментального визначення функції  $f(\omega)$  в межах зміни вимірюваних параметрів:

$$M_{\epsilon 1} \leq M_{\epsilon} \leq M_{\epsilon 2}; \quad \omega' \leq \omega \leq \omega''; \quad Q_{m1} \leq Q_m \leq Q_{m2}. \quad (\text{Щ.17})$$

Рівняння (Щ.16) зв'язує витрату сировини  $Q_i$  та обертовий момент двигуна  $M_{\epsilon}$ , прямопропорційною залежністю, тобто при  $Q_m = 0$  і  $M_{\epsilon} = 0$ .

Але це не зовсім так. Рівняння (Щ.16) треба розуміти в тому сенсі, що при  $Q_i = 0$  рух продукту в просторі між шнеком і корпусом або перебудовується (з'являється зворотний рух), або продукт захоплюється тільки в обертальний рух. Момент сил опору, що виникає при цьому, значно менший моменту сил опору за наявності поступальної ходи продукту. В цьому випадку і обертальний момент двигуна буде значно меншим від його обертального моменту за наявності поступального руху продукту.

Розрахуємо переміщення і напруження у витках шнека. Оскільки витки шнека мають досить складну форму, то для проведення аналітичних міркувань подано виток у вигляді циліндричної шайби із зовнішнім радіусом  $R_2$ , яка жорстко закріплена на валу радіуса  $R_{20}$  (рис. Щ.2).

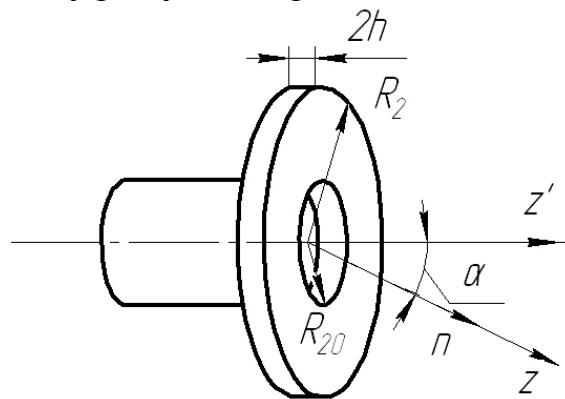


Рис. Щ.2 – Схема витка шнека

Товщина витка дорівнює  $2h$ , площа витка нахилена до вісі вала під кутом  $\alpha$  - (кут між нормаллю  $n$  до площини витка і віссю вала  $z'$ ).

Вважаємо, що продукт рухається в додатньому напрямі осі  $z'$  і в цьому ж напрямі відбувається підвищення тиску на поверхні витків шнека.

Зв'яжемо з витком шнека циліндричну систему координат  $r, \varphi, z$ , початок якої знаходиться в центрі середньої площини витка. На поверхні витка  $z = -h$  тиск буде рівним  $-P_1 \cos \alpha$ , а на поверхні  $z = h$  він дорівнюватиме  $P_2 \cos \alpha$ , ( $P_1 < P_2$ ), тобто вигин витка відбуватиметься убік, протилежний руху продукту.

Прийmemo, що основним вигинаючим чинником є нормальний тиск, діючий на кожену поверхню витка.

В аналітичних розрахунках використаємо рівняння теорії пружності, записані в переміщеннях (рівняння Ламе). Рівняння Ламе для осевого переміщення  $U_z$ , записане в циліндричній системі координат, має вигляд:

$$\Delta U_z + (K + 1) \frac{\partial \theta}{\partial Z} = 0, \quad (\text{Щ.18})$$

де  $\Delta$  - оператор Лапласа, записаний в циліндричній системі координат :

$$\Delta = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial Z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}, \quad (\text{Щ.19})$$

$$K = \frac{\lambda}{\mu} \quad (\text{Щ.20})$$

де  $\lambda$  і  $\mu$  - коефіцієнти (параметри) Ламе, які визначаються так:

$$\lambda = \frac{E\sigma}{(1+\sigma) \cdot (1-2\sigma)}; \mu = \frac{E}{2(1+\sigma)}, \quad (\text{Щ.21})$$

де  $E$  - модуль пружності;

$\sigma$  - коефіцієнт Пуассона;

$\theta$  - об'ємна деформація матеріалу витка, що визначається за формулою:

$$\theta = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot U_r) + \frac{\partial U_z}{\partial z} \quad (\text{Щ.22})$$

$U_z$  - радіальне переміщення точок витка.

Для визначення напружень в точках витка скористаємося рівнянням, що зв'язує осеве переміщення  $U_z$  з головним нормальним напруженням  $\tau_{zz}$  :

$$\tau_{zz} = \lambda \theta + 2\mu \frac{\partial U_z}{\partial Z}, \quad (\text{Щ.23})$$

При розв'язуванні рівняння (Щ.18) прийmemo, що основним видом деформації витків шнека є вигин у сторону, протилежну напрямку осі  $z$ , який відбувається без якого-небудь значного радіального переміщення точок витка. У цьому випадку можна прийняти  $U_z \gg U_r$ , і у виразі для об'ємної деформації (Щ.22) прийняти  $U_r \approx 0$ .

Тоді рівняння (Щ.22) і (Щ.23), з урахуванням (Щ.19) і (Щ.22) при  $U_r = 0$  приймуть вигляд:

$$\frac{\partial U_z}{\partial r^2} + \frac{l \cdot \partial U_z}{r \cdot \partial r} + (K + 2) \frac{\partial^2 U_z}{\partial Z^2} = 0 \quad (\text{Щ.24})$$

$$\tau_{zz} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial U_z}{\partial z} \quad (\text{Щ.25})$$

Рівняння (Щ.24) і (Щ.25) розв'яжемо за наступних граничних умов:

$$z = -h, \quad \tau_{zz} = -P_1 \cos \alpha$$

$$\begin{aligned} z = h, & \quad \tau_{zz} = -P_2 \cos \alpha \\ z = R_{20}, & \quad U_z = 0 \end{aligned}$$

Граничні умови означають, що вал, на якому закріплений виток, являється жорсткою опорою.

В результаті розв'язку рівнянь (Щ.24) і (Щ.25) з урахуванням граничних умов, отримуємо наступні формули для визначення осевого переміщення  $U_z$  і головного нормального напруження  $\tau_{zz}$ :

$$U_z = -\frac{(P_2 - P_1)h \cdot \cos \alpha}{\lambda + 2\mu} \left[ \frac{1}{12} + \frac{1}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\cos i\pi \cdot K_0(n \cdot r)}{i^2 \cdot K_0(n \cdot R_{20})} \cos \frac{i\pi}{h} z - \frac{1}{4} \left( \frac{z}{h} \right)^2 + \frac{K + 2 \cdot R_{20}^2 - r^2}{8 \cdot h^2} \right] - \frac{(P_1 - P_2) \cdot \cos \alpha}{2(\lambda + 2\mu)} Z \quad (\text{Щ.26})$$

$$\tau_{zz} = (P_1 - P_2) \left[ \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\cos i\pi \cdot K_0(n \cdot r)}{i \cdot K_0(n \cdot R_{20})} \sin \frac{i\pi}{h} z - \frac{z}{2h} \right] \cdot \cos \alpha - \frac{(P_1 + P_2) \cdot \cos \alpha}{2} \quad (\text{Щ.27})$$

У залежностях (Щ.26) і (Щ.27)  $K_0(nr)$  і  $K_0(nR_{20})$  - функції Бесселя другого роду, уявного аргумента, нульового порядку:

$$n = \frac{i\pi}{h} \sqrt{K + 2} \quad (\text{Щ.28})$$

Використовуючи рівність (Щ.26), знайдемо закономірність переміщення точок серединної площини в залежності від радіальної координати  $r$  точок цій площини. Для цього в правій частині рівняння (Щ.26) прийемо  $z = 0$ . Після цього отримуємо:

$$U_z(r, 0) = -\frac{(P_2 - P_1) \cdot h \cdot \cos \alpha}{\lambda + 2\mu} \left[ \frac{1}{12} + \frac{1}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\cos i\pi \cdot K_0(n \cdot r)}{i^2 \cdot K_0(n \cdot R_{20})} + \frac{K + 2 \cdot R_{20}^2 - r^2}{8 \cdot h^2} \right] \quad (\text{Щ.29})$$

Підставивши у рівняння (Щ.29)  $r = R_2$ , знайдемо осеве переміщення точок на зовнішньому радіусі шнека  $R_2$ :

$$U_z(R_2, 0) = -\frac{(P_2 - P_1) \cdot h \cdot \cos \alpha}{\lambda + 2\mu} \left[ \frac{1}{12} + \frac{1}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\cos i\pi \cdot K_0(n \cdot R_2)}{i^2 \cdot K_0(n \cdot R_{20})} + \frac{K + 2 \cdot R_{20}^2 - R_2^2}{8 \cdot h^2} \right] \quad (\text{Щ.30})$$

Проведений розрахунок переміщень у витках гнучкого шнека під дією різниці тисків на його робочу поверхню дає можливість забезпечити саморегулювання подачі сировини. Якщо найбільший з цих тисків є максимально допустимим для цього продукту, то є можливість визначення такого зазору між витками шнека і корпусом вовчка, при якому продукт перетече з області підвищеного в область пониженого тиску. Причому, цей зазор для заданого допустимого тиску треба визначати експериментально. Для розрахунку зазору  $\delta$  розглянемо схему, подану на рис.рис. Щ.3.

На цьому рисунку позначені:  $R_1$  - внутрішній радіус корпусу вовчка, м;  $R_2$  - зовнішній радіус шнека, м;  $R_{20}$  - внутрішній радіус витка, м;  $ML$  - крива вигину середньої площини витка шнека, м;  $U_z(R_2, 0)$  - переміщення зовнішніх

точок витка шнека, що знаходяться в серединній площині в осьовому напрямку, м. До вигину середня площина витка займала положення, при якому кут  $\alpha = 0$  (див. рис. Щ.2).

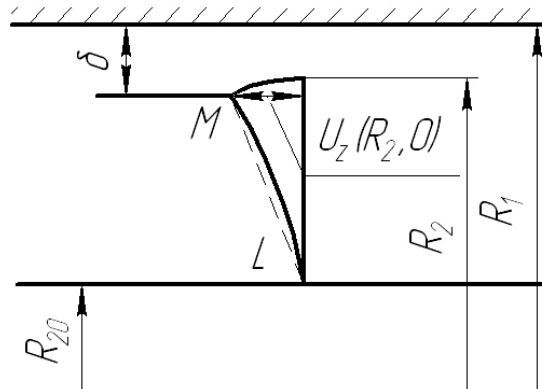


Рис. Щ.3 – Схема корпуса вовчка зі шнеком

Оскільки у розрахунках величиною радіального переміщення  $U_z$  нехтували, у порівнянні з осьовим переміщенням, то довжина дуги  $ML$  приблизно дорівнює різниці радіусів  $R_2$  і  $R_{20}$ , тобто:

$$\overset{\frown}{ML} = R_2 - R_{20}, \quad (\text{Щ.31})$$

При невеликих вигинах серединної площини замінимо дугу  $ML$  її хордою. В цьому випадку величина зазору  $\delta$  визначається за формулою:

$$\delta = R_1 - R_{20} - (R_2 - R_{20}) \cdot \cos \alpha \quad (\text{Щ.32})$$

Очевидно, що

$$\frac{U_z(R_2, 0)}{R_2 - R_{20}} = \sin \alpha, \quad \cos \alpha = \sqrt{1 - \left( \frac{U_z(R_2, 0)}{R_2 - R_{20}} \right)^2}, \quad (\text{Щ.33})$$

На підставі співвідношень (Щ.33), рівняння (Щ.32) приймає вигляд:

$$\delta = R_1 - R_{20} - (R_2 - R_{20}) \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{U_z(R_2, 0)}{R_2 - R_{20}} \right)^2}, \quad (\text{Щ.34})$$

Підставивши в рівність (Щ.34) вираз  $U_z(R_2, 0)$  з раніше отриманого рівняння (Щ.30), можна знайти залежність між величиною зазору  $\delta$  і прикладеною різницею тисків на робочій поверхні витків шнека.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Горбатов А.В., Косой В.Д. Исследование структурно-механических свойств колбасных фаршей при различных влажностях и степени измельчения [Текст] / А.В. Горбатов, В.Д. Косой - В кн. : Труды межвузовской конференции " Новые физические методы в пищевой промышленности ". - М.:, 1987, с. 149-150.

**Ю.1. Контактна взаємодія різальних інструментів з сировиною**

Проаналізуємо дію сил на кожну робочу поверхню леза ножа окремо (рис. Ю.1). Зі сторони відрізаної частинки на передню поверхню діє сила  $W$ , проекція якої на нормаль  $n-n_1$  дає нормальну силу  $N$ .

$$N = W \cdot \cos \varphi \quad (\text{Ю.1})$$

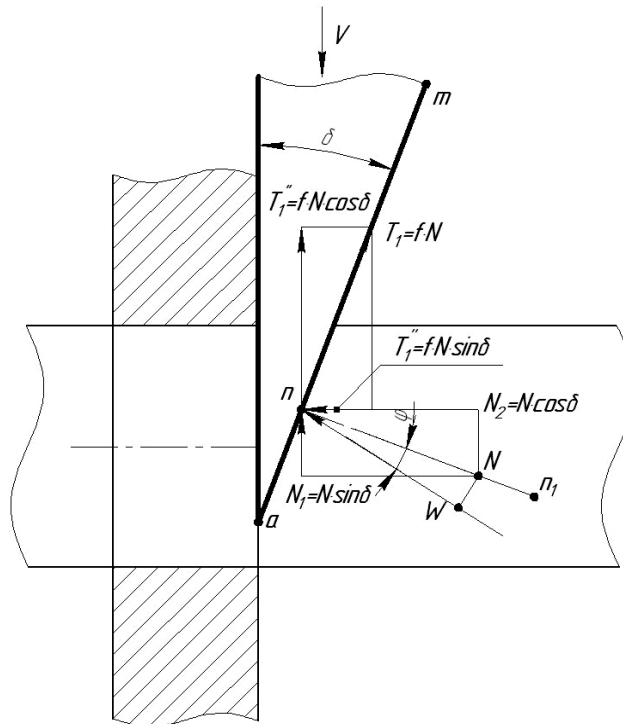


Рис. Ю.1 – Сили, які діють зі сторони відрізаної частинки на передню поверхню ножа

Силу  $N$  розкладемо по двох взаємно перпендикулярних напрямках:

- по напрямку руху ножа

$$N_1 = N \cdot \sin \delta \quad (\text{Ю.2})$$

- перпендикулярно до напрямку руху ножа

$$N_2 = N \cdot \cos \delta \quad (\text{Ю.3})$$

Від нормальної сили на передній поверхні леза виникає сила тертя

$$T_1 = f \cdot N, \quad (\text{Ю.4})$$

де  $f = \operatorname{tg} \varphi$  – коефіцієнт тертя подрібненої маси по лезу;

$\varphi$  – кут тертя.

Розкладемо силу  $T_1$  по двох взаємно перпендикулярних напрямках:

- перпендикулярно до напрямку руху ножа

$$T_1^1 = f \cdot \sin \delta \quad (\text{Ю.5})$$

- проти напрямку руху ножа

$$T_1^{11} = f \cdot N \cdot \cos \delta \quad (\text{Ю.6})$$

Тоді загальний опір, який виникає на передній поверхні леза в напрямку, протилежному напрямку руху ножа буде дорівнювати

$$P_1 = N \cdot \sin \delta + f \cdot N \cdot \cos \delta \text{ або } P_1 = N \cdot (\sin \delta + f \cdot \cos \delta) \quad (\text{Ю.7})$$

А в напрямку, перпендикулярному до напрямку руху ножа, буде виникати сила

$$P_2 = N \cdot \cos \delta - f \cdot N \cdot \sin \delta \text{ або } P_2 = N \cdot (\cos \delta - f \cdot \sin \delta) \quad (\text{Ю.8})$$

Таким чином,  $P_1$  - сила опору від стискання матеріалом передньої поверхні, а  $P_2$  - сила опору від обтискування матеріалом передньої поверхні.

Підставивши в формулу (Ю.8) значення  $N$  із формули (Ю.7) отримаємо залежність

$$P_2 = \frac{\cos \delta - f \cdot \sin \delta}{\sin \delta + f \cdot \cos \delta} \cdot P_1 \text{ або } P_2 = \left( \frac{1 - f \cdot \operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} \delta + f} \right) \cdot P_1 \quad (\text{Ю.9})$$

Із формули (Ю.9) виходить, що сила обтискування із збільшенням кута заточки падає, але збільшується сила стискання обернено пропорційно силі обтискування. Це підтверджується розрахунками, виконаними за формулою (Ю.9). Якщо умовно прийняти силу стискання за одиницю, а коефіцієнт тертя м'яса по сталі 0,15 [2], то відношення сили стискання і обтискування при різних кутах заточки леза буде виглядати так (рис. Ю.2).

Очевидно, що сила обтискування залежить від кута заточки і з ростом кута заточки вона падає.

Така залежність дозволяє припустити, що ножі з великим кутом заточки будуть, в основному, зношуватися по передній поверхні за рахунок сили стискання. Є підстава стверджувати, що якщо сила обтискування із зменшенням кута заточки до певного моменту росте, то сила стискання обов'язково повинна падати згідно із залежністю (Ю.9). Таким чином, з урахуванням того, що сила обтискування завжди менша сили стискання, можна стверджувати, що ножі з меншими кутами заточки будуть зношуватися менш інтенсивно.

Із самого характеру взаємодії передньої поверхні ножа з подрібнюваним матеріалом очевидно, що тиск, який діє з його сторони не може бути розподіленим по поверхні леза рівномірно (рис. Ю.3).

Якщо розглядати точку  $t$ , яка при переміщенні ножа тільки підходить до матеріалу, то очевидно, що тиск на ній буде дорівнювати нулю і він не може зрости моментально. Він міг би бути більшим нуля в тому випадку, якби поверхня  $am$  ножа при своєму русі потягнула за собою масу матеріалу, який з нею контактує, тобто якби відбувалося неначе пресування матеріалу в напрямі передньої поверхні  $am$ , але такого явища при подрібненні не відбувається. Таким чином тиск на одиницю площі стикання матеріалу з поверхнею  $am$  повинен зростати від нуля в точці  $t$  до максимального значення в точці  $a$ . Закономірність його зміни нам невідома. Припустимо, що він змінюється за

лінійною закономірністю. Довжина  $am$  дорівнює розміру навантаженої частини передньої поверхні ножа  $l_n=am$  (зношена площадка передньої поверхні, що визначається експериментально). Для ножів, які мають товщину леза 40 мкм,  $l_n=80-120$  мкм. При збільшенні товщини ріжучого окрайка величина площадки  $l_n$  змінюється за лінійним законом.

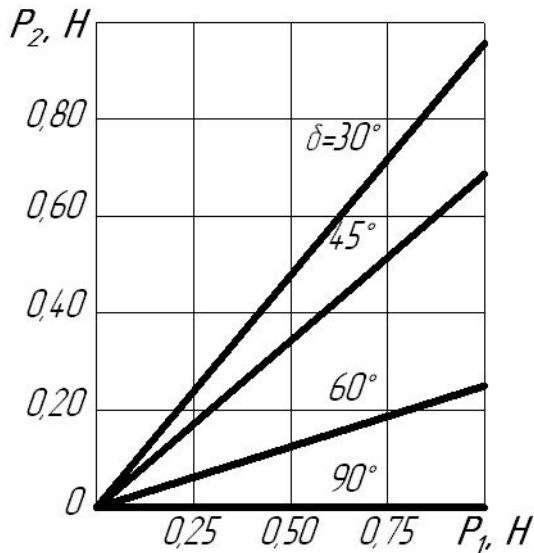


Рис. Ю.2 – Залежність сили обтискування  $P_2$  і сили стискання  $P_1$  від кута загострення леза

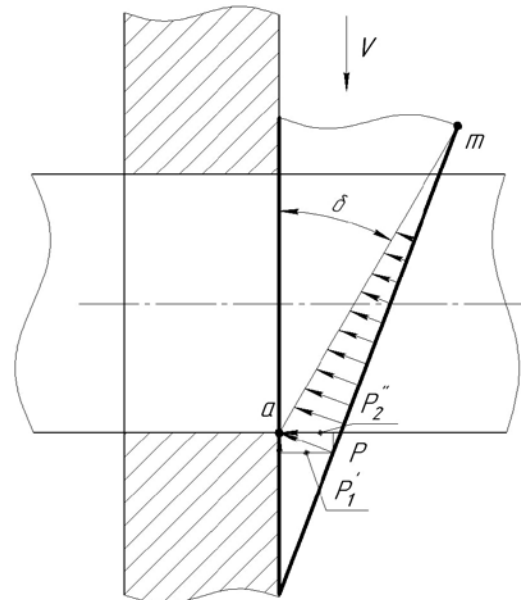


Рис. Ю.3 – Розподіл тиску по передній поверхні ножа

Тиск в точці  $a$  можна визначити за залежністю

$$p = p_0 \cdot \sin \delta \quad (\text{Ю.10})$$

Закономірність розподілу тиску по поверхні  $am$  набуває вигляду

$$p_x = p_0 \cdot x \cdot \sin \delta \quad (\text{Ю.11})$$

де  $x$  - величина, що змінюється від 0 до  $l_n$ .

Вірність такого погляду на розподіл тиску по передній поверхні підтверджується тим, що найбільший знос ножа зазвичай буває близько до його ріжучого окрайка (див. рис. Ю.3).

Тоді із врахуванням прийнятої лінійної закономірності, тиск на передню поверхню в напрямі і перпендикулярно руху леза визначається за формулами

$$p_2'' = \frac{1}{2} p_0 \cdot x \cdot \sin 2\delta \quad (\text{Ю.12})$$

$$p_1' = p_0 \cdot x \cdot \sin^2 \delta \quad (\text{Ю.13})$$

Підставивши значення  $p_1'$  і  $p_2''$  в залежність (Ю.9) отримаємо:

$$P_2 = \frac{\cos \delta - f \cdot \sin \delta}{\sin \delta + f \cos \delta} \cdot p_0 \cdot x \cdot \sin^2 \delta = p_0 \cdot x \cdot \sin^2 \delta \cdot \left( \frac{1 - f \cdot \operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} \delta + f} \right). \quad (\text{Ю.14})$$

При  $x=l_n$  тиск на передню поверхню леза в напрямку, перпендикулярному руху ножа, визначається за формулою

$$P_2 = P_0 \cdot l_n \cdot \sin^2 \delta \cdot \left( \frac{1 - f \cdot \operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} \delta + f} \right), \quad (\text{Ю.15})$$

а в напрямку руху ножа за формулою

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{P_2}{\operatorname{tg} \delta + f} = \frac{\frac{1}{2} p_0 \cdot x \cdot \sin 2\delta}{\operatorname{tg} \delta + f} = \frac{\frac{1}{2} p_0 \cdot l_n \sin 2\delta \cdot (\operatorname{tg} \delta + f)}{1 - \operatorname{tg} \delta} = \\ &= \frac{1}{2} p_0 \cdot l_n \cdot \sin 2\delta \cdot \left( \frac{\operatorname{tg} \delta + f}{1 - f \cdot \operatorname{tg} \delta} \right) \end{aligned} \quad (\text{Ю.16})$$

Формули (Ю.15) і (Ю.16) дозволяють визначити величини стискаючих і обтискуючих сил, які діють на передню поверхню ножа в залежності від кута заточки і товщини ріжучого окрайка.

Сили  $P_1$  і  $P_2$  діють на передню поверхню у двох взаємно перпендикулярних напрямках і від їх величини залежить знос передньої поверхні ножа. Тому, з метою зменшення сил, які діють на передню поверхню згідно з формулами (Ю.15) і (Ю.16), необхідно зменшити кут заточки  $\delta$  або збільшити опір спрацюванню передньої поверхні завдяки нанесенню на неї зносостійких покриттів.

В результаті вимірювань геометричних параметрів зношених серійних ножів вовчків визначена величина площадки  $l_n$  ( $l_n = 2,67\rho + 0,061$ ). Тоді формули для визначення сил  $P_1$  і  $P_2$  приймуть вигляд:

$$P_1 = \frac{1}{2} p_0 \cdot (2,67\rho + 0,061) \cdot \sin 2\delta \cdot \left( \frac{f + \operatorname{tg} \delta}{1 - f \cdot \operatorname{tg} \delta} \right) \quad (\text{Ю.17})$$

$$P_2 = p_0 \cdot (2,67\rho + 0,061) \cdot \sin^2 \delta \cdot \left( \frac{1 - f \cdot \operatorname{tg} \delta}{f + \operatorname{tg} \delta} \right). \quad (\text{Ю.18})$$

Якщо прийняти межу міцності на стискання м'яса  $95 \times 10^{-3}$  Н/мм<sup>2</sup>, а коефіцієнт його тертя по сталі 0,15 [1], то сили стискання і обтискування, які діють на передню поверхню в залежності від радіуса заокруглення леза і кута заточки, будуть мати вигляд, поданий на рис. Ю.4.

Сила стискання зі збільшенням кута заточки росте і, при куті 90°, досягає максимального значення, а сила обтискування передньої поверхні продуктом зменшується і досягає нульового значення при куті заточки близькому до 90°.



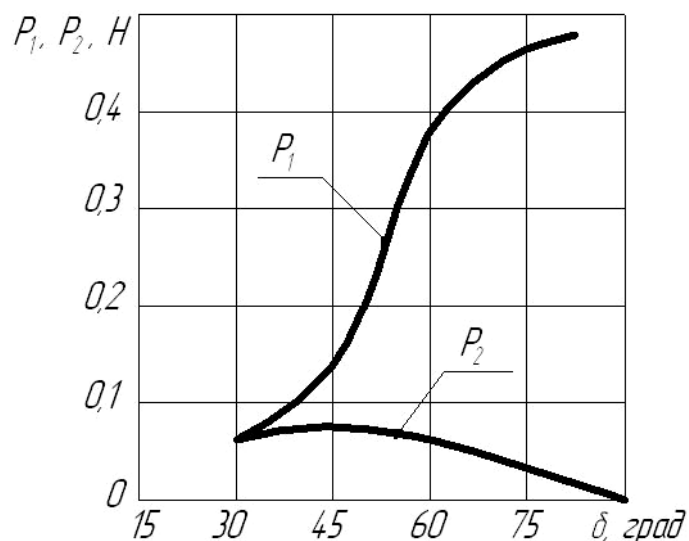


Рис. Ю.4 – Залежність сили стискання  $P_1$  і обтискування  $P_2$  від кута заточки леза з урахуванням руйнуючих напружень і радіуса заокруглення леза

Таким чином, при довільних значеннях кутів заточки, на передню поверхню діють сили стискання і обтискування в різній мірі. При цьому передня поверхня постійно знаходиться під впливом сил нормального тиску і тертя і, завдяки зміні кута заточки, досягнути самозаточування леза неможливо. Єдиним рішенням проблеми підвищення терміну служби ножів є зміцнення передньої поверхні леза зносостійким матеріалом.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Амелин Д.В. Новые способы восстановления и упрочнения деталей машин электроконтактной наваркой: [Для слушателей учеб. заведений агропром. комплекса] / Д. В. Амелин, Е. В. Рыморов. М.: Агропромиздат, 1997. - 150 с.
2. Оборудование и материалы для мясоконсервного и вспомогательного производств [Текст] / Справочник. - М.: Пищевая промышленность, 1996. - 438 с.
3. Сухенко В.Ю. Підвищення довговічності м'ясоподрібнювальних інструментів [Текст] / В.Ю. Сухенко / Науково-практичний журнал «Продовольча індустрія АПК» № 3 2012, ПП «Паралель» С. 30-32.

## Ю.2. Структура сервовитних плівок на різальних інструментах

Структуру сервовитних плівок, що утворюються при вибірковому переносі (ВП) досліджували різними методами. Узагальнені результати наведені нижче.

- На електронному мікроскопі вивчали плівку міді на сталі і бронзі, яка утворюється при терті пари бронза - сталь у середовищі м'ясного соку. Фотографії поверхні на електронному мікроскопі EM-7 отримані за допомогою вугільно-срібних реплік. Фотографії дозволили встановити, що сервовитна плівка має мікропористість, причому деякі пори мають огранювання. Це так названі негативні кристали, які утворюються в результаті коагуляції (злиття) вакансій, у місцях надлишку наявних вакансій у плівці.

Таким чином, дослідження плівки на електронному мікроскопі показало, що плівка товщиною 1...2 мкм має пухку, пористу структуру. Цей висновок підтверджує наступний дослід. Ретельно промитий і висушений зразок з мідною плівкою на поверхні витримували у вакуумній шафі. В результаті на поверхні «випотівав» сік, поява якого свідчила, що в плівці знаходилися поверхнево-активні компоненти технологічного середовища.

- Визначення параметра ґратки. Параметр ґратки сервовитної плівки, яка утворилася при терті бронзи по сталі в середовищі м'ясного соку, менший, ніж параметр ґратки бронзи. В міру наближення до поверхні він може зменшуватися аж до значення 0,0354 нм і на більшій глибині наближається до параметра основного металу.

Зміна параметра ґратки в першу чергу свідчить про перерозподіл легуючих елементів у поверхневих шарах сплаву при терті, дифузійні процеси при терті сприяють глибоким структурним перетворенням у поверхневих шарах твердих тіл і є одним з ведучих ланок у механізмі контактної взаємодії. Закономірності кінетики дифузійних процесів є основою при виборі сплаву для досягнення режиму ВП і стійкості цього ефекту.

- Радіоізотопний аналіз і метод оже-спектроскопії підтверджують отримані дані про перерозподіл легуючих елементів сплаву при терті. Вони вказують на різке розходження вмісту легуючих елементів у поверхневих шарах (аж до повного їх розчинення при формуванні сервовитної мідної плівки) за різних умов тертя, зокрема при використанні мастильних середовищ різної природи. Встановлена наявність на рентгенограмах двох систем дифракційних ліній, які відповідають матеріалам з періодами кристалічних ґраток, які різко розрізняються, що свідчило про існування міжфазної границі, яка розділяє основний матеріал зразка і прилягаючий до нього сервовитний шар. Пошаровий емісійний мікроспектральний аналіз (з використанням лазерного променя) показав, що під сервовитною плівкою на границі зі сталлю є шар оксидів міді легуючих елементів чи домішок товщиною близько 0,1 мкм.

- Структуру плівки вивчали за допомогою спеціально розробленого методу «ковзаючого пучка» рентгенівських променів. Промінь направляли до поверхні під малим кутом (не більш  $1^\circ$ ), що дозволяло досліджувати поверхневі шари товщиною 0,1 - 0,01 мкм. Дослідження показали, що верхній шар плівки

має значні структурні зміни в порівнянні з нижчележачими шарами. За критерій структурних змін приймали істинну (фізичну) ширину ліній на рентгенограмах (3, яка для чистих металів і рівноважних твердих розчинів є результуючою середньою величиною блоків і дисперсій пружної деформації кристалічної ґратки (мікроспотворень) і слугує характеристикою густини дислокацій, які містяться в металі. Встановлено, що ширина інтерференційних ліній (200) і (311) міді по глибині зразків після випробувань на тертя змінюється. У шарі товщиною 0,3 мкм ширина ліній з часом зменшується. Максимальна ширина ліній спостерігається не на самій поверхні, а в більш глибокому шарі міді. Таким чином, можна затверджувати, що при ВП у самому верхньому шарі немає скупчення дислокацій, тобто не накопичуються пошкодження, які призводять до руйнування поверхні. При терті зразків міді зі сталлю в неактивному мастильному матеріалі (вазелиновій олії) крива зміни фізичної ширини рентгенівської лінії міді за глибиною зони деформації при терті не має спаду у верхніх шарах. Тут немає розрядження дислокацій — відбувається нагромадження пошкоджень і, як наслідок, руйнування поверхні.

Фізико-хімічні дослідження структури сервовитної плівки дали підставу висловити припущення, що матеріал плівки знаходиться в стані, подібному розплавленому. Вона не здатна до наклепу, має малі зсувні зусилля, пориста. Плівка у верхній частині не має оксидів, здатна до схоплювання, при терті її часточки можуть переходити з однієї поверхні тертя на іншу, тобто схоплюватися без утворення пошкоджень і збільшення сил тертя. Тертя бронзи по сталі в умовах ВП можна уподібнити ковзанню тіла по льоду, при якому низький коефіцієнт тертя замість води забезпечує плівка розплавленого металу.

Всі м'ясні соки містять поверхнево-активні речовини, що визначає можливість пластифікації поверхневих шарів матеріалу деталей в результаті ефекту Ребіндера і зниження сил тертя між ними. При звичайному терті оксидні плівки перешкоджають проникненню середовища (і разом з ним ПАР) до металу, чим знижується ефект Ребіндера; в результаті пластичні деформації ділянок контакту охоплюють більш глибокі шари. При ВП оксидні плівки відсутні, і дія ефекту Ребіндера реалізується повною мірою, в результаті деформується лише сервовитна плівка, підповерхневі шари металу деформації не зазнають. Оскільки молекули поверхнево-активних речовин знаходяться в порах сервовитної плівки, не виключається ковзання і всередині плівки за принципом дифузійно-вакансійного механізму, але з малою витратою енергії. Все це значно знижує тертя і зношування.

Продуктами зношування при терті з граничним мащенням є в основному оксиди, які не мають електричного заряду, вільно виносяться із зони тертя і, переміщуючись між контактуючими поверхнями, здійснюють на них абразивну дію. Тому конструктори й експлуатаційники намагаються прийняти всі міри для видалення продуктів зношування з мастильної системи.

## Визначення раціональних умов подрібнення сировини у запатентованих подрібнювачах

### Я.1. Визначення функції геометричних параметрів процесу різання

У запропонованих нами нових різальних пристроях процес різання реалізується ґратками і ножами. Форми отворів у ґратках і лез ножів можуть бути різними, що обумовлює як форму тіла подрібнюваного матеріалу так і дисперсність кінцевого продукту. Одне залишається незмінним – процес різання відбувається у площині, а тому розглянемо процес різання у двохвимірному просторі матеріалу, який має відповідну товщину по вісі  $x$  і ширину по вісі  $y$ .

Для визначення виду функції  $f(b, h, \delta_1, \delta_2, \varphi, \Delta, r, v)$  геометричних параметрів процесу різання розглянемо схему, подану на рис. Я.1.

Якщо рухомий ніж обертається навколо вісі, що перпендикулярна різальним крайкам, то при достатньо великих співвідношеннях радіуса обертання різальних крайок ножів і розмірів часток м'яса можна вважати рух різальних крайок при різанні прямолінійним.

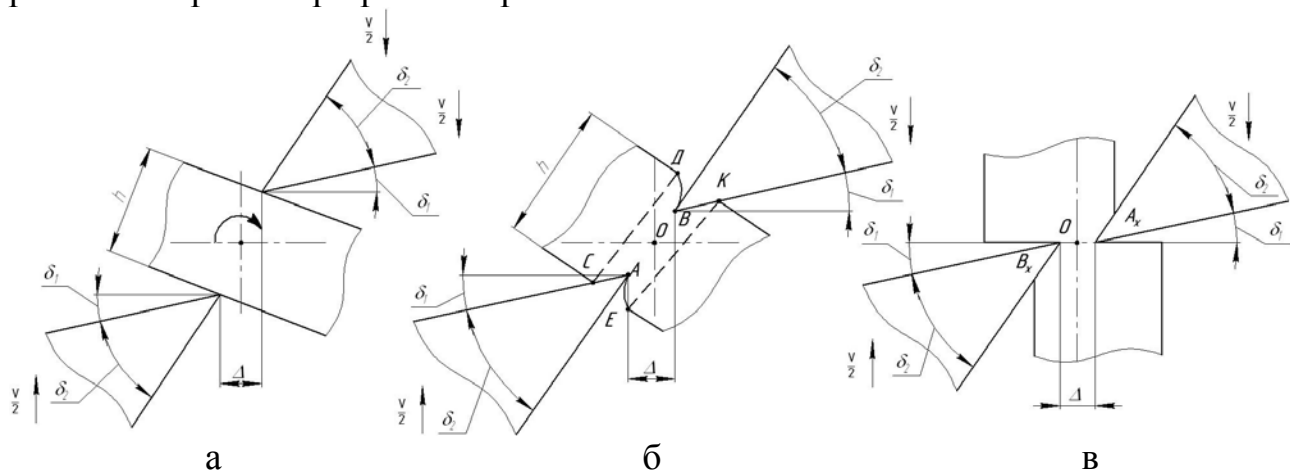


Рис. Я.1 – До розрахунку геометричних параметрів процесу різання м'яса двома лезами: а – початковий, б – проміжний, в – кінцевий моменти різання

Початку процесу деформації матеріалу відповідає таке положення шматка матеріалу у контакті з ножами, що найкоротша відстань між двома крайніми точками ножів рівна висоті матеріалу. Розглянемо процес зближення крайок різальної пари у напрямку швидкості їх руху  $v$ . Під час різання елемент матеріалу повертається відносно центру обертання  $O$  (рис. Я.1,а). До початку процесу руйнування шматок м'яса деформується, що призводить до збільшення довжини його контакту з різальними крайками ножа і ґратки.

Очевидно, що  $b \gg r$ , тому деформування об'єму м'яса до початку руйнування відбувається у напрямку нормалі до площини перерізання. Зміна

площі перетину шматка м'яса у цьому напрямку пропорційна відносній деформації:

$$S^x(\varepsilon) = \frac{S_k}{1 - \varepsilon}, \quad (\text{Я.1})$$

де  $S_k$  - площа контакту ножа з м'ясом,  $\varepsilon$  - відносна деформація м'яса. В загальному випадку площа контакту  $S_k$  леза з матеріалом складається з суми площ контакту його бокових граней  $S_\sigma$  і загальної крайки з радіусом заокруглення  $r$ :

$$S_p = 2rb, \quad (\text{Я.2})$$

де  $r$  – радіус заокруглення леза,  $b$  – ширина шматка м'яса.

Площа  $S_\sigma$  змінюється і залежить від кутів загострення ножів і глибини його занурення у зразок.

Максимальну лінійну деформацію матеріалу при різанні визначає відстань між двома крайніми точками лез  $A$  і  $B$  (рис. Я.1), кінетика зміни якої така:

$$|AB|(t) = \sqrt{\Delta^2 + (\sqrt{h^2 - \Delta^2} - vt)^2}, \quad (\text{Я.3})$$

де  $v$  – лінійна швидкість руху ножа;  $t$  – час;  $\Delta$  - зазор між крайками лез;  $h$  – товщина шматка м'яса.

Поділимо область деформування на зону однорідної деформації стиснення під зальною крайкою з радіусом заокруглення  $r$  і зону неоднорідної деформації, об'єм  $V_{\text{неодн}}$  якої залежить від товщини лез, кутів їх загострення і деформаційних властивостей матеріалу:

$$V_{\text{деф}} = V_{\text{одн}} + V_{\text{неодн}} \quad (\text{Я.4})$$

Очевидно, що  $h \gg r$ , причому реальний радіус деформування м'яса завжди більший радіуса загострення леза  $r$ .

Через це вважатимемо об'єм зони однорідної деформації рівним добутку площі прямокутника  $CDKE$  і товщини матеріалу (рис. Я.1, б), або

$$V_{\text{одн}} = 2rbh \quad (\text{Я.5})$$

Об'єм зони неоднорідної деформації складає:

$$V_{\text{неодн}} = S_\sigma(\varepsilon) \cdot h \quad (\text{Я.6})$$

Об'єм неоднорідної деформації (рис. Я.3)  $V_{\text{неодн}}(y)$  змінюється від нуля до максимального значення (якщо руйнування не починається раніше) і дорівнює добутку площі фігури  $ACDBKE$  (рис. Я.1,б) і ширина шматка м'яса  $b$ . Розглянемо процес зміни довжини лінії перетину ножа  $DK$  на рівні поверхні м'яса (рис. Я.2) в залежності від повороту осі шматка навколо центру  $O$  через зближення ножів і їх занурення у шматок. Леза рухаються у напрямку вісі  $y$ , а центр обертання  $O$  – нерухомий. Отже, маємо систему координат  $y$ - $x$ , що обертається навколо центру з кутовою швидкістю  $d\alpha/dt$  (рис. Я.3). Зону однорідної деформації не враховуємо, тому вважаємо  $r=0$ .

Тоді

$$BL = h - 2OB = h - AB \quad (\text{Я.7})$$

де  $AB$  – визначається за виразом (Я.3).

$$DL = BL \operatorname{tg}(\pi - \alpha - \delta_2)$$

$$KL = BL \operatorname{tg}(\pi - \alpha - \delta_1)$$

Тоді

$$DK = BL(\operatorname{tg}(\pi - \alpha - \delta_2) + \operatorname{tg}(\pi - \alpha - \delta_1)), \quad (\text{Я.8})$$

Площа деформування  $S_{неод}(t)$ , з врахуванням (Я.3), (Я.7), (Я.8) буде:

$$S_{неод}(t) = b \cdot \left( h - \sqrt{\Delta^2 + \left( \sqrt{h^2 - \Delta^2} - vt \right)^2} \right) \times (\operatorname{tg}(\pi - \alpha(t) - \delta_2) + \operatorname{tg}(\pi - \alpha(t) - \delta_1)), \quad (\text{Я.9})$$

Тоді вираз (Я.6), з урахуванням, приймає вигляд:

$$V_{неод}(t) = b \cdot h \cdot \left( h - \sqrt{\Delta^2 + \left( \sqrt{h^2 - \Delta^2} - vt \right)^2} \right) \times (\operatorname{tg}(\pi - \alpha(t) - \delta_2) + \operatorname{tg}(\pi - \alpha(t) - \delta_1)) \quad (\text{Я.10})$$

З огляду на те, що

$$\alpha(t) = \arcsin\left(\frac{\Delta}{|AB|(t)}\right) \quad (\text{Я.11})$$

отримаємо:

$$S_k(t) = b \cdot \left( \left( 2r + \left( h - \sqrt{\Delta^2 + \left( \sqrt{h^2 - \Delta^2} - vt \right)^2} \right) \right) \times \left( \operatorname{tg}\left( \pi - \arcsin\left( \frac{\Delta}{|AB|(t)} \right) - \delta_1 \right) \right) \right) \quad (\text{Я.12})$$

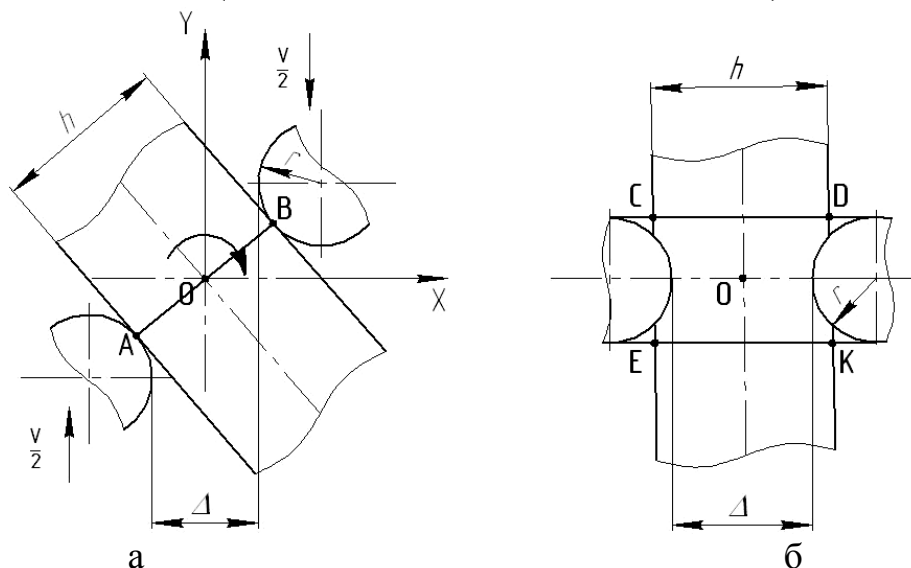


Рис. Я.2 – Взаємодія м'яса з лезами, що мають заокруглення різальних крайок



$$F(t) = \frac{k_{\sigma} \cdot b \frac{vt}{\sqrt{h^2 - \Delta^2}}}{1 - \frac{vt}{\sqrt{h^2 - \Delta^2}}} \cdot \left( \begin{array}{l} 2r + \left( h - \sqrt{\Delta^2 + \left( \sqrt{h^2 - \Delta^2 - vt} \right)^2} \right) \times \\ \left( \begin{array}{l} \operatorname{tg} \left( \pi - \arcsin \left( \frac{\Delta}{\sqrt{\Delta^2 + \left( h^2 - \Delta^2 - vt \right)^2}} \right) - \delta_2 \right) + \\ + \operatorname{tg} \left( \pi - \arcsin \left( \frac{\Delta}{\sqrt{\Delta^2 + \left( \sqrt{h^2 - \Delta^2 - vt} \right)^2}} \right) - \delta_1 \right) \end{array} \right) \end{array} \right). \quad (\text{Я.18})$$

На основі (Я.15) зусилля руйнування м'яса за різних геометричних умов різання ( $\delta_1, \delta_2, \Delta, r, h$ ) може бути знайдено з пропорції:

$$F(t) = F(t)^{id} \frac{V_{\text{деф}}(t)}{V_{\text{деф}}^{id}(t)}, \quad (\text{Я.19})$$

або

$$F(t) = F(t)^{\text{експ}} \frac{V_{\text{деф}}(t)}{V_{\text{деф}}^{\text{експ}}(t)}, \quad (\text{Я.20})$$

де  $F(t)^{\text{експ}}$  - питоме зусилля різання матеріалу, що визначене експериментально використанням різального пристрою з визначеним значенням  $S_{\text{деф}}^{\text{експ}}(t)$ .

Енергія, що витрачається на рівні  $W_p$  може бути знайдена інтегруванням рівняння (Я.20)

$$W_p = \int_{t=0}^{t=t_p} P(t)^{\text{експ}} \frac{V_{\text{деф}}(t)}{V_{\text{деф}}^{\text{експ}}(t)} \cdot v dt, \quad (\text{Я.21})$$

де  $t_p$  - термін різання до руйнування шматка матеріалу.

Якщо з експериментальних досліджень визначено значення питомої енергії різання матеріалу  $w_p^{\text{num}}(T, v)$  при визначених значеннях  $S_{\text{деф}}^{\text{експ}}(t)$ , то критеріальне рівняння (Я.21) приймає вигляд:

$$W_p = w_p^{\text{num}}(T, v) \frac{V_{\text{деф}}(t)^2}{V_{\text{деф}}^{\text{експ}}(t)} \quad (\text{Я.22})$$

Питомі витрати енергії на утворення нової поверхні визначимо з рівняння

$$W_{\text{НП}} = \frac{W_p}{S_{\text{НП}}} = \frac{W_p}{bh}. \quad (\text{Я.23})$$

З врахуванням (Я.22) вираз (Я.23) приймає вигляд

$$W_{\text{НП}} = w_p^{\text{num}}(T, v) \frac{V_{\text{деф}}(t)^2}{V_{\text{деф}}^{\text{експ}}(t) \cdot bh}. \quad (\text{Я.24})$$



Знаючи характер зміни об'єму деформування, можна перейти до розрахунку критичних зусиль деформування при різанні шматків м'яса кінцевих розмірів.

М'ясо за різних механізмів деформування буде по-різному руйнуватись під дією лез ножів (рис. Я.4). При різанні м'яса, що деформується за певних умов, як крихке тіло, відбувається його руйнування при дуже малих величинах деформації стискання. Руйнування м'яса у високоеластичному стані, як нами було показано вище, має найбільш складний механізм, що складається з трьох стадій: деформування поверхні під крайкою леза і розсування частини м'яса клином. При різанні м'яса у пластичному стані відбувається входження клина леза у зразок практично відразу після їх контакту і утворення тріщини може не відбутись аж до повного змикання різальних крайок.

В силу цього потрібно розглянути взаємодію ножів з матеріалом для кожного з можливих механізмів деформування.

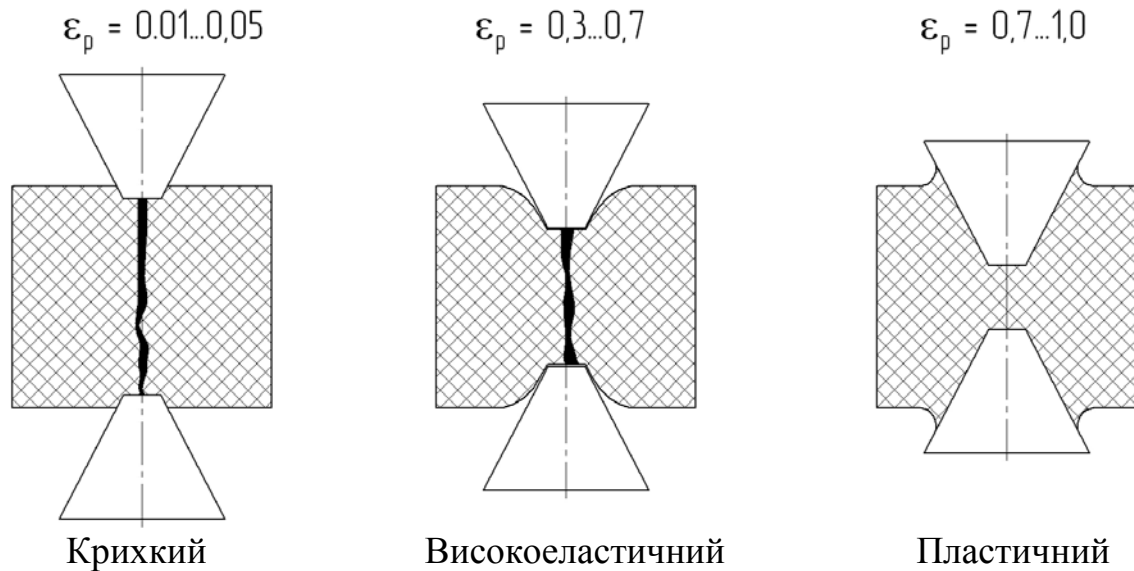


Рис. Я.4 – Схеми руйнування м'яса за різних механізмів деформування

При руйнуванні м'яса у високоеластичному і пластичному стані деформації великі, що вимагає врахування зміни форми шматків.

При крихкому руйнуванні зміна форми шматків незначна і об'єм деформування може бути описаний з урахуванням (Я.16). Тоді зусилля, що виникають при руйнуванні можна розрахувати за формулою:

$$F(t) = 2E_{kp} \cdot b \cdot r \frac{vt}{\sqrt{h^2 - \Delta^2}}, \quad (\text{Я.25})$$

де  $E_{kp}$  - модуль пружності крихкого матеріалу.

При моделюванні процесу руйнування ножами м'язової тканини м'яса з високоеластичними властивостями зробимо наступні припущення:

- площа зони деформування залежить від кутів загострення лез і збільшується пропорційно величині їх просування у м'ясі;
- на бічних поверхнях лез відсутнє проковзування м'яса в процесі деформування аж до початку руйнування.

Можна показати залежність граничного розміру часток, що будуть руйнуватись при різанні від зазору між ножами (рис. Я.5), яка отримана на основі виразу (Я.25). З графіка видно, що регулюванням зазору між крайками лез можна обмежувати розмір часток при подрібненні парою «ніж-гратка».

Аналіз залежності об'єму деформування від кутів загострення ножів показав, що кут  $\delta_1$  доцільно приймати в межах  $0 \dots 5^\circ$ , а кут  $\delta_2$  повинен вибиратись мінімально можливим з точки зору міцності ножа в межах  $45 \dots 80^\circ$ . Збільшення кута  $\delta_2$  призводить до підвищення об'єму деформування, а відповідно і до збільшення зусиль різання і витрат енергії (рис. Я.6).

Радіус заокруглення різальних крайок лез повинен бути мінімально можливим. У розрахунках можна прийняти  $r=0,01$  мм.

Якщо різальна крайка лез має нахил під кутом  $\varphi$  (див. рис. Я.7), то вираз (Я.18) приймає вигляд:

$$F(t) = \frac{k_\sigma \cdot \varepsilon \cdot b}{1 - \frac{\sqrt{\Delta^2 + (\sqrt{h^2 - \Delta^2 - vt})^2}}{h}} \cdot \left( \begin{array}{l} 2r + \left( h - \sqrt{\Delta^2 + (\sqrt{h^2 - \Delta^2 - vt})^2} \right) \times \\ \left( \begin{array}{l} \text{tg} \left( \pi - \arcsin \left( \frac{\Delta}{\sqrt{\Delta^2 + (h^2 - \Delta^2 - vt)^2}} \right) - \delta_2 \right) + \\ + \text{tg} \left( \pi - \arcsin \left( \frac{\Delta}{\sqrt{\Delta^2 + (\sqrt{h^2 - \Delta^2 - vt})^2}} \right) - \delta_1 \right) \end{array} \right) \end{array} \right). \quad (\text{Я.26})$$

При аналітичному дослідженні впливу кута нахилу різальної крайки ножів  $\varphi$  встановлено, що суттєве зменшення об'єму деформації матеріалу, а відповідно і зусиль різання відбувається при розрізанні шматків матеріалу з великими співвідношеннями  $b/h$  (рис. Я.7). Тому цей фактор потрібно враховувати при конструюванні подрібнювачів, оскільки ножі з нахиленими лезами більш складні у виготовленні. Кут нахилу лез ножів, не доцільно робити більшим  $\varphi=10^\circ$ .

Математична модель процесу різання пластичних біополімерів м'яса була розглянута нами у роботі [1]. У поданій моделі зроблено припущення про постійність напруження, що виникає при пластичній деформації м'яса і враховується сила його пружного опору, що обумовлена затупленням леза. Залежність цієї сили від глибини проникнення леза у зразок м'яса в моделі визначається експериментально. Запишемо модель, запропоновану в [1], у відповідності до наших позначень:

$$F_p(\varepsilon) = b \cdot (2\varepsilon \cdot h \cdot \sigma_{cm} \cdot (f + \text{tg}(\delta)) + p_L), \quad (\text{Я.27})$$

де  $\sigma_{cm}$  - рівномірно розподілене навантаження на лезо з боку зразка м'яса;  $f$  - коефіцієнт тертя м'яса по лезу ножа;  $p_L$  - питома сила опору м'яса стисканню (Н/м), що залежить від ступеня затуплення різальної крайки ножа.

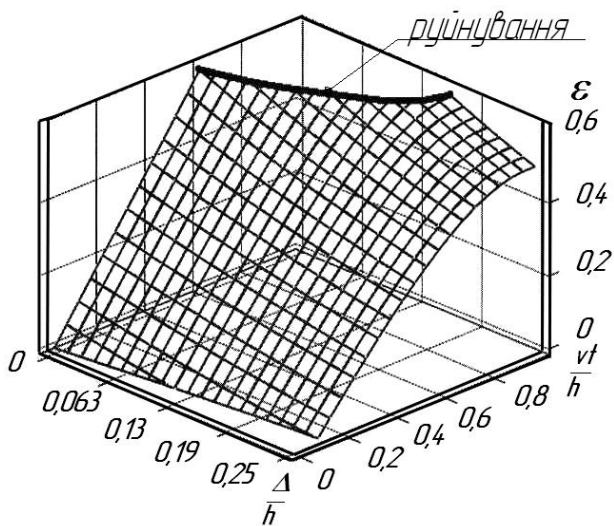


Рис. Я.5 – Графік залежності деформації високо еластичного матеріалу з відносною деформацією руйнування  $\varepsilon=0,6$  при різанні від співвідношення зазору між лезами і висотою шматка м'яса при швидкості руху ножа  $v$

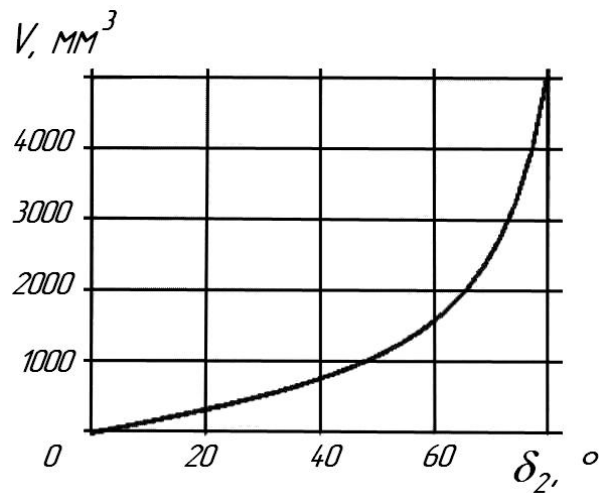


Рис. Я.6 – Графік залежності об'єму деформування при різанні матеріалу до половини товщини при наступних геометричних параметрах:  $h=b=10$  мм;  $\Delta=0$  мм;  $r=0,1$  мм;  $\delta_1=0^\circ$

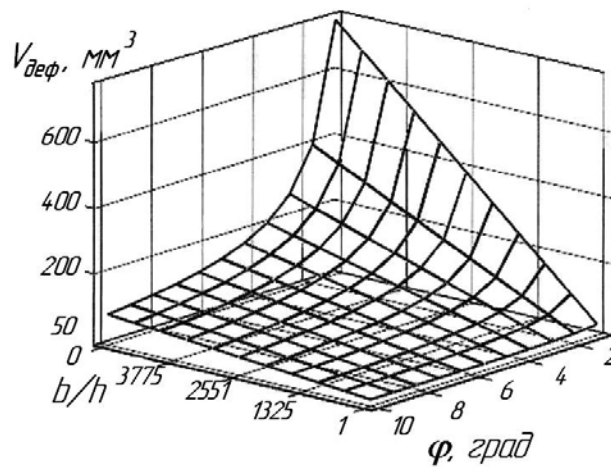


Рис. Я.7 – Залежність об'єму деформації шматків м'яса від кута нахилу різальних крайок

Навантаження  $\sigma_{cm}$  обумовлене розклинюванням розрізаної частини зразка за наявності незруйнованої зони, що знаходиться під різальною крайкою. Якщо прийняти, що при розтягуванні незруйнованої частини матеріалу клином відбувається її пластична деформація, то  $\sigma_{cm}$  можна виразити через межу пластичності матеріалу  $[\sigma_{nl}]$ :

$$\sigma_{cm} = [\sigma_{nl}] \cdot (1 - \varepsilon) \quad (\text{Я.28})$$

З виразу (Я.28) видно, що  $\sigma_{cm}$  має максимальне значення на початку руйнування і зменшується до нуля при повному розрізанні.

Питому силу опору матеріалу стисканню  $p_L$ , з урахуванням (Я.16) і (Я.28) можна записати так:

$$p_L^{nl}(\varepsilon) = \frac{2[\sigma_{nl}]\varepsilon \cdot r}{1 - \varepsilon} \quad (\text{Я.29})$$

Враховуючи (Я.27) і (Я.29) вираз для визначення сили руйнування клином пластичного матеріалу в залежності від відносної деформації буде мати наступний вигляд:

$$F_p^{nl}(\varepsilon) = \varepsilon \cdot b \cdot [\sigma_{nl}] \cdot \left( h \cdot (2f + tg(\delta_1 + \delta_2))(1 - \varepsilon) + \frac{2r}{1 - \varepsilon} \right) \quad (\text{Я.30})$$

При різанні матеріалу за схемою, що представлена на рис. рис. Я.1 відносна деформація матеріалу  $\varepsilon$  визначається за рівнянням (Я.17). На рис. Я.8 подано графічну залежність зміни зусилля при різанні умовного ідеально пластичного матеріалу ножами з різними кутами заточування і притупленням різальної крайки, отримані за виразом (Я.30) при  $[\sigma_{nl}] = 100$  МПа;  $f = 0,2$ .

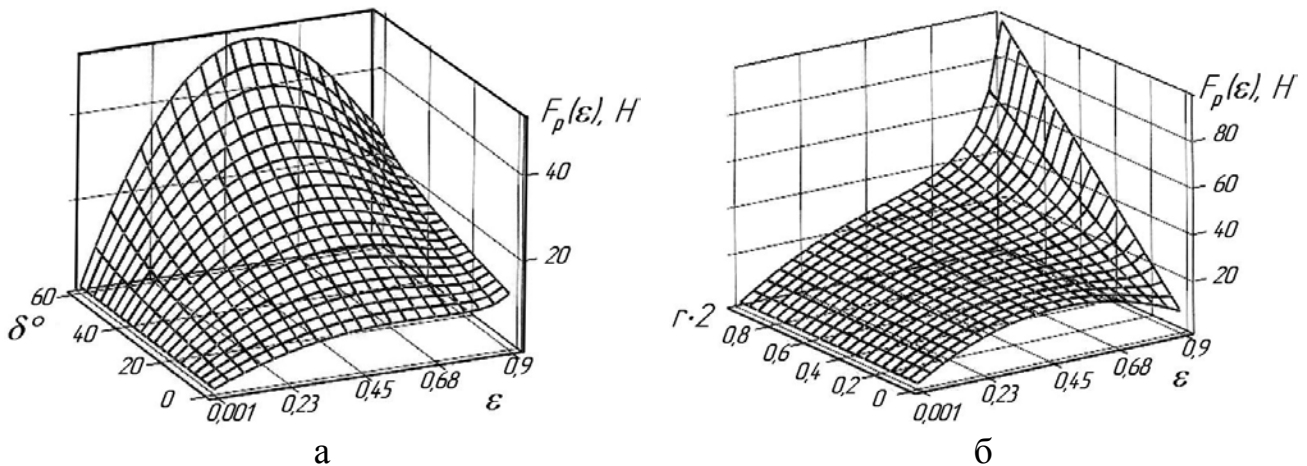


Рис. Я.8 – Зміни зусилля при різанні умовного ідеально пластичного матеріалу з характеристиками  $[\sigma_{nl}] = 100$  МПа;  $f = 0,2$ : а – від кута заточування ножів; б – від радіуса заокруглення різальної крайки

За наявності зазору між лезами теоретично повного розділення шматка матеріалу на частини не відбувається. Але після проходження ножів через зону змикання відбувається розтягування незруйнованої перетинки пластичного матеріалу до розривання за рахунок кінематичного зчеплення. За відсутності зазору між крайками лез певній величині відносної деформації повинен відбуватись чисте зрізування матеріалу за пластичним механізмом. При цьому переміщення матеріалу відносно поверхонь ножів відсутнє і сила різання буде зменшуватись за наступною лінійною залежністю:

$$F_p^{nl}(\varepsilon) = b \cdot h \cdot [\sigma_{nl}] \cdot (1 - \varepsilon_{руйн}) (1 - \varepsilon) \quad (\text{Я.31})$$

де  $\varepsilon_{руйн}$  - відносна деформація, що відповідає початку руйнування пластичного матеріалу при зрізі.

Аналогічне явище буде мати місце при різанні високоеластичних матеріалів з великим значенням відносної деформації руйнування. Окрім того, з

схеми на рис. рис. Я.2 видно, що при проходженні ножів положення змикання за наявності зазору  $\Delta$  незруйнований матеріал у міжножовому просторі знаходиться у складному об'ємному напруженому стані стискання та зсуву і тоді можливе його об'ємне руйнування з утворенням високорозвиненої поверхні.

При руйнуванні біополімерів м'яса під час подрібнення можливі три види граничного стану: текучість, або виникнення помітних пластичних деформацій; в'язке руйнування, або втрата суцільності в умовах розвитку великих пластичних деформацій; крихке руйнування, або втрата суцільності при відсутності помітних пластичних деформацій. Процеси крихкого руйнування і пластичної деформації під навантаженням – це процеси з різною початковою енергією активації, яким відповідають різні мікромеханізми руйнування.

Отримано теоретичні залежності, що відображають в загальному вигляді процеси прирощення нової поверхні у зразках м'яса за різних механізмів руйнування. Розроблена модель температурно-силової залежності міцності полімерів може бути прийнята за основу характеристики процесів, що відбуваються при подрібненні за умови експериментального визначення характерних впливових чинників.

При дослідженні процесів руйнування м'яса при подрібненні було б доцільно встановити можливі екстремальні явища за температур переходів до різних деформованих станів, тому варто провести дослідження в широкому інтервалі температур і достатньо віддалених діапазонах швидкостей деформацій. Доцільно проводити випробування міцності м'яса на зріз. При плануванні експериментальних досліджень міцності біополімерів м'яса потрібно враховувати, що поверхні відгуку функцій залежностей руйнуючих напружень  $\sigma_p$  і деформацій  $\varepsilon_p$  від температури і швидкості деформування будуть як мінімум другого порядку.

В результаті аналітичних досліджень отримані математичні моделі деформування матеріалів з крихкими, високоеластичними і пластичними властивостями, які можуть бути використані при математичному описі процесів руйнування біополімерів м'яса при різанні.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Сухенко В.Ю. Моделювання процесів подрібнення м'яса і синтез технологічних машин: [Монографія] / В.Ю. Сухенко. - Київ: ТОВ ЦП "Компринт", 2013. - 227с.

#### **Я.2. Методи і засоби оцінки впливу технологічних чинників на міцність зразків м'яса при різанні**

Дослідження проводились за допомогою виготовленого пристрою для випробувань зразків м'яса на зрізування (рис. Я.9), що встановлювався на розривній машині для випробування полімерних матеріалів ИР 5057.

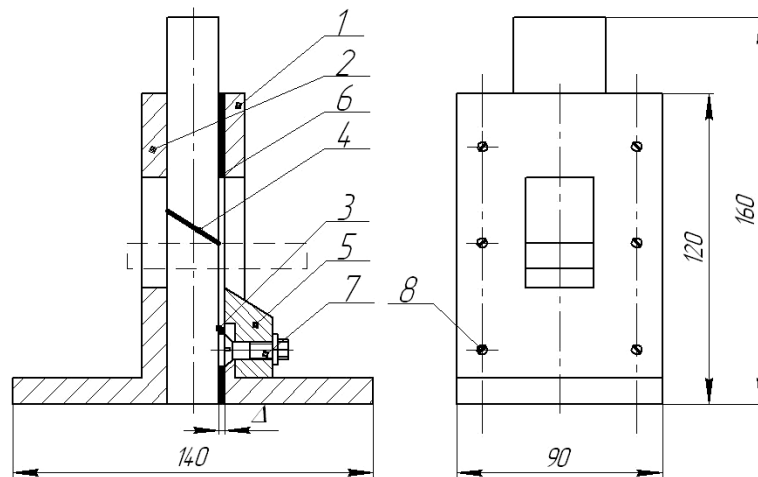


Рис. Я.9 – Пристрій для випробування зразків м'язової тканини ВРХ на зріз: 1,2 – стояки; 3 – вставка; 4 – ніж рухомий; 5 – ніж нерухомий; 6 – прокладка бронзова; 7,8 – різьбові з'єднання

В процесі експериментальних досліджень заміряли навантаження до моменту досягнення зразком межі міцності або текучості. Сили, які виникали при різанні, визначали з використанням тензOMETричного давача і системи перетворення сигналу за допомогою аналогово-цифрового перетворювача та ПЕОМ (рис. Я.10).

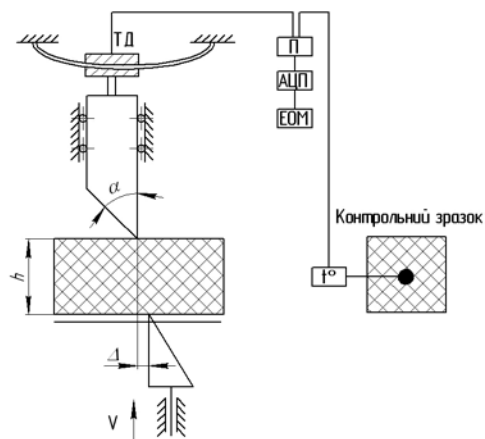


Рис. Я.10 – Схема установки для дослідження процесу різання м'яса лезами ножів

На рис. Я.11 представлена структурна схема вимірювальної системи лабораторної установки, що складається з розривної машини ИР 5057, давачів для вимірювання сил різання та температури зразків м'яса, аналого-цифровий перетворювача, електронно-обчислювальної машини.

Для вимірювання температури використовували кремнієві давачі на базі мікросхеми LM 135, що випускається компанією National Semiconductors SGS – Thomson.

По характеристиці, приведеній на рис. Я.12, видно, що вихідна напруга змінюється від 2,23 В при  $-50^{\circ}\text{C}$  ( $223^{\circ}\text{K}$ ) до 4,79 В при  $+170^{\circ}\text{C}$  ( $443^{\circ}\text{K}$ ). Ці параметри коректно співвідносяться з робочим діапазоном АЦП, що використовувався – від 0 до 5 В.

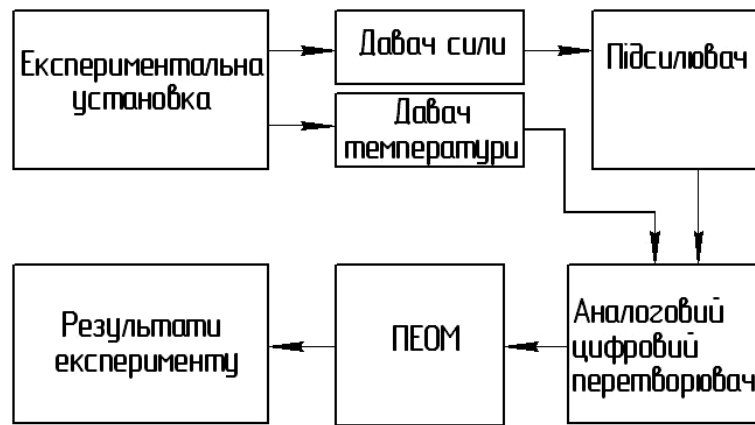


Рис. Я.11 – Вимірювальна система експериментальної установки

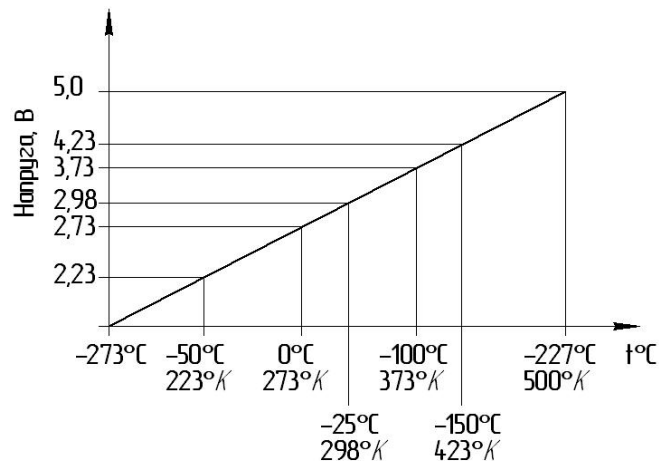


Рис. Я.12 – Температурна характеристика мікросхеми LM 135

Якщо не ввести в схему елементи калібрування, то невідповідність між температурною і вихідною напругою в найгіршому випадку може досягти 9°K. Тому в схему введено резистор для калібрування.

Принципова схема давача температури приведена на рис. Я.13.

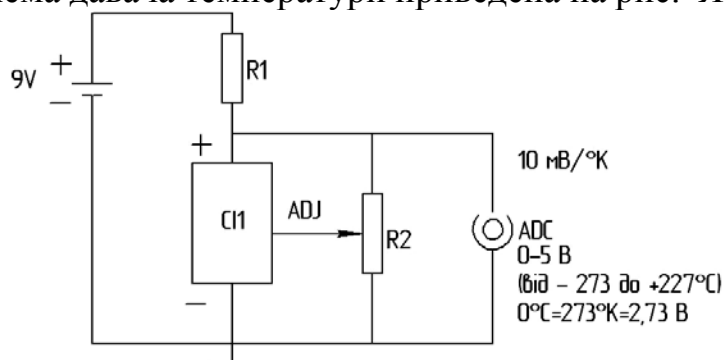


Рис. Я.13 – Принципова схема давача температури

Для забезпечення нормальної роботи цього давача достатньо одного резистора і невеликої гальванічної батареї 9 В.

Машина IP 5057 (рис. Я.14), що використовувалась при дослідженнях призначена для випробування зразків на розтягування, стиснення, вигин, гістерезис, малоциклову втому по переміщенню траверси і малоциклову втому по навантаженню.

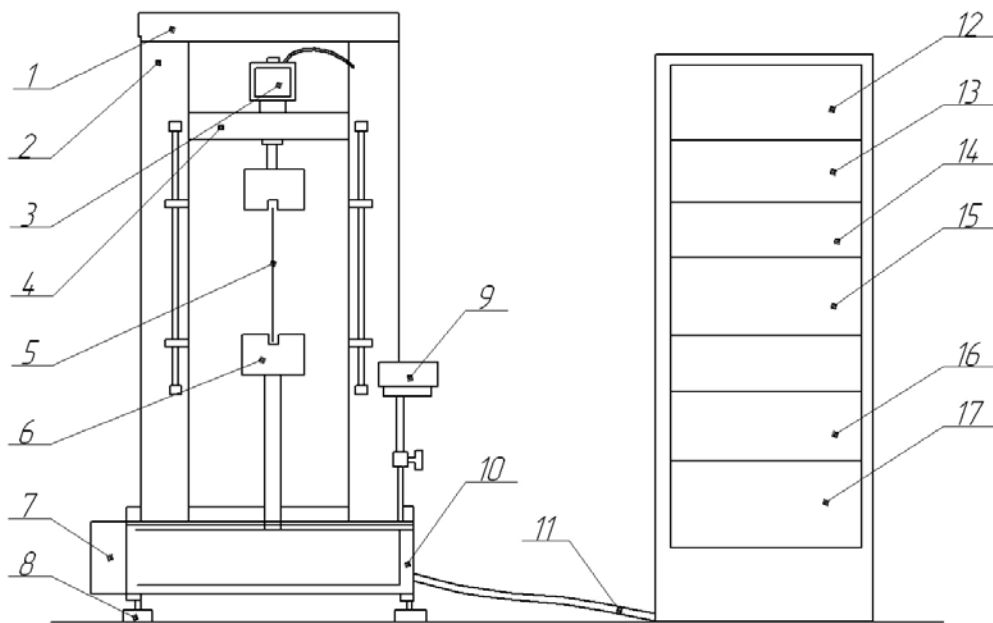


Рис. Я.14 – Загальний вигляд машини ІР-5057: 1 – нерухома траверса; 2 – огорожа для гвинтів; 3 – силівимірювальний давач; 4 – рухома траверса; 5 – зразок; 6 – захвати; 7 – кожух; 8 – віброопори; 9 – пульт керування; 10 – каркас; 11 – пристрої з'єднувальні; 12 – блок вимірювання сили; 13 – блок індикації; 14 – блок завдання модулів; 15 – блок автоматики; 16 – графічний пристрій; 17 – блок живлення

Принцип роботи машини заснований на деформації зразка під дією зростаючого навантаження з фіксацією кінцевих захватів по навантаженню або переміщенню.

Конструкція машини забезпечує при випробуванні запис однієї з наступних видів діаграм: "навантаження - переміщення активного захвату"; "навантаження - час"; "переміщення активного захоплення - час"; "навантаження - деформація". Конструкція машини забезпечує отримання наступної інформації при випробуванні: поточного значення сили; поточного значення переміщення активного захвату; найбільшого значення сили, досягнутої при випробуванні; значення переміщення активного захвату при руйнуванні зразка; двох значень сили, досягши відповідного двох наперед заданих значень переміщення активного захвату.

Для запису результатів експерименту використовувалась спеціальна програма, яка дала змогу зберігати отриману дані у форматі ТХТ, за якими оброблялись результати випробувань.

Обробку результатів експериментів проводили за допомогою ПЕОМ використовуючи програмне забезпечення «Excel», «Graphical analysis», «Statistic 6.0» і «MathCAD Professional » у такій послідовності:

- трансляція даних з файлів, що створені програмою запису цифрового сигналу у форматі «ТХТ» у таблиці «Excel» (величини напруги, що лінійно залежать від сили, яка діяла на давач за еквідистантні проміжки часу);

- масштабування даних за допомогою тарувальних коефіцієнтів і приведення їх до нульового рівня;



- трансляція даних у програму «Graphical analysis»;
- визначення величини руйнівних напружень і деформацій за графічними залежностями «напруження - деформація»;
- розрахунок дисперсій вимірювань і відкидання таких, що мають значні відхилення в результаті похибки дослідів і визначення середньостатистичних значень за допомогою програми «Statistic 6.0».

### Я.3. Планування експериментальних досліджень

Таблиця Я.1 – Матриця планування експерименту

№	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1 x_2$	$x_{12}$	$x_{22}$	$y$
1	+1	+1	0	0	+1	0	Y1
2	+1	-1	0	0	+1	0	Y2
3	+1	+0,5	+0,866	+0,433	+0,25	+0,75	Y3
4	+1	+0,5	-0,866	-0,433	+0,25	+0,75	Y4
5	+1	-0,5	+0,866	+0,433	+0,25	+0,75	Y5
6	+1	-0,5	-0,866	-0,433	+0,25	+0,75	Y6
7	+1	0	0	0	0	0	Y7
8	+1	0	0	0	0	0	Y8
9	+1	0	0	0	0	0	Y9
10	+1	0	0	0	0	0	Y10

Таблиця Я.2 – Значення факторів при рівнях варіювання

№	Температура, °K	Розривна машина		Копер	
		Швидкість, мм/с	$\ln(v^{-1} \cdot 10^6)$	Швидкість, мм/с	$\ln(v^{-1} \cdot 10^6)$
1	293	3	12,7	4243	5,46
2	277	3	12,7	4243	5,46
3	277	7	11,8	5728	5,16
4	277	1	13,8	3142	5,76
5	253	7	11,8	5728	5,16
6	253	1	13,8	3142	5,76
7	273	3	12,7	4243	5,46
8	273	3	12,7	4243	5,46
9	273	3	12,7	4243	5,46
10	273	3	12,7	4243	5,46

Досліди проводили при значеннях чинників, поданих в табл. Я.2. Проведення експериментів і обробку даних проводили використовуючи методи і засоби, що описані в п. 6.5.4.

При попередній обробці даних здійснювали видалення з плану значень, що були завідомо хибними і потім визначали середні значення руйнуючих напружень і деформацій.

В результаті обробки даних вимірювань розраховано коефіцієнти рівняння регресії (6.22) які представлено в табл. Я.3, Я.4.

Значущість коефіцієнтів перевіряли по критерію Ст'юдента, а адекватність рівнянь регресії експерименту перевіряли за критерієм Фішера.

В результаті аналізу встановлено, що для рівнянь регресії не значущими є коефіцієнти, які в табл. Я.3, Я.4 виділено сірим кольором.

Аналіз результатів дослідження дозволяє отримати рівняння, що описують напруження і деформації у м'ясі за різних механізмів руйнування.

Таблиця Я.3 – Коефіцієнти рівняння регресії отриманого в результаті обробки даних випробувань м'яса у різних станах при різанні на швидкостях 1..8 мм/с

Коефіцієнт	Квазікрихкий		Пластичний		Високоеластичний	
	$\sigma_p$	$\varepsilon_p$	$\sigma_p$	$\varepsilon_p$	$\sigma_p$	$\varepsilon_p$
$b_0$	8,814	0,442	3,012	0,356	9,15	0,628
$b_1$	-3,425	-0,19	-2,568	0,265	-1,79	0,139
$b_2$	-1,047	-0,069	-1,135	0,145	-1,484	0,106
$b_{12}$	0,803	0,061	0,953	0,08	0,289	0,02
$b_{11}$	3,385	0,101	-0,0076	0,156	-0,520	0,069
$b_{22}$	-0,459	0,042	0,209	0,013	0,126	0,005

Таблиця Я.4 – Коефіцієнт рівняння регресії отриманого в результаті обробки даних випробувань м'яса у різних станах при різанні на швидкостях 3...6 м/с

Коефіцієнт	Квазікрихкий	Пластичний	Високоеластичний
	$\sigma_p$	$\sigma_p$	$\sigma_p$
$b_0$	9,3	11,06	19,05
$b_1$	-4,7	-9,3	-4,0
$b_2$	0,0577	0,404	0,577
$b_{12}$	-0,012	0,346	0,23
$b_{11}$	3,41	-0,075	-0,05
$b_{22}$	0,145	-0,01	0,614

Запишемо рівняння регресії для дійсних значень змінних використовуючи формулу кодування факторів яка має наступний вигляд:

$$x_i = \frac{2(X_i - X_0)}{X_{max} - X_{min}}, \quad (\text{Я.32})$$

де  $x_i$  - кодоване значення фактору;  $X_i$  - дійсне значення фактору;  $X_0$  - дійсне значення фактору на нульовому рівні;  $X_{max}, X_{min}$  - дійсні значення факторів на межах інтервалу варіювання.

Формули виду (Я.32) для значень змінних температури  $x_i^T$  і швидкості  $x_i^v$ , мають вигляд

$$x_i^T = \frac{N - 333}{60};$$

$$\text{Для } v = 1 \dots 8 \text{ мм/с: } x_i^v = \ln(v^{-1} \cdot 10^6) - 12,7 \quad (\text{Я.33})$$

$$\text{Для } v = 3000 \dots 6000 \text{ мм/с: } x_i^v = \frac{\ln(v^{-1} \cdot 10^6) - 5,46}{0,3}$$

Підставляючи (Я.33) і відповідні коефіцієнти (табл. Я.3, Я.4) в рівняння регресії і виконавши перетворення, отримуємо наступні рівняння.

Напруження руйнування м'яса у квазікрихкому стані при швидкостях деформування 1..8 мм/с:

$$\sigma_p = 130 - 0,849T - 5,6361 \ln\left(\frac{10^6}{v}\right) + 0,013T \ln\left(\frac{10^6}{v}\right) - 9 \cdot 10^{-4} T^2 \quad (\text{Я.34})$$

Деформація до руйнування м'яса у квазікрихкому стані при швидкостях деформування 1...8 мм/с:

$$\varepsilon_p = -0,422 - 0,0093T + 0,394 \ln\left(\frac{10^6}{v}\right) - 2,8 \cdot 10^{-5} T \ln\left(\frac{10^6}{v}\right) - 2,8 \cdot 10^{-4} T^2 \quad (\text{Я.35})$$

Напруження руйнування м'яса у високоеластичному стані при швидкостях деформування 1...8 мм/с:

$$\sigma_p = 41,2 - 0,007T - 2,98 \ln\left(\frac{10^6}{v}\right) + 0,0047T \ln\left(\frac{10^6}{v}\right) - 1,4 \cdot 10^{-4} T^2 \quad (\text{Я.36})$$

Деформація до руйнування м'яса у високоеластичному стані при швидкостях деформування 1...8 мм/с:

$$\varepsilon_p = 0,0023T + 0,102 \ln\left(\frac{10^6}{v}\right) - 1,44 \quad (\text{Я.37})$$

Напруження руйнування м'яса у пластичному стані при швидкостях деформування 1...8 мм/с:

$$\sigma_p = 26,03 - 0,064T - 6,71 \ln\left(\frac{10^6}{v}\right) + 0,017T \ln\left(\frac{10^6}{v}\right) \quad (\text{Я.38})$$

Деформація до руйнування м'яса у пластичному стані при швидкостях деформування 1...8 мм/с:

$$\varepsilon_p = 3,91 - 0,025T + 0,14 \ln\left(\frac{10^6}{v}\right) + 4,4 \cdot 10^{-4} T^2 \quad (\text{Я.39})$$

Напруження руйнування м'яса у квазікрихкому стані при швидкості деформування 3...6 м/с:

$$\sigma_p = 134 - 0,71T - 2,94 \ln\left(\frac{10^6}{v}\right) + 9 \cdot 10^{-4} 7T \ln\left(\frac{10^6}{v}\right) - 9 \cdot 10^{-4} 7T^2 + 0,13 \left(\ln\left(\frac{10^6}{v}\right)\right)^2 \quad (\text{Я.40})$$

Напруження руйнування м'яса у високоеластичному стані при швидкостях деформування 3...6 м/с

$$\sigma_p = 45 - 0,067T - 5,81 \ln\left(\frac{10^6}{v}\right) + 0,00117T \ln\left(\frac{10^6}{v}\right) \quad (\text{Я.41})$$

Напруження руйнування м'яса у пластичному стані при швидкостях деформування 3...6 м/с:

$$\sigma_p = 63 - 0,155T - 0,121 \ln\left(\frac{10^6}{v}\right) + 0,13317T \ln\left(\frac{10^6}{v}\right). \quad (\text{Я.42})$$

#### Я.4. Інженерний розрахунок шнекових подрібнювачів

##### Я.4.1. Визначення геометричних параметрів шнека подрібнювача і частоти його обертання

Базові геометричні параметри шнека рис. Я.15: зовнішній діаметр  $D$ , діаметр вала  $d$ , крок  $b$  і глибина нарізки  $h$ , кут нахилу гвинтової нарізки  $\varphi$ , ширина гребеня витка  $e$ , величина радіального зазору між гребенем нарізки і корпусом циліндра  $\delta$ .

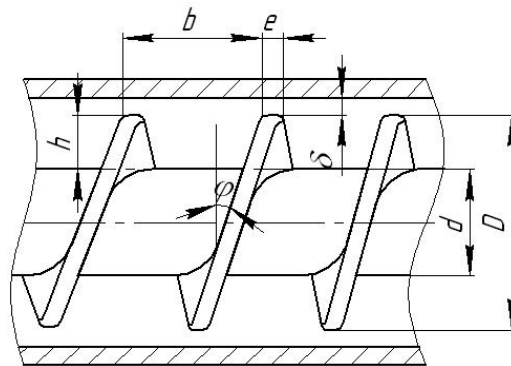


Рис. Я.15 – Геометричні параметри шнека.

За початковий параметр для розрахунку беруть діаметр шнека  $D$ . Якщо діаметр шнека не заданий, то його орієнтовно призначають за формулою:

$$Q = 0,68D^{2,5} \quad (\text{Я.43})$$

де  $Q$  - об'ємна продуктивність машини, м<sup>3</sup>/с;  $D$  - діаметр шнека, м.

Отримане значення діаметра шнека округляють до найближчого більшого значення із стандартного ряду діаметрів шнеків.

Після вибору діаметра шнека і співвідношення  $L/D$  приступають до визначення решти параметрів шнека, які виражають через його діаметр.

Крок нарізки  $t$  і глибина витка шнека  $h$  істотно впливають на продуктивність подрібнювача. Крок витка в зоні завантаження залежить від коефіцієнта тертя м'яса по черв'яку і матеріалу циліндру та від характеристик

сировини. Для ідеального шнека оптимальним кутом нахилу витків був би кут  $45^\circ$ , що відповідає кроку  $b = \pi D$ .

Насправді коефіцієнт тертя матеріалу по шнека залежить від температури і знаходяться в межах 0,3.-0,8. Значення коефіцієнта тертя 0,5 відповідає куту нахилу витків шнека  $19^\circ$ , тобто кроку  $1, 1D$ .

На практиці крок гвинтової нарізки шнека для машин по переробці м'яса рекомендується приймати постійним по довжині шнека і рівним

$$b = (0,8...1,2)D. \quad (\text{Я.44})$$

Зазвичай крок приймається рівним діаметру шнека, тобто  $b = D$ , що відповідає куту піднімання гвинтовою каналу  $17^\circ 42'$ . В цьому випадку забезпечується не лише достатньо добре живлення машини сировиною, але також значно спрощується технологія виготовлення шнека. Для забезпечення високих ступенів стискання м'яса застосовують шнеки зі змінним по довжині циліндра кроком.

Рекомендації з вибору глибини гвинтового каналу залежно від властивостей м'яса, що переробляється, зводяться у кожному окремому випадку до його чутливості до перегрівання.

Глибина гвинтового каналу черв'яків  $h$  для подрібнення м'яса приймається рівною:

в зоні завантаження

$$h = (0,12...0,16)D \quad (\text{Я.45})$$

в напірній зоні

$$h_n = 0,5 \left[ D - \sqrt{D^2 - \frac{4h}{j}(D-h)} \right], \quad (\text{Я.46})$$

де  $j$  - ступінь стиснення матеріалу.

Для шнеків, що транспортують м'ясо глибина нарізки повинна бути в межах

$$h = (0,15...0,30)D \quad (\text{Я.47})$$

При виборі товщини витка  $e$  необхідно враховувати, що її збільшення товщини витка приводить до підвищення витрати потужності, а зменшення - до зниження міцності шнека. Ширину гребеня витка шнека зазвичай приймають рівною

$$e = (0,06...0,1)D \quad (\text{Я.48})$$

Менші значення приймають для діаметрів шнеків більших 125 мм, а великі - для діаметрів менших 125 мм.

Радіальний зазор між внутрішньою поверхнею циліндра і зовнішньою поверхнею витка шнека рекомендується приймати

$$\delta = (0,002...0,005)D \quad (\text{Я.49})$$

Частота обертання шнека істотно впливає на продуктивність подрібнювачів. Зростання продуктивності відбувається до певної частоти обертання, вище якого починається нестабільний рух сировини (частинки

припиняють рухатися в осьовому напрямі, а намагаються обертатися разом із шнеком). Це приводить до зменшення продуктивності, збільшення споживаної потужності і підвищеного зносу робочих частин машини. Для протидії такому обертанню на циліндрі машин роблять нарізки ребер.

Критична частота обертання шнека в зоні завантаження подрібнювача може бути визначена за наступним співвідношенням:

$$n_{кр} = \frac{42,2}{60\sqrt{D}}, \quad (\text{Я.50})$$

де  $D$  - діаметр шнека, м.

Частоту обертання шнеків треба обмежувати для дотримання оптимальної температури нагрівання сировини для забезпечення максимального коефіцієнту тертя і усунення термомеханічної деструкції м'яса.

Робочу частоту обертання шнека можна прийняти такою:

$$n = (0,2 \dots 0,7)n_{кр} \quad (\text{Я.51})$$

де нижні значення числових коефіцієнтів приймають для малих діаметрів шнеків, а верхні - для великих.

#### **Я.4.2. Розрахунок продуктивності шнекових подрібнювачів**

Визначальний вплив на продуктивність машини має напірна зона шнека. Працездатність цієї зони залежить від геометричних параметрів саме шнека. Продуктивність подрібнювача також залежить від конструкції різального вузла.

Об'ємна продуктивність подрібнювача може бути розрахована за формулою:

$$Q = \frac{\alpha K}{K + \beta} n, \quad (\text{Я.52})$$

де  $Q$  - об'ємна продуктивність машини, м<sup>3</sup>/с;  $K$  - постійна геометричної форми різального вузла, м<sup>3</sup>;  $n$  - частота обертання шнека, с<sup>-1</sup>;  $\beta$  - постійна прямого потоку сировини для шнеків з постійними геометричними розмірами, змінними кроком і глибиною нарізки, м<sup>3</sup>;

При розрахунках об'ємної продуктивності екструдера для подрібнення м'яса розглядається повна довжина нарізаної частини шнека.

Для розрахунку максимальної продуктивності подрібнювача, що працює з різальним вузлом з певним опором, для варіювання глибини нарізки шнека розроблена програма (Додаток Я.5).

#### **Я.4.3. Визначення потужності приводу подрібнювача**

Величина потужності приводу машини є індикатором раціонального вибору типу приводу, витрат енергії і впливає на завантаженість робочих органів.

Потужність, що витрачається, може бути розрахована на підставі наявних моделей поведінки м'яса в процесі його переробки як сума потужностей, споживаних у зоні завантаження, напірній зоні і ц різальному вузлі.

Потужність приводу, споживана в зоні завантаження, витрачається на подолання сил тертя при русі корки сировини. Величина її складає близько 10 % від сумарної споживаної машиною потужності, якою можна знехтувати. Потужність, що витрачається в напірній зоні витрачаються на примусове проштовхування маси по гвинтовому каналу шнека  $N_1$ .

Потужність в напірній зоні з постійними геометричними розмірами шнека:

$$N_1 = \frac{\pi^3 \cdot D^3 \cdot n^2 \cdot \mu_{ef} \cdot l_0}{h} + \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot n \cdot h \cdot \operatorname{tg} \varphi}{2} \Delta P_{\text{зол}}, \quad (\text{Я.53})$$

де  $\mu_{ef}$  - ефективна в'язкість сировини у гвинтовому каналі, Па;  $\Delta P_{\text{зол}}$  - перепад тиску у різальному вузлі.

Потужність у напірній зоні зі змінним кроком гвинтової нарізки:

$$N_1 = \frac{\pi^5 (d+h)^3 d^2 n^2 \mu_{ef} (\Gamma - eR)}{h} + \alpha_1 n \Delta P_{\text{зол}} \quad (\text{Я.54})$$

де  $\Gamma$  - коефіцієнт, який визначається за формулою:

$$\Gamma = \frac{2,3}{2\Delta b} \ln \frac{\cos^2 \varphi_k}{\cos^2 \varphi_n} + \frac{\pi(\varphi_n + \varphi_k)}{360(d+h)}, \quad (\text{Я.55})$$

де  $\varphi_n$  - кут нахилу гвинтової лінії на початку напірної зони по середньому діаметру;  $\varphi_k$  - кут нахилу гвинтової лінії в кінці напірної зони по середньому діаметру.

$$\varphi_n = \operatorname{arctg} \frac{b_n}{\pi(D-h)}; \quad \varphi_k = \operatorname{arctg} \frac{b_k}{\pi(D-h)} \quad (\text{Я.56})$$

Величина  $R$  визначається за формулою:

$$R = \frac{2,3}{\pi^2 (d+h)^2} \ln \frac{b_n^2 \cos^2 \varphi_n}{b_k^2 \cos^2 \varphi_k} + \frac{\pi(\varphi_n - \varphi_k)}{180(d-h)\Delta b} \quad (\text{Я.57})$$

Потужність в напірній зоні зі змінною глибиною гвинтового каналу шнека:

$$N_1 = \frac{\pi^5 (b-e) l_0 J n^2 \mu_{ef}}{b} + \alpha_2 n \Delta P_{\text{зол}} \quad (\text{Я.58})$$

де  $J$  - коефіцієнт, що визначається за формулою

$$J = \frac{\pi^2 D^2 - 4r^2}{2} + \frac{(d_2 + D)^3 - (d_n + D)^3}{3(d_2 - d_n)} + \frac{2,3\pi^2 D^5}{(b^2 + \pi^2 D^2)(h_n - h_2)} \ln \frac{h_n}{h_2}, \quad (\text{Я.59})$$

де  $h_n$  - глибина гвинтового каналу на початку напірної зони, м;  $h_2$  - глибина гвинтового каналу на кінці шнека, м;  $d_2$ ,  $d_n$  - відповідно, діаметр сердечника на кінці шнека і на початку напірної зони, м;  $\alpha_2$  - постійна прямого потоку, м<sup>3</sup>.

Загальна потужність, що витрачається на просування матеріалу по каналу подрібнювача:

$$N = N_1 + N_2 \quad (\text{Я.60})$$

В додатку наведена програма розрахунку  $N_2$ .

Потужність електродвигуна приводу екструдера повинна бути більшою від розрахункової, щоб компенсувати не враховані витрати енергії:

- на захоплення і транспортування сировини матеріалу в зоні завантаження;
- на просування корка сировини, в напірній зоні;
- на подолання сил тертя і осьової реакції в упорному підшипнику.

Перераховані витрати можуть бути враховані коефіцієнтом корисної дії  $\eta$  подрібнювачів, який при переробці м'яса складає  $\eta = 0,2 \dots 0,3$ . Тоді потужність електродвигуна приводу буде наступною:

$$N_{заг} = \frac{N_1 + N_2}{\eta}. \quad (\text{Я.61})$$

Після визначення потужності електродвигуна приводу приступають до вибору його типу за відповідними каталогами.

В приводі подрібнювачів доцільно використовувати редуктори типу ЦДП або ЦДПВ з клинопасовими передачами та змінними шківками.

#### Я.4.4. Зменшення маси основних деталей подрібнювачів

Основна мета розрахунку полягає в тому, щоб на підставі розрахункових формул (Я.62) і (Я.63) знайти такі оптимальні геометричні параметри деталі (параметри управління  $x = (x_1 \dots x_i)$ ), які разом з характеристиками міцності і ефективним відведенням тепла забезпечували б мінімальну масу конструкції:

$$M(\bar{x}) = \rho V(\bar{x}) \quad (\text{Я.62})$$

$$\sigma_{екв} = F_j(\bar{x}) \quad (\text{Я.63})$$

де  $M(\bar{x})$  - маса ділянки деталі одиничної довжини;  $V(\bar{x})$  - залежність об'єму конструкції деталі від параметрів управління;  $y_{ej}$  - еквівалентне напруження в небезпечних перетинах деталі;  $F_j$  - залежність еквівалентного напруження в небезпечних перетинах деталі від параметрів управління;  $j = (1 \dots k)$ ;  $k$  - число небезпечних перетинів конструкції деталі.

У зв'язку з цим ставиться завдання: знайти вектор  $x = (x_1 \dots x_i)$ , який мінімізує цільову функцію, що характеризує витрату матеріалу:

$$M(\bar{x}) \rightarrow \min \quad (\text{Я.64})$$

При цьому повинні виконуватися обмеження по міцності

$$\max \sigma_{екв} \leq [\sigma] \quad (\text{Я.65})$$

і геометричні обмеження по параметрах управління

$$a_i \leq x_i \leq b_i \quad (\text{Я.66})$$

де  $i = (1 \dots k_u)$ ,  $k_u$  - кількість параметрів управління;  $\max \sigma_{екв}$  - максимальна еквівалентне напруження в небезпечних перетинах деталі;  $[\sigma]$  - напруження, що допускається для матеріалу деталі;  $x_i$  - геометричні розміри деталі, які



приймаються рівними:  $a_i$ ,  $b_i$  - найменший і найбільший значення керованих параметрів;  $\rho$  - щільність матеріалу деталі.

Розрахунки на міцність деталей подрібнювача виконуються після попереднього вибору геометричних розмірів шнека і розрахунку технологічних параметрів. Розрахунки виконуються з урахуванням виду силового навантаження і режиму роботи. Метою розрахунків на міцність є визначення розмірів основних деталей машини (товщина стінки циліндра, розмірів сполучних елементів, максимального прогинання шнека), вибір і розрахунок опорних елементів та ін.

Максимальний тиск  $P_{max}$  розвивається шнеком, коли отвори у гратці різального вузла немає виходу матеріалу з машини (продуктивність рівна нулю)

$$\alpha_i F_\alpha n - \beta_i F_\beta \frac{P_{max}}{\mu_c} = 0 \quad (\text{Я.67})$$

Звідки

$$P_{max} = \frac{\alpha_i F_\alpha n \mu_c}{\beta_i F_\beta}, \quad (\text{Я.68})$$

де  $\mu_c$  - середня по довжині шнека в'язкість сировини, що переробляється;  $\alpha_i$  і  $\beta_i$  - постійні прямого і зворотного потоків сировини для шнеків з постійною або змінною глибиною нарізки в напірній зоні або змінним кроком;  $n$  - частота обертання шнека;

Значення середньої в'язкості сировини  $\mu_c$  визначають з наступного співвідношення:

$$Q = \alpha_i F_\alpha n - \beta_i F_\beta \frac{\Delta P_{заг}}{\mu_c}, \quad (\text{Я.69})$$

де  $Q$  - продуктивність машини;  $\Delta P_{заг}$  - перепад тиску в різальному вузлі.

Звідки

$$\mu_c = \frac{\beta_i F_\beta \Delta P_{заг}}{\alpha_i F_\alpha n - Q}. \quad (\text{Я.70})$$

Максимальне осьове зусилля, що діє на шнек

$$S_{oc} = P_{max} F, \quad (\text{Я.71})$$

де  $F$  - площа поперечного перетину шнека

$$F = \frac{\pi D^2}{4} \quad (\text{Я.72})$$

де  $D$  - зовнішній діаметр шнека, м.

Крутний момент на черв'яку, Н·м:

$$M_{кр} = 573 \frac{N_1}{n}, \quad (\text{Я.73})$$

де  $N_1$  - потужність, що витрачається на просування матеріалу по каналу шнека, Вт;  $n$  - частота обертання шнека,  $c^{-1}$ .

#### Я.4.5. Розрахунок шнеків на міцність і жорсткість

Процеси оброблення м'яса у подрібнювачах ведуться при значному тиску, який інколи досягає 50 МПа, що визначає підвищені вимоги до розрахунків на міцність деталей і вузлів таких машин.

Основна вимога, що висувається до шнеків, - забезпечення найбільшої продуктивності за необхідної якості подрібнення і найменшої споживаної потужності, які залежать не тільки від властивостей м'яса, але і від конструктивних параметрів шнека.

В даний час наявні в літературі рекомендації для проектування шнеків недостатні, тому що не враховують характеристик їх міцності. Наприклад, вибрана за рекомендаціями довжина  $l$ , відношення  $D/D_1$  можуть задовольняти вимогам продуктивності і якості технологічного процесу, але за рахунок поздовжньо-поперечного вигину шнека відбуватиметься передчасний знос циліндра, що призведе до додаткових витрат потужності.

Застосовується методика розрахунку шнеків на міцність, жорсткість і стійкість в широкому інтервалі зміни їх робочої довжини  $l = (10...35)D$  під дією гармонійних поперечних навантажень.

Завданням розрахунку на міцність є перевірка попередньо спроектованого шнека і визначення максимально допустимого прогинання з метою недопущення контакту витків шнека з внутрішньою поверхнею циліндра. Розрахункова схема шнека подана на рис. Я.16.

Розрахунок на міцність шнека проводять, виходячи з максимально можливих величин крутного моменту  $M_{кр}$ , осьового зусилля  $S_{oc}$  і розраховують по формулах (Я.72), (Я.73).

Розрахунок шнека можливий у двох варіантах, залежно від його жорсткості (гнучкості):

- розглядається дія максимального осьового зусилля  $S_{oc}$  і крутного моменту  $M_{кр}$  з урахуванням власної ваги шнека;
- розрахунок на поздовжньо-поперечний вигин з урахуванням максимального осьового зусилля  $S_{oc}$  і власної ваги шнека.

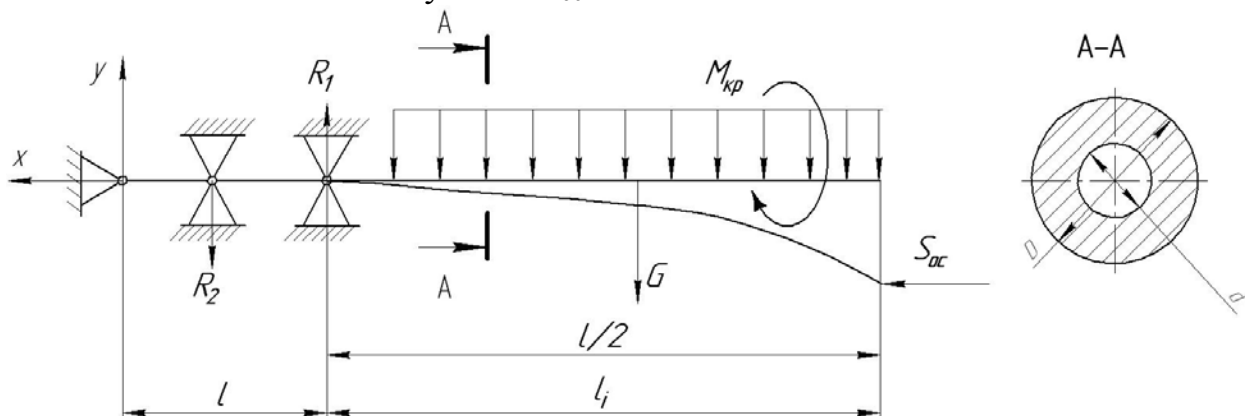


Рис. Я.16 - Розрахункова схема навантаження шнека і його опор:  $S_{oc}$  - осьове зусилля від тиску перед різальним вузлом;  $G$  - вага шнека;  $R_1, R_2$  - реакції в опорах.

Для визначення варіанту розрахунку перевіряємо шнек на гнучкість за формулою:

$$\lambda_2 = \frac{k_{зац} L}{i}, \quad (\text{Я.74})$$

де  $\lambda_2$  - гнучкість вала шнека;  $k_{зац}$  - коефіцієнт, залежний від способу закріплення кінців вала (в даному окремому випадку  $k_{зац} = 2$ );  $L$  - довжина шнека, м;  $i$  - радіус інерції перетину, що визначається за формулою

$$i = \sqrt{J/F}, \text{ м} \quad (\text{Я.75})$$

де  $J = \pi D^4/64$ , м<sup>4</sup> - момент інерції поперечного перетину  $A-A$  (див. рис. Я.16);  $F$  - площа поперечного перетину шнека в перетині  $A-A$ , м<sup>2</sup>.

Після підстановки значень  $J$  і  $F$  отримаємо:

$$i = \frac{D}{4} \sqrt{1 + \left(\frac{d}{D}\right)^2} \quad (\text{Я.76})$$

Тоді за формулою (Я.74) знаходимо значення  $\lambda$ . Якщо  $\lambda_2 < 50$ , то розрахунок шнека проводимо за першим варіантом, а якщо  $\lambda_2 > 50$ , то за другим.

Перший варіант розрахунку. Максимальне дотичне напруження на поверхні шнека:

$$\tau_{\max} = M_{кр} / W_p, \quad (\text{Я.77})$$

де  $W_p$  - полярний момент опору, м<sup>3</sup>:

$$W_p = \frac{\pi D^3}{16} \left( 1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4 \right) \quad (\text{Я.78})$$

Остаточні дотичні напруження:

$$\tau_{\max} = \frac{16 M_{\delta\delta}}{\pi D^3 \left( 1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4 \right)} \quad (\text{Я.79})$$

Нормальне напруження викликається осьювою силою  $S_{oc}$  і розподіленим навантаженням  $q$ . Максимальне напруження виникатиме у місці закріплення шнека (близько першого підшипника)

$$\sigma_{\max} = \frac{S_{oc}}{F} + \frac{M_{зг\max}}{W_{н.о.}}, \quad (\text{Я.80})$$

де  $M_{зг\max}$  - максимальний згинальний момент від розподіленого навантаження шнеку, Н·м;  $W_{н.о.}$  - осьовий момент опору відносно нейтральної вісі, м<sup>3</sup>:

$$M_{зг\max} = \frac{\rho g F L^2}{2}, \quad (\text{Я.81})$$

де  $\rho$  - густина матеріалу шнека,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  - прискорення вільного падіння;  $F$  - площа поперечного перетину шнека,  $\text{м}^2$ .

Осьовий момент опору відносно нейтральної осі:

$$W_{н.о.} = \frac{\rho g F L^2}{8} \left( 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^4 \right) \quad (\text{Я.82})$$

Після підстановки відповідних значень і перетворень рівняння (Я.80) прийме вигляд:

$$\sigma_{\max} = \frac{4S_{oc} \left( 1 + \left( \frac{d}{D} \right)^4 \right) + \pi \rho g D L^2 \left( 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^4 \right)}{\pi D^2 \left( 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^4 \right)}. \quad (\text{Я.83})$$

Умова міцності шнека за третьою теорією міцності:

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_{\max}^2 + 4\tau_{\max}^2} \leq [\sigma] \quad (\text{Я.84})$$

де  $[\sigma]$  - допустиме напруження для матеріалу шнека і заданих умов його експлуатації,  $\text{Н/м}^2$ .

Максимальне прогинання шнека від розподіленого навантаження  $q$ :

$$\xi_{\max} = \frac{qL^4}{8EJ}, \quad (\text{Я.85})$$

де  $E$  - модуль пружності матеріалу шнека,  $\text{Н/м}^2$ ;  $J$  - момент інерції поперечного перетину шнека,  $\text{м}^4$ .

Другий варіант розрахунку. При поздовжньо-поперечному згинанні рівняння зігнутої вісі шнека:

$$EJ \frac{d^2 y}{dx^2} = M_{зг} \quad (\text{Я.86})$$

Рівняння згинального моменту:

$$M_{зг} = \frac{q}{k^2} (1 - \cos kx) + M_n \cos kx + \frac{Q_n}{k} \sin kx, \quad (\text{Я.87})$$

де параметр  $k = \sqrt{P/EJ}$ ;  $M_n$  - початкове значення згинального моменту при  $x=0$ ;  $Q_n$  - початкова величина поперечної сили при  $x=0$ , яка дорівнює:

$$Q_n = \frac{q \left( L - \frac{1}{k} \sin kL \right)}{\cos kL} \quad (\text{Я.88})$$

Підставивши (Я.88) значення  $Q_n$  в рівняння (Я.87), отримаємо

$$M_{зг} = \frac{q}{k^2} (1 - \cos kx) + \frac{q \left( L - \frac{1}{k} \sin kL \right)}{k \cos kL} \sin kx \quad (\text{Я.89})$$

Для визначення  $M_{зг\max}$  визначимо з рівняння (Я.89) максимум:

$$\frac{dM_{32}}{dx} = \frac{q}{k} \sin kx + \frac{q \left( L - \frac{1}{k} \sin kL \right)}{\cos kL} \cos kx = 0 \quad (\text{Я.90})$$

Після відповідних перетворень отримаємо:

$$\operatorname{tg} kx = \operatorname{tg} kL - \frac{kL}{\cos kL} \quad (\text{Я.91})$$

З рівняння (Я.91) знаходимо значення  $x$ , при якому згинальний момент  $M_{32}$  буде максимальним, і за формулою (Я.89) знайдемо його величину  $M_{32 \max}$ .

Максимальне дотичне напруження на поверхні шнека:

$$\tau_{\max} = M_{kp} / W_p. \quad (\text{Я.92})$$

З урахуванням полярного моменту опору перетину шнека максимальне дотичне напруження буде наступним:

$$\tau_{\max} = \frac{16M_{kp}}{\pi D^3 \left( 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^4 \right)} \quad (\text{Я.93})$$

Максимальне нормальне напруження від максимального осевого зусилля  $S_{oc}$  і розподіленого навантаження  $q$  розраховуємо за формулою (Я.80). Перевіряємо міцність шнека за умовою (Я.84).

Максимальне прогинання шнека  $\xi_{\max} = y_{\max}$  для другого варіанту розрахунку визначається наступним чином.

Підставимо значення згинального моменту з рівняння (Я.89) в диференціальне рівняння зігнутої вісі шнека (Я.91) і отримаємо:

$$EJ \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{q}{k^2} (1 - \cos kx) + A \sin kx, \quad (\text{Я.94})$$

де 
$$A = \frac{q \left( L - \frac{1}{k} \sin kL \right)}{k \cos kL}$$

Після подвійного інтегрування рівняння (Я.94) і знаходження значень постійних інтегрування  $C_1$  і  $C_2$  рівняння зігнутої вісі шнека прийме вигляд:

$$\begin{aligned} EJy = & \frac{qx^2}{2k^2} + \frac{q}{k^4} \cos kx - \frac{A}{k^2} \sin kx + \left( \frac{q}{k^3} \sin kL + \frac{A}{k} \cos kL - \frac{PL}{k^2} \right) x + \\ & + \frac{qL^2}{2k^2} - \frac{q}{k^4} \cos kL + \frac{A}{k^2} \sin kL - \frac{qL}{k^3} \sin kL - \frac{AL}{k} \cos kL \end{aligned} \quad (\text{Я.95})$$

Максимальне прогинання шнека  $\xi_{\max} = y_{\max}$  буде при  $x=0$  і визначається за формулою:

$$\xi_{\max} = \frac{1}{EJ} \left[ \frac{q}{k^2} \left( \frac{1}{k^2} + \frac{L^2}{2} \right) - \frac{1}{k} \left( \frac{q}{k^3} + AL \right) \cos kL - \frac{1}{k^2} \left( \frac{qL}{k} - A \right) \sin kL \right] \quad (\text{Я.96})$$

Визначивши максимальний прогин за формулою (Я.96), необхідно порівняти його величину з розрахованою і практично встановленою величиною зазору між шнеком і внутрішньою поверхнею циліндра. Отриманий прогин має бути меншим від цього зазору.

Для розрахунку на міцність і жорсткість консольного вала розроблена програма (додаток Я.5.4).

#### **Я.4.6. Особливості розрахунку циліндрів подрібнювачів**

Циліндр є основним вузлом машини для подрібнення м'яса. На циліндрі закріплений різальний і завантажувальний пристрій, а в середині нього обертається шнек. Різновиди обігрівання або охолодження циліндра дозволяють забезпечувати заданий технологічний процес подрібнення. Циліндри подрібнювачів м'яса повинні мати високу міцність, оскільки вони при підвищеному тиску (до 50 МПа), зносостійкість і корозійну стійкість.

Вони класифікуються за наступними основними ознаками:

1) за способом кріплення до приводної частини машини: з фланцевим або байонетним з'єднанням;

2) за конструкцією та складністю виготовлення циліндра: цілісні або роз'ємні, відлиті або зварені;

3) за способом обігрівання (охолодження) циліндра: з сорочками обігрівання (охолодження) теплоносіями або без сорочок.

Циліндри подрібнювачів можна виготовляти методом глибокого свердлення з наступним термообробленням і зміцненням.

Циліндр складається із завантажувальної і робочої частин. Завантажувальну частину виготовляють із сталевого або чавунного литва із зміщеним щодо вісі шнека прямокутним отвором із заокругленими кутами. Довжина отвору рівна  $(1,2... 1,5)D$  при кроці нарізки в зоні завантаження рівному діаметру шнека.

В процесі роботи подрібнювача в циліндрі розвивається тиск до 50 МПа, тому їх треба розглядати як сталеву оболонку, що працює під внутрішнім надлишковим тиском. Тиском теплоносія (охолоджувача) в сорочці циліндра можна нехтувати, тому що він досить малий у порівнянні з внутрішнім.

Розрахунок зводиться до визначення товщини стінки циліндра і напруження, що виникають в циліндрі від внутрішнього тиску і перепаду температур на зовнішній і внутрішній поверхнях.

#### **Я.5. Програми для розрахунку конструктивних і технологічних параметрів подрібнювачів м'яса**

Таблиця Я.5 - **Прийняті позначення в програмах**

№	Найменування величин	Позначення	Позначення в програмі
1.	Зовнішній діаметр шнека	$D$	D
2.	Діаметр осьового отвору шнека, м	$D$	d1

3.	Довжина нарізної частини шнека, м	$L$	L
4.	Поточна координата по довжині шнека	$x$	X
5.	Крок витка, м	$t$	T
6.	Кут підйому витка	$\varphi$	FI
7.	Максимальний тиск на кінці вала	$P_{max}$	P
8.	Дотичне напруження	$\tau$	TAU
9.	Модуль пружності 1 роду	$E$	E
10.	Допустиме напруження SIG	$[\sigma]$	SIG
11.	Густина матеріалу шнека	$\rho$	RO
12.	Поперечна сила	$Q$	QP
13.	Крутний момент	$M_{кр}$	MKR
14.	Вигинаючий момент	$M_{зг}$	MIZ
15.	Еквівалентне напруження	$\sigma_{екв}$	SIGEKV
16.	Потужність приводу	$N$	N
17.	Прискорення вільного падіння	$g$	G

**Я.5.1. Програма розрахунку максимальної продуктивності подрібнювача при певному опорі різального вузла. Мова БЕЙСІК**

30 CLS

40 INPUT "ВЕЛИЧИНА РАДІАЛЬНОГО ЗАЗОРУ DL [м]"; DL

50 INPUT "КОЕФ-Т ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ РІЗ. ВУЗЛА, [м] До = "; K

60 INPUT "ШВИДКІСТЬ ШНЕКА, [об/с] N = "; N

70 INPUT "ВИБРАНИЙ СТУПІНЬ СТИСНЕННЯ МАТЕРІАЛУ I = "; W

80 INPUT "ДОВЖИНА ШНЕКА, [м] L = "; L

90 INPUT "ДІАМЕТР ШНЕКА, [м] D = "; D

100 INPUT "ГЛИБИНА ГВИНТОВОГО КАНАЛУ В ЗОНІ ЗАВАНТАЖЕННЯ  
ЗМІНЮЄТЬСЯ ВІД [м]

HN = "; HN

110 INPUT", [м] ДО НК = " НК

120 INPUT "ШИРИНА ГРЕБЕНЯ ВИТКА ЗМІНЮЄТЬСЯ ВІД, [м] EN = "; EN

130 INPUT", [м] = EK

140 PI = 3.141592

150 FO = ATN(1 /PI)

160 R = D / 2

170 T = D

180 DL = DL \* D

190 HN = HN \* D

200 НК = НК \* D

210 EN = EN \* D

220 EK = EK \* D

230 QMAX = 1E-10

240 FOR HI = HN TO НК STEP .01 \* D

250 H2 = .5 \* (D - SQR(D - 2 - (4 \* HI \* (D - HI» / W))

```

260 FOR E = EN TO EK STEP .01 * D
270 J6 = (L / (HI - H2)) * LOG(H1 / H2)
280 J7 = LI (HI * H2)
290 J8 = L/2 * ((HbH2)/(HI-2 * H2-2))
300 J9 = (L / (HI - H2)) * LOG((2 * R - H2) / (2 * R - HD))
310 S = ((2 * R * J7 - J6) / (2 * R * TAN(FO)))
320 F = ((2 * R * J8 - COS(2 * FO)* J7) / (R * SIN(2 * FO))) + (TAN(FO) * (J6 -
J9)) / 4 * R - 2
330 B = (T - E) / (12 * F)
340 A = PI * O * (T - E) * 8 / (2 * P)
350 F1# = ATN(T / (2 * PI * (R - HI)))
360 F2# = ATN(T / (2 * PI * (R - H2)))
370 J = 3 * 3.14 2 * D 2 * DL - 3
380 I = (SIN(F1#))3 * (SIN(F2#))3 * (HI - H2)
390 U = I * J
400 Z# = SIN(F1#)
410 Z2# = SIN(F2#)
420 'PRINT Z#, Z2#, F1#, F2#, HI, H2
430 V = 10 * L * T * E * (Z# - 3 - Z2# ^ 3)
440 G = U / V
450 Q = A*K*N/(K + B + G)
460 IF Q < QMAX THEN 480
470 QMAX = Q: HI1 = HI: H21 = H2:A1 = A:B1 = B:G1 = G:E1 = E
480 NEXT E 490 NEXT HI
500 PRINT "МАКСИМАЛЬНА ПРОДУКТИВНІСТЬ = QMAX; " [м3/с]"
510 PRINT "ПРИ:"
520 PRINT "ГЛИБИНІ ГВИНТОВОГО КАНАЛУ"
530 PRINT "В ЗОНІ ЗАВАНТАЖЕННЯ-"; HI1; "[м]"
540 PRINT "В ЗОНІ НАПРІЙ"; H21; "[м]"
550 PRINT "І ПРИ ПОСТІЙНИХ"
590 PRINT "ШИРИНІ ГРЕБЕНЯ ВІТКА ШНЕКА = " E1; "[м]"
600 END

```

**Я.5.2. Програма розрахунку технологічної потужності подрібнювача зі змінною глибиною нарізки шнека. Мова Бейсік.**

```

10 REM ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ 20 PI
= 3.14
30 INPUT "ГЛИБИНА ГВИНТОВОГО КАНАЛУ ШНЕКА В ЗОНІ
ЗАВАНТАЖЕНЬ, [м] HI = "; HI
40 INPUT "На початку ЗОНИ, [м] HN'- = "; HN
50 INPUT "НА КІНЦІ ШНЕКА, [м] H2 = "; H2
60 INPUT "КРОК ГВИНТОВОЇ ЛІНІЇ, [м] l-"; T
70 INPUT "ДІАМЕТР ШНЕКА, [м] D = "; D
80 INPUT "ШВИДКІСТЬ ШНЕКА, [об/с] N = "; N

```



```

90 INPUT "ПЕРЕПАД ТИСКУ, [Па] DP = "; DP
100 INPUT "ШИРИНА ГРЕБЕНЯ НАРІЗКИ, [м] E = "; E
110 INPUT "ДОВЖИНА ЗОНИ, [м] Ldoz = "; LDOZ
120 INPUT "ДОВЖИНА ШНЕКА, [м] L"; L
130 INPUT "ПОСТІЙНА ПРЯМОГО ПОТОКУ, [м3] A = "; A2
140 D1 = .003 * D: X = L - LDOZ: C = (H1 - H2) / L
170 HN = H1 - C * X: D1 = D - 2 * HN
190 D2 = D - 2 * H2: 200 HSR = (H2 + HN) / 2
210 SI = (PI ^ 2 * (D - HSR) * (D - 2 * HSR) * N) / (60 * HSR * SQR(PI ^ 2) * (D - 2 * HSR) ^ 2 + (T ^ 2))
220 J1 = ((PI - 2) * (D - 2) - (4 * (T * 2))) / (PI - 2)
230 J2 = ((D + D2) - 3 - (D + DL) 3) / (3 * (D2 - DD))
240 J3 = ((2.3 * (PI ^ 2) * (D - 5)) * (LOG(HN / H2)) / 2.3) / (((T ^ 2) + (PI ^ 2) * (D ^ 2)) * (HN - H2)):
250 J = J1 + J2 + J3
260 PRINT "ШВИДКІСТЬ SI = "; SI
270 INPUT "ВВЕДІТЬ ml = "; M1
280 N11 = ((.0001) * (PI ^ 3) * (T - E) * LDOZ * J * M1 * (N - 2)) / (36 * T)
290 N12 = ((.001) * A2 * DP * N) / 6: N1 = N11 + N12
310 PRINT "ПОТУЖНІСТЬ N1 = "; N1
320 S2 = ((PI ^ 2) * (D ^ 2) * N) / (60 * DL * SQR((PI ^ 2) * (D ^ 2) - (T ^ 2)))
330 PRINT "ШВИДКІСТЬ ЗСУВУ S2 = "; S2
340 INPUT "ВВЕДІТЬ МІЦНІСТЬ m2 = "; M2
350 N2 = ((PI ^ 3) * (D ^ 3) * E * LDOZ * M2 * .0001 * (N ^ 2)) / (36 * DL * T)
360 PRINT "ПОТУЖНІСТЬ N2 = "; N2
370 PRINT "ТЕХНОЛОГІЧНА ПОТУЖНІСТЬ NT = "; N1 + N2
380 END

```

### **Я.5.3. Програма розрахунку шнека подрібнювача на міцність, жорсткість і стійкість. Мова Бейсік**

CLS

"РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ ШНЕКА"

A = 400: DIM MIZ(A), X(A), MK(A), Fmax1(A), Fmax2(A), Fmax01(A), Fmax02(A), Fmax03(A) AF = 0: dX = .0045: hx1 = .0045

IF AF = 0 THEN 91

5 PRINT "ВВЕДЕННЯ ПОЧАТКОВИХ ДАНИХ"

PRINT "ДОПУСТИМЕ НАПРУЖЕННЯ (SIG) [Па]"

INPUT "SIG = "; SIG

PRINT "ЩІЛЬНІСТЬ МАТЕРІАЛУ ШНЕКА [кг/м<sup>3</sup>]"

INPUT "R0 = "; RO

PRINT "ТИСК, ЩО РОЗВИВАЄТЬСЯ ШНЕКОМ [Па]"

10 INPUT "P = "; P

PRINT "ДІАМЕТР ОСЬОВОГО ОТВОРУ ШНЕКА [м]"

15 INPUT "dl = "; dl

```

PRINT "ЗОВНІШНІЙ ДІАМЕТР ШНЕКА [м]"
20 INPUT "D = "; d
PRINT "ДОВЖИНА НАРІЗНОЇ ЧАСТИНИ ШНЕКА [м]"
30 INPUT "L = "; L
PRINT "ГЛИБИНА ГВИНТОВОГО КАНАЛУ ШНЕКА [м]"
40 INPUT "H = "; H
PRINT "КУТ НАХИЛУ ГВИНТОВОЇ ЛІНІЇ ШНЕКА [град.]"
50 INPUT "FI = "; FI
PRINT "КРОК ГВИНТОВОЇ НАРІЗКИ ШНЕКА [м]"
60 INPUT "t = "; T
PRINT "ширина гребеня гвинтового каналу шнека [м]"
70 INPUT "e1 = "; E1
PRINT "ТЕХНОЛОГІЧНА ПОТУЖНІСТЬ [кВт]"
75 INPUT "N = "; N
PRINT "ЧАСТОТА ОБЕРТАННЯ ШНЕКА [об/хв]"
80 INPUT "W - "; W: GOTO 93
91 DATA 5,50000000,0.032,0.001,0.64,0.0032,17,0.032,0.0032,70,7850.400E6
READ N, P, d, dl, L, H, FI, T, E1, W. RO. SIG
93 E = 2000000000000#
ZX = (L / dX)
95 PI = 3.14
100 FI = FI * PI / 180
120 A = PI * d * H * (T - E) * COS(FI)^2 / 2
130 B = H ^ 3 * (T - E) * SIN(2 * FI) / (24 * L)
140 GAM = PI^2*d^2* DL ^ 3 * TAN(FI)* SIN(FI) / (10 * E1 * L)
150 Q = A*K*N/(K + B + GAM)
160 PRINT "Q = Q; "[м^3/с]"
170 MKR = 9550 * N / W:'PRINT MKRF = 3.14 * d ^ 2 / 4""РОЗРАХУНОК
ЗУСИЛЛЯ ВІД ТИСКУ НА ВХОДІ В РІЗАЛЬНИЙ ВУЗОЛ"
180 P1 = F * P
'PRINT "ЗУСИЛЛЯ ВІД ТИСКУ, P1 = P1; " [Н] РОЗРАХУНОК ГНУЧКОСТІ
ШНЕКА"
AL = dl / d
FI = 3.14 * d ^ 2 / 4 * (1 - AL ^ 2)
J1 = 3.14 * d ^ 4 / 64 * (1 - AL^4)
I = d * SQR(1 + AL^2)/4
MU = 2: LA = MU * L / I
"РОЗРАХУНОК МОМЕНТУ ТИМЧАСОВОГО ОПОРУ КРУЧЕННЮ"
WR = 3.14*d^3 * (1 -AL^4)/16'PRINT"
МОМЕНТ ТИМЧАСОВОГО ОПОРУ КРУЧЕННЮ. WR = "; WR: " [м^3]"
'"РОЗРАХУНОК МАКСИМАЛЬНОГО НАПРУЖЕННЯ КРУЧЕННЯ"
TAUmax = MKR / WR
q - RO * g * L FOR A = 0 TO ZX SCREEN 11

```

```

LOCATE 2, 1: PRINT "РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ ШНЕКА
ПОДРІБНІЮВАЧА"
LOCATE 3, 1: PRINT "ГНУЧКІСТЬ ШНЕКА. LA = "; LA
LOCATE 5, 1: PRINT "ЕПЮРА МОМЕНТІВ  $M_i(X)$ ,  $M_{кр}(X)$  , І ПРОГИН
ШНЕКА  $Y(X)$ "  $X(A) = dX * A$ :  $MIZ(A) = RO * FI * X(A) ^ 2/2 * 10$   $MK(A) = 9.55 *
N / W$ 
IF LA <= 90 THEN GOTO 191 ELSE GOTO 192
191 LOCATE 4, 1: PRINT " РОЗРАХУНОК ПО ПЕРШОМУ ВАРІАНТУ - НА
МІЦНІСТЬ "  $F_{max1}(A) = RO * FI * X(A)^4 / (8 * E * JI)$ 
LOCATE 24, 1: PRINT "МАКСИМАЛЬНИЙ ПРОГІНАН  $F_{max1} = F_{max1}(A)$ ; "
[м]": GOTO 195
192 LOCATE 4, 1: PRINT "РОЗРАХУНОК ГІО ДРУГОМУ ВАРІАНТУ -
НА СТІЙКІСТЬ"
 $K1 = \text{SQR}(P1 / (E * JI))$ 
 $A1 = RO * FI * (X(A) - (\text{SIN}(K1 * X(A))) / K1) / (K1 * \text{COS}(K1 * X(A)))$ 
 $F_{max01}(A) = RO * FI / K1 ^ 2 * (1 / K1 ^ 2 + X(A) ^ 2 / 2) / (E * JI)$ 
 $F_{max02}(A) = 1 / K1 * (RO * FI / K1 ^ 3 + A1 * X(A)) * \text{COS}(K1 * X(A)) / (E * JI)$ 
 $F_{max03}(A) = 1 / K1 ^ 2 * (RO * FI * X(A) / K1 - A1) * \text{SIN}(K1 * X(A)) / (E * JI)$ 
 $F_{max2}(A) = (F_{max01}(A) - F_{max02}(A) - F_{max03}(A))$ 
LOCATE 24, 1: PRINT "МАКСИМАЛЬНИЙ ПРОГІН  $F2 = F_{max2}(A)$ ;" [м]"
195 LINE(40, 100) -(40, 300): LINE (40, 300) -(600, 300)
LINE(550, 100) -(550, 300):LINE(600, 100)-(600, 300)
FOR X = 40 TO 600 STEP 7.5
LINE (X, 298) -(X, 302), 6: NEXT X: FOR XI = 40 TO 600 STEP 75 / 2
LINE (XI, 296) -(XL 304), 6: NEXT XI: FOR Y1 = 300 TO 100 STEP -5
LINE (38, Y1) -(42, Y1), 7: NEXT Y1: FOR Y2 = 300 TO 100 STEP -25
LINE (36, Y2) -(44, Y2), 7: NEXT Y2
FOR T1 = 300 TO 100 STEP -5: LINE (597, T1) -(603, T1), 6
NEXT T1: FOR T2 = 300 TO 100 STEP -25: LINE (595, T2) -(605, T2), 6: NEXT
T2
FOR Z1 = 300 TO 100 STEP -5: LINE (547, Z1) -(553, Z1), 6
NEXT Z1: FOR Z2 = 300 TO 100 STEP -25: LINE (545, Z2) -(555, Z2). 6: NEXT
Z2
LOCATE 20, 6: PRINT "0": LOCATE 20, 14: PRINT "0.1":
LOCATE 20, 23: PRINT "0.2": LOCATE 20, 75: PRINT "X,M"
LOCATE 20,33: PRINT "0.3": LOCATE 20, 41: PRINT "0.40"
LOCATE 20,51: PRINT"0.50": LOCATE 20, 61: PRINT "0.60"
LOCATE 14, 47: PRINT " $M_i(X)$ ": LOCATE 16, 51: PRINT " $M_{кр}(X)$ "
LOCATE 6, 6: PRINT " $M_i.H * m$ "
LOCATE 16, 1: PRINT "5": LOCATE 13, 1: PRINT "10": LOCATE 10, 1: PRINT
"20"
LOCATE 6, 63: PRINT " $M_{кр},H * m$ "
LOCATE 16. 65: PRINT "1.0": LOCATE 7, 65: PRINT "4.0"
LOCATE 13, 65: PRINT "2.0": LOCATE 10, 65: PRINT "3.0"

```

```

LOCATE 6, 72: PRINT "Y.mkm": LOCATE 18,40: PRINT "Y(X)"
LOCATE 16, 71: PRINT "40": LOCATE 14, 71: PRINT "60"
LOCATE 12, 71: PRINT "80": LOCATE 18, 71: PRINT "20"
LOCATE 10, 71: PRINT "100": LOCATE 8, 71: PRINT "120"
LINE (40 + X(A)* 375 * 2, 300 - MIZ(A)* 10) -(40 + (X(A) - hxl) * 375 * 2, 300 -
MIZ1 * 10)
LINE (40 + X(A)* 375 * 2, 300 - МК(A)* 50) -(40 + (X(A)-hxl) * 375 * 2, 300-
МК1 * 50)
LINE (40 + X(A)* 375 * 2, 300 - Fmax1(A)* 1000000) -(40 + (X(A) - hxl) * 375 * 2,
300 - Fmax1 * 1000000)
LINE (40 + X(A)* 375 * 2, 300 - Fmax2(A)* 1000000) -(40 + (X(A) - hxl) * 375 *
2, 300 - Fmax2 * 1000000)
MIZ1 = MIZ(A): МК1 = МК(A): Fmax1 = Fmax1(A): Fmax2 = Fmax2(A)
LOCATE 22, 1: PRINT "КРУТНИЙ МОМЕНТ Мкр = ";МК(A);" [Н*м]"
LOCATE 23, 1: PRINT "МАКСИМАЛЬНИЙ ЗГИНАЛЬНИЙ МОМЕНТ Мзг =
MIZ(A);"[Н*м] "
NEXT A
'MIZmax = RO *F1*L ^ 2/2*10
"'РОЗРАХУНОК МОМЕНТУ ТИМЧАСОВОГО ОПОРУ ЗГИНАННЮ"
WhO = 3.14*d^3*(1 - AL^4) / 32
"'РОЗРАХУНОК МАКСИМАЛЬНОЇ НАПРУЖЕННЯ ЗГИНАННЮ"
SIGRmax = PI / F1
SIGmax = SIGRmax + MIZmax / WhO "'РОЗРАХУНОК ЕКВІВАЛЕНТНОГО
НАПРУЖЕННЯ "
SIGekv = SQR(SIGmax ^ 2 + 4 * TAUmax ^2)
LOCATE 25, 1: PRINT "НАПРУЖЕННЯ КРУЧЕННЯ. TAUmax = "; TAUmax /
1000000; " [МПа]"
LOCATE 26, 1: PRINT "НАПРУЖЕННЯ РОЗТЯГУВАННЯ, SIGRmax = ";
SIGRmax / 1000000;" [МПа]"
LOCATE 27, 1: PRINT "ЕКВІВАЛЕНТНЕ НАПРУЖЕННЯ, SIGekv = SIGekv /
1000000: " [МПа]"
IF SIGekv < SIG THEN 198 ELSE 200
198 LOCATE 28, 1: PRINT "УМОВА МІЦНОСТІ ВИКОНУЄТЬСЯ, Оскільки
SIGekv < SIG":
GOTO 500
LOCATE 28. 1: PRINT "УМОВА МІЦНОСТІ НЕ ВИКОНУЄТЬСЯ. Оскільки
SIGekv > SIG"
500 END

```

**Я.5.4. Програма розрахунку раціональних технологічних і конструктивних параметрів процесу подрібнення м'яса з урахуванням мінімізації технологічної потужності і отримання кінцевого продукту з певними розмірами часток**

```

DECLARE SUB FEAS ()

```



```

SIG = 3E+08
‘Модуль Юнга E [Па]
E = 2E+11
IF X#(2)< 0 THEN X#(2)= .00000001#
IF X#(3)< 0 THEN X#(3)= .00000001#
IF X#(4)< 0 THEN X#(4)= .00000001#
‘Діаметр осьового отвору шнека d1 [м] d1 = .001
‘Ширина витка шнека E1 [м]
E1 = .003
‘Крок нарізки шнека
t1 = 3.14 * X#(3)* TAN(X#(1)* 3.14/180)
CS = COS(X#(1)* 3.1416/180)
SN = SIN(X#(1)* 3.1416/180)
‘Ширина каналу нарізки шнека
W1 = (t1 – E1) *
PRINT "t1="; t1; "CS="; CS; "X#(2)="; X#(2); "W1="; W1 Fg = 1: Fp = 1
‘Розрахунок відношення глибини гвинтового каналу до його ширини hb =
X#(2)/W1
‘Розрахунок коефіцієнтів прямого і зворотного потоку сировини
Fg = .19191 + .81888 * EXP(-hb)
Fp = .0614 + .9504 * EXP(-hb)
‘Розрахунок продуктивності подрібнювача
Q# = W1 * X#(2)* 3.14 * X#(3)* X#(4)* CS * Fg / 2
4 REM "розрахунок температури м'яса T"
Tz = 75: TO = 50: RO = 1200: C = 2100: LA = .22 Ts# = Tz
5 'AL= 175 - .833333 * Ts#
KA = AL * X#(2)/ LA: b2 = .005
'PRINT AL
A = 2 * AL * W1 / (RO * C * Q#)
T# = Tz + MU * X#(2)^ 2 / (2 * KA * LA) * (3.14 * X#(3)* X#(4)/ X#(2)) ^ (pm +
1) * EXP(-b2 * Ts#)* (1+ (EXP(-A * X#(5)) - 1) / (A * X#(5)))
Ts1# = T# + (Tz - TO) * (EXP(-A * X#(5)) - 1) / (A * X#(5))
IF ABS((Ts1# - Ts#) / Ts1#)* 100 <= 1 THEN 23 ELSE 19 19
'PRINT "Ts1#="; Ts1#; Ts#
Ts# = Ts1#: GOTO 5
23 T# = Tz + MU * X#(2)^ 2/(2* KA * LA) * (3.14 * X#(3)* X#(4)/ X#(2)) ^ (pm +
1) * EXP(- b2 * Ts1#)
TD# = T# - (MU * X#(2)^ 2/(2* KA * LA) * (3.14 * X#(3)* X#(4)/ X#(2)) ^ (pm +
1) * EXP(-b2 * Ts1#)
- TO + Tz) * EXP(-A * X#(5))
'PRINT "TD#="; TD#; KA
REM "розрахунок коефіцієнта EE"
AN = 0: ak = X#(5)/ SN: KP = 16: E3 = .01: N11 = 2
31 H = (ak- AN)/N11: XI = AN: S = 0

```

```

32 X2 = XI + H: X3 = (XI + X2) / 2
IF X2 > ak THEN 47
X5 = XI: GOTO 51
33 FI = TD1
X5 = X3: GOTO 52
34 F2 = TD1
X5 = X2: GOTO 53
36 F3 = TD1
I0 = (H/6)*(F1 + F2 + 4 * F3)
S= S + 10: XI = X2
GOTO 32
47N11 =N11 * 2
I22 = S
'PRINT "111="; 111; "12="; 122; N11
IF ABS(I11 -122) <= E3 * KP THEN 49 ELSE 48
48 111 = 122: GOTO 31
49 EE = 122 / ak
'PRINT X#( 1); X#(2); X#(3); X#(4); X#(5)
GOTO 57
51 T# = Tz + MU * X#(2)^ 2 / (2 * KA * LA) * (3.14* X#(3)* X#(4)/ X#(2)) ^ (pm +
1) * EXP(- b2 * Tsl#)
TD1# = T# - (MU * X#(2)^ 2 / (2 * KA * LA) * (3.14 * X#(3)* X#(4)/ X#(2)) ^ (pm
+ 1) * EXP(- b2 * Tsl#)
- T0 + Tz) * EXP(-A * X#(5))
TD1 = EXP(-b2 * TD1#)
GOTO 33
52 T# = Tz + MU * X#(2)^ 2 / (2 * KA * LA) * (3.14 * X#(3)* X#(4)/ X#(2)) ^ (pm
+ 1) * EXP(- b2 * Tsl#)
TD1# = T# - (MU * X#(2)^ 2 / (2 * KA * LA) * (3.14 * X#(3)* X#(4)/ X#(2)) ^ (pm
+ 1) * EXP(- b2 * Tsl#)
- T0 + Tz) * EXP(-A * X#(5))
TD1 = EXP(-b2 * TD1#)
GOTO 34
53 T# = Tz + MU * X#(2)^ 2 / (2 * KA * LA) * (3.14 * X#(3)* X#(4)/ X#(2)) ^ (pm
+ 1) * EXP(- b2 * Tsl#)
TD1# = T# - (MU * X#(2)^ 2 / (2 * KA * LA) * (3.14 * X#(3)* X#(4)/ X#(2)) ^ (pm
+ 1) * EXP(- b2 * Tsl#)
- T0 + Tz) * EXP(-A * X#(5))
TD1 = EXP(-b2 * TD1#)
GOTO 36
57 Q1 = W1 * X#(2)* 3.14 * X#(3)* X#(4)* CS * Fg/2
Q2 = W1 * X#(2)^ (2 + pm) * Fp * dP * SN / (12 * MU * (3.14 * X#(3)* X#(4)) ^
(pm - 1) * X#(5)* EE)
Q1# = Q1 -Q2

```

```

IF ABS(Q1# - Q#) / Q# * 100 <= 1 THEN 59 ELSE 58
58 Q# = Q1#: GOTO 5
59 REM "розрахунок інтегралу "
TAU = (W1 * X#(2) / SN * X#(5)) / Q# / 60 dTAU = 1/60
TAUS1 = -16.17806: TAUS2 = 3131360
61 JB0 = 0: XT5 = X#(5) * dTAU / TAU
FOR X5 = 0 TO X#(5) STEP XT5
T# = Tz + MU * X#(2)^2 / (2 * KA * LA) * (3.14 * X#(3) * X#(4) / X#(2)) ^ (pm + 1) * EXP(-b2 * Tsl#)
TDZ# = T# - (MU * X#(2)^2 / (2 * KA * LA) * (3.14 * X#(3) * X#(4) / X#(2)) ^ (pm + 1) * EXP(- b2 * Tsl#) - T0 + Tz) * EXP(-A * X5)
TDZK# = TDZ# + 273.15
TAUS = (TAUS1 + TAUS2 / TDZK# ^ 2) ^ 2 JB = JB0 + dTAU / TAUS: JB0 = JB
NEXT X5
EPS = ABS((JB - JB1) / JB) * 100
'PRINT JB1; JB; dTAU; EPS
IF EPS < 1 THEN 63 ELSE 62
62 JB1 = JB: dTAU = dTAU / 1.5: GOTO 61
63 'PRINT "TAU="; TAU; "JB="; JB; XT5
99 IF INQ = 2 THEN GOTO 100
IF INQ = 3 THEN GOTO 200
NN1 = MU * W1 * (3.14 * X#(3) * X#(4)) ^ (1 + pm) / X#(2) ^ pm * (4 * SN ^ 2 + CS ^ 2) * X#(5) * EE / SN
NN2 = 3.14 * X#(3) * X#(4) * CS / 2 * W1 * X#(2) * dP
NN3 = (3.14 * X#(3) * X#(4)) ^ (pm + 1) * MU * EI * X#(5) / TAN(X#(1) * 3.1416 / 180) / dl ^ pm * EXP(- b2 * Tz)
R#( 14) = NN 1 + NN2 + NN3
95 Q1 = W1 * X#(2) * 3.14 * X#(3) * X#(4) * CS * Fg / 2
Q2 = W1 * X#(2) ^ (2 + pm) * Fp * dP * SN / (12 * MU * (3.14 * X#(3) * X#(4)) ^ (pm - 1) * X#(5) * FZ)
Q# = Q1 - Q2
NN1 = MU * W1 * (3.14 * X#(3) * X#(4)) ^ (1 + pm) / X#(2) ^ pm * (4 * SN ^ 2 + CS ^ 2) * X#(5) - FZ / SN
NN2 = 3.14 * X#(3) * X#(4) * CS / 2 * W1 * X#(2) * dP
NN3 = (3.14 * X#(3) * X#(4)) ^ (pm + 1) * MU * EI * X#(5) / TAN(X#(1) * 3.1416 / 180) / dl ^ pm * FZ
R#(13) = NN1 + NN2 + NN3
FI = X#(t) h = X#(2) d = X#(3)
W4 = X#(4) * 60 L = X#(5)
A = 400: DIM MIZ(A), X(A), МК(A), FP1(A)
' "ДОПУСТИМЕ НАПРУЖЕННЯ (SIG), [Па]"
' "ГУСТИНА МАТЕРІАЛУ ШНЕКА [КГ/М^3]"

```



```

d11 = .01 ' "ДІАМЕТР ОСЬОВОГО ОТВОРУ ШНЕКА [М]"
ZX= 10: dX = L / ZX: PI = 3.14: FI = FI * PI / 180
'A = PI * d * h * (tl - El) * COS(FI)^ 2 / 2
'B = h ^ 3 * (tl - El) * SIN(2 * FI)/ (24 * L)
'GAM = PI^2*d^2*DL^3* TAN(FI)* SIN(FI)/ (10 * El * L)
'Q = A*K*N/(K + B + GAM): 'PRINT "Q="; Q; "[M^3/c]"
MKR = 9.55 * R14 / W4: F = 3.14 * d ^ 2 / 4
'"РОЗРАХУНОК ЗУСИЛЛЯ ВІД ТИСКУ "
P1 = F * dP
' "ЗУСИЛЛЯ ВІД ТИСКУ, P1="; P1;" [Н]"
' "РОЗРАХУНОК ГНУЧКОСТІ ШНЕКА"
AL1 = d 11 / d
F1 = 3.14 * d ^ 2 / 4 * (1 - AL1 ^ 2)
J1 = 3.14 * d^4/64*(1 - AL1 ^ 4)
I = d * SQR(1 + AL1 ^2)/4: MU1 = 2 190 LAI =MU1 * L/I
'PRINT "РОЗРАХУНОК ПО ПЕРШОМУ ВАРІАНТУ - НА МІЦНІСТЬ"
'"РОЗРАХУНОК МОМЕНТУ ТИМЧАСОВОГО ОПОРУ КРУЧЕННЮ"
WR = 3.14 * d ^ 3 *(1 -AL1 ^4)/16
'"РОЗРАХУНОК МАКСИМАЛЬНОЇ НАПРУЖЕННЯ КРУЧЕННЮ"
TAUmax = MKR / WR
'"РОЗРАХУНОК МАКСИМАЛЬНОГО ВИГИНАЛЬНОГО МОМЕНТУ В НЕБЕЗПЕЧНОМУ ПЕРЕТИНІ"
FOR A = 0 TO ZX
X(A)= dX * A: MIZ(A)= RO1 * F1 * X(A)^ 2 / 2 * 10
МК(A)= 9.55 * R14 / W4 / 1000: FP1(A)= RO1 * F1 * X(A)^ 4 / (8*E*.I1): NEXT Л
'MIZmax = RO1 * FI * L ^2/2* 10 'PRINT MIZmax
'"РОЗРАХУНОК МОМЕНТУ ТИМЧАСОВОГО ОПОРУ ВИГИНАННЮ"
WhO = 3.14 * d ^ 3 * (1 -AL1 ^ 4) / 32
'"РОЗРАХУНОК МАКСИМАЛЬНОГО НАПРУЖЕННЯ ВИГИНАННЮ"
SIGRmax = PI / F1
SIGmax = SIGRmax + MIZmax / WhO '"РОЗРАХУНОК ЕКВІВАЛЕНТНОГО НАПРУЖЕННЯ "
SIGekv = SQR(SIGmax ^ 2 + 4 * TAUmax ^ 2)
Fmax1 = RO1 * FI * L ^ 4 / (8 * E * J1)
K1 = SQR(P1 / (E * J1))
A1 = RO1 * FI * (L - (SIN(K1 * L))/K1)/(K1 * COS(K1 * L))
Fmax01 = RO * FI / K1 ^ 2 * (1 / K1 ^ 2 + L ^ 2 / 2)
Fmax02 = 1 / K1 * (RO1 * FI / K1 ^ 3 + A1 * L) * COS(K1 * L)
Fmax03 = 1 / K1 ^ 2 * (RO1 * FI * L / K1 - A1) * SIN(K1 * L)
Fmax = (Fmax01 - Fmax02 - Fmax03)/(E*J1)
IF Fmax1 < .0000001 THEN Fmax1 = 0
IF Fmax2 < .0000001 THEN Fmax2 = 0
PRINT "SIGekv="; SIGekv; SIG
99 IF INQ = 2 THEN GOTO 100

```

```

IF INQ = 3 THEN GOTO 200
‘Обмеження у вигляді рівності
R#(1)= (1 - Q# / Q) * 1
R#(2)= (1 - (TD# - TO) / delT)
PRINT "Q#="; Q#; "dT="; (TD# - TO)
PRINT "N="; R#(15); "JB="; JB GOTO 300
100 ‘Інтервали зміни варійованих параметрів (обмеження у вигляді
нерівностей)
R#(3)= 1 - JB / JB1# ‘Ліва межа
R#(4)= X#(1) - 16 ‘Ліва межа
R#(5)= 21# - X#(1) ‘Права межа
R#(6)= (X#(2) - .003#) * 10 ‘Ліва межа
R#(7)= (7.0000000000000001D-02 - X#(2)) * 100 ‘Права межа
R#(8)= (X#(3) - 2.0000000000000001 D-02) * 10 ‘Ліва межа
R#(9)= (9.0000000000000001 D-02 - X#(3)) * 10 ‘Права межа
R#(10)= X#(4) - .1# ‘Ліва межа
R#(11)= 1.5# - X#(4) ‘Права межа
R#(12)= X#(5) - .2# ‘Ліва межа
R#(13)= 1# - X#(5) ‘Права межа
‘PRINT "SIGekv="; SIGekv; SIG
R#(14)= 1 - SIGekv/SIG
GOTO 300
200 ‘Розрахунок технологічної потужності (цільовій функції)
CS = COS(X#(1)* 3.1416/180)
SN = SIN(X#(1)* 3.1416/180)
NN1 = MU * W1 * (3.14 * X#(3)* X#(4)) ^ (1 + pm) / X#(2)^ pm * (4 * SN ^ 2 + CS
^ 2) * X#(5) * FZ / SN
NN2 = 3.14 * X#(3)* X#(4)* CS / 2 * W1 * X#(2)* dP
NN3 = (3.14 * X#(3)* X#(4)) ^ (pm + 1) * MU * E1 * X#(5)/ TAN(X#(1)* 3.1416/
180)/dl ^ pm * FZ
R#(15)= NN1 + NN2 + NN3
300 END SUB

```

## Економічна ефективність від впровадження результатів досліджень

### Я.6.1. Методика визначення економічної ефективності від використання нових і удосконалених м'ясоподрібнювальних машин та інструментів

Економічну ефективність від впровадження нової техніки оцінюють методом порівняння основних змінених параметрів з базовим зразком.

Очевидні наступні статті отримання економічного ефекту:

- використання нових конструкцій м'ясоподрібнювальних машин;
- використання нових м'ясоподрібнювальних інструментів;
- використання раціональних матеріалів для виготовлення інструментів і способів їх заточування;
- використання сучасних технологій модифікації і деталей м'ясорізальних машин.

При використанні подрібнювальних машин, що мають вдосконалену конструкцію, економічний ефект обумовлюється такими чинниками:

- збільшенням виходу готового продукту внаслідок зменшення втрат м'ясного соку (забезпечується негайним виведенням подрібненого продукту з зони різання і обмеженням тиску на сировину в різальному пристрої);
- збільшенням виходу фаршу завдяки належній якості подрібнення, що забезпечує підвищену кількість зв'язаної вологи в готових виробах (забезпечується отриманим ступенем подрібнення сировини вдосконаленням конструкцій деталей подрібнювального вузла);
- кращою якістю отриманого продукту завдяки однорідності подрібнення сировини (досягається використанням раціональних конструкцій різальних інструментів);
- спрощенням проектування конструкцій нових машин за вдосконаленими методиками розрахунку їх параметрів (забезпечується використанням нових комп'ютерних способів проектування);
- підвищеною продуктивністю вовчка (досягається конструктивною досконалістю деталей);
- зменшенням капіталовкладень на виготовлення подрібнювальних машин (завдяки спрощенню конструкції);
- скороченням видатків на оплату праці оператора (завдяки автоматизації технологічного процесу);
- підвищенням довговічності різальних комплектів (досягається використанням зносостійких матеріалів і захисних покриттів при виготовленні);
- зменшенням собівартості різальних інструментів (забезпечується кращою технологічністю виготовлення).

▪ зменшенням капіталовкладень на оснащення технологічних ліній (завдяки суміщенню технологічних операцій і вилучення з ліній зайвого обладнання);

▪ скороченням обсягу задіяних виробничих площ (завдяки використанню розроблених нових конструкцій машин зі зменшеною матеріаломісткістю і габаритами);

▪ зменшенням експлуатаційних витрат на придбання різального інструменту (завдяки можливості його зміцнення захисними покриттями і застосуванню раціонального способу заточування);

▪ зменшенням експлуатаційних витрат м'ясопереробного підприємства завдяки підвищенню довговічності машин;

▪ підвищенням конкурентоспроможності виготовленої продукції машинобудівних підприємств, що виготовляють різальні інструменти для м'ясопереробної промисловості (завдяки значному підвищенню довговічності інструментів запропонованими способами);

▪ зменшенням капітальних і експлуатаційних витрат для м'ясопереробного або машинобудівного підприємства на зміцнення ножів кутерів і вовчків (досягається завдяки підвищеній ефективності зміцнювальної обробки).

Річний економічний ефект від використання розробленої конструкції машин можна визначити за формулою:

$$E_{\text{еф}} = E_1 + E_2 + E_3$$

де  $E_1$  – економічний ефект, за рахунок зменшення собівартості продукції, капіталовкладень та підвищення продуктивності обладнання, грн.;

$E_2$  – економічний ефект, за рахунок зменшення експлуатаційних витрат, грн.;

$E_3$  – економічний ефект, за рахунок підвищення прибутку завдяки підвищенню якості продукції, грн.

Ці компоненти інтегрального економічного ефекту визначаються за формулами:

$$E_1 = [(C_1 + K_{1n}) - (C_2 - \kappa_n \cdot K_{2n})] \cdot A_2,$$

$$E_2 = [E_{1n} - E_{2n}] \cdot A_2,$$

$$E_3 = [\Pi_{2n} - \Pi_{1n}] \cdot A_2,$$

де  $C_1$  – собівартість одиниці продукції до впровадження нової техніки, грн./кг;

$C_2$  – собівартість продукції після впровадження нової техніки, грн/кг;

$E_n$  – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, ( $E_n=0,15$ );

$K_{1n}$  – питомі капітальні витрати до впровадження нової техніки, грн/кг;

$K_{2n}$  – питомі капітальні витрати після впровадження нової техніки, грн/кг;

$A_2$  – річний обсяг виготовленої продукції після впровадження нової техніки, т;

$E_{1n}$  – питомі експлуатаційні вкладення до впровадження нової техніки, грн/кг;

$E_{2н}$  – питомі експлуатаційні вкладення після впровадження нової техніки, грн/кг;

$\Pi_1$  – прибуток від реалізації продукції при її виготовленні до впровадження нової техніки, грн/кг;

$\Pi_2$  – прибуток від реалізації продукції при її виготовленні після впровадження нової техніки, грн/кг.

Питомі капітальні витрати до і після впровадження нової техніки визначаються так:

$$K_{1н}(K_{2н}) = \frac{K_1(K_2)}{A_1(A_2)},$$

де  $K_1$  – капітальні вкладення до впровадження нової техніки, грн.;

$K_2$  – капітальні вкладення після впровадження нової техніки, грн.;

$A_1$  – річний обсяг виробництва продукції до впровадження нової техніки, кг;

$A_2$  – річний обсяг виробництва продукції після впровадження нової техніки, кг.

Капітальні вкладення є сумою наступних витрат:

$$K = Z_K + Z_B + Z_{пр} + Z_{мон} + Z_{пл} + Z_{інш},$$

де  $Z_K$  – витрати на конструювання обладнання, грн.;

$Z_B$  – витрати на виготовлення обладнання ( $Z_B = 1,4 \div 1,8 \cdot Z_K$ ), грн.;

$Z_{пр}$  – витрати на придбання оснащення, грн.;

$Z_{мон}$  – витрати на монтаж обладнання, грн.;

$Z_{пл}$  – витрати на забезпечення виробничими площами, грн.;

$Z_{інш}$  – інші витрати ( $Z_{інш} = 1,01 \cdot [Z_K \dots Z_{пл}]$ ), грн.

Річний обсяг виробництва  $A_2$  після впровадження нової техніки визначається за формулою:

$$A_2 = A_1 + \Delta A$$

де  $\Delta A$  – річний приріст випускної продукції у натуральному вимірюванні;

$$\Delta A = (Q_2 - Q_1) \cdot C_{зм} \cdot F \cdot K_n$$

де  $Q_1, Q_2$  – відповідно, продуктивність машини до і після впровадження новацій, т/год;

$C_{зм}$  – кількість змін роботи машини;  $C_{зм} = 1$ ;

$F$  – кількість робочих днів у році ( $F = 250$ );

$K_n$  – коефіцієнт використання потужності ( $K_n = 0,85 \div 0,95$ ).

Питомі експлуатаційні витрати до і після впровадження нової техніки визначаються за формулою:

$$E_{1н}(E_{2н}) = \frac{E_1(E_2)}{A_1(A_2)}$$

де  $E_1$  – експлуатаційні витрати до впровадження нової техніки, грн.;

$E_2$  – експлуатаційні витрати після впровадження нової техніки, грн.

Експлуатаційні витрати визначаються за формулою:

$$E = Z_{ЕН} + Z_{ПЕРС} + Z_{РІЗ} + Z_{ОП},$$

де  $Z_{ЕН}$  – витрати на оплату електроенергії, що споживається обладнанням, грн.;

$Z_{\text{ПЕРС}}$  – витрати на оплату праці обслуговуючого персоналу, грн.;

$Z_{\text{РІЗ}}$  – витрати на придбання різального інструменту, грн.;

$Z_{\text{ОП}}$  – витрати на опалення та водопостачання приміщень, грн.

Прибуток від реалізації продукції при її виготовленні до впровадження нової техніки визначається наступним чином:

$$П_1(П_2) = Ц_1(Ц_2) - C_1(C_2),$$

де  $Ц_1$  – ціна продукції при її виготовленні до впровадження нової техніки, грн/кг;

$Ц_2$  – ціна продукції при її виготовленні після впровадження нової техніки, грн/кг.

Таким чином, сумарний економічний ефект описується формулою:

$$E_{\text{эф}} = [(C_1 + K_{1n}) - (C_2 - \kappa_n \cdot K_{2n})] + (E_{1n} - E_{2n}) + (П_{2n} - П_{1n}) \cdot A_2$$

Термін окупності капітальних вкладень:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_2 - K_1}{C_1 - C_2} \leq 3 \text{ роки.}$$

## Я.6.2. Економічна ефективність від впровадження нової конструкції вовчка-кутера

В табл. Я.6.1 подано вартість вовчка та його складових вузлів. З метою порівняння капіталовкладень та отриманого економічного ефекту також наведено відомості про вартість елементів вовчків західноєвропейських моделей.

Таблиця Я.6.1 - Вартість вовчків і їх конструктивних складових

Назва складових	Вартість, грн.	
	Вітчизняна модель (зовнішній діаметр ґраток 114; 160; 200 мм)	Зарубіжна модель (зовнішній діаметр ґраток 114; 160; 200 мм)
Вовчок	21000; 35000; 75000	180000; 520000; 650000
Ніж	130; 200; 310	130; 200; 310
Решітка	155; 235; 400	155; 235; 400
Шнек робочий	2750; 6300; 8215	22390; 92092; 82250
Шнек подавальний	2300; 3300; 5800	18065; 47140; 55125
Робочий циліндр	2050; 3000; 4900	16070; 41500; 46750
Гайка-маховик	1650; 1200; 2150	12800; 16600; 20250

Капітальні вкладення на виготовлення вовчка і вовчка-кутера визначаються за кошторисом (табл. Я.6.2)

Таблиця Я.6.2 - Кошторис капітальних вкладень на виготовлення машини

Статті витрат	Позначення	Витрати, грн.	
		Базова конструкція	Нова конструкція
Витрати на конструювання обладнання, грн.	$Z_K$	11200 (за даними КБ)	11850 (за даними КБ)
Витрати на виготовлення обладнання ( $Z_B=1,4 \div 1,8 \cdot Z_K$ ), грн.	$Z_B$	18970	21320
Витрати на придбання оснащення, грн.	$Z_{пр.}$	1080	1080
Витрати на монтаж обладнання, грн.	$Z_{мон.}$	800	800
Витрати на виділення виробничих площ, грн.	$Z_{пл.}$	1700	1700
Витрати інші ( $Z_{інш}=1,01 \cdot [Z_K \dots Z_{пл.}]$ ), грн.	$Z_{ін}$	350	350
Всього	К	35000	37100

Експлуатаційні витрати визначаються за кошторисом (табл. Я.6.3).

Таблиця Я.6.3 – Кошторис експлуатаційних витрат

Статті витрат	Позначення	Витрати, грн.	
		Базова конструкція вовчка	Нова конструкція вовчка
1	2	3	4
Витрати на оплату споживчої електроенергії	$Z_{ЕН}$	38100	38100
Витрати на оплату праці персоналу, грн.	$Z_{ПЕРС}$	12700	12330
Витрати на придбання різальних інструментів, грн.	$Z_{РІЗ}$	10500	8400
Витрати на опалення та водопостачання приміщень, грн.	$Z_{ОП}$	145000	145000
Всього	Е	206300	203830

Результати розрахунків економічної ефективності зведено в табл. Я.6.4.

Таблиця Я.6.4 - Показники економічної ефективності використання вовчка-кутера розробленої конструкції

Показники	Позначення	Величини показників		Зміни показників	
		до впровадження	після впровадження	абсолютна	відносна, %
Річний випуск продукції, т	$A_1$	7620	8763	+1143	+15
Продуктивність машини, кг/год	$Q$	6000	6900	+900	+15
Собівартість продукції, грн/кг	$C$	35	34,85	-0,15	-0,4
Встановлена потужність електродвигуна, кВт	$N$	30 кВт/год	28 кВт/год	-2	-6,5
Виробничі площі, м <sup>2</sup>	$S$	3,5	3,5	0	0
Тривалість допоміжних операцій, хв/зм	$t$	25	17	-9	-30
Ціна продукції, грн/кг	$П$	57	57	0	0
Капітальні вкладення, грн.	$K$	35000	37100	+2100	+6,0
Експлуатаційні витрати, грн.	$E$	206300	203830	-2470	-1,2
Річний економічний ефект, грн.	$\mathcal{E}$	-	1352394	-	-
Термін окупності, років	$T_{ок}$	-	0,15	-	-

Таким чином розроблений вовчок-кутер забезпечує (у порівнянні із базовою вітчизняною моделлю) підвищення продуктивності на 15%; зменшення експлуатаційних витрат на 1,2% на оплату праці оператора на 3%. Економічний ефект від впровадження розробленої конструкції  $\mathcal{E}=1352394$  грн. з терміном окупності  $T_{ок}=1,8$  місяці.



### Я.6.3. Економічна ефективність від впровадження розробленої конструкції кутера з новим профілюванням ножів

В табл. Я.6.5 наведено вартість кутера та його складових вузлів. З метою порівняння капіталовкладень та економічного ефекту також наведено дані про вартість елементів кутерів. (західноєвропейських моделей).

Таблиця Я.6.5 - Вартість кутерів та їх вузлів

Назва елементу конструкції	Вартість, грн.	
	Вітчизняна модель (кутер без вакууму, об'єм чаші 250 л)	Зарубіжна модель (кутер вакуумний, об'єм чаші 330; 500; 750 л)
Кутер	160000	3100000; 4500000; 7200000
Ножовий вал	2200	80000; 122000; 175000
Електродвигун головного приводу	24000	280000; 342000; 426000
Ножовий блок	1200	5400; 6000; 7200
Ніж	300	450; 550; 600
Чаша	34800	320000; 413000; 520000
Корпус ножового валу	42000	485000; 610000; 752000
Станина	45500	685000; 810000; 952000

Капітальні вкладення на виготовлення кутера визначаються за кошторисом (табл. Я.6.6).

Таблиця Я.6.6 - Кошторис капітальних вкладень на виготовлення кутера

Статті витрат	Позначення	Значення	
		Базова конструкція кутеру	Нова конструкція кутеру
Витрати на конструювання обладнання, грн.	$Z_K$	142550	85707
Витрати на виготовлення обладнання ( $Z_B=1,4 \div 1,8 \cdot Z_K$ ), грн.	$Z_B$	80850	46027
Витрати на придбання оснащення, грн.	$Z_{пр.}$	15625	8533
Витрати на монтаж обладнання, грн.	$Z_{мон.}$	6395	2133
Витрати на облаштування виробничих площ, грн.	$Z_{пл}$	28190	16000
1	2	3	4
Інші витрати ( $Z_{інш}=1,01 \cdot [Z_K \dots Z_{пл}]$ ), грн.	$Z_{ін}$	3190	1600
Всього	$K$	276800	160000

Експлуатаційні витрати визначаються за кошторисом (табл. Я.6.7).

Таблиця Я.6.7 - Кошторис експлуатаційних витрат

Статті витрат	Позначення	Значення	
		Базова конструкція кутера	Нова конструкція кутера
Витрати на оплату електроенергії, що споживається обладнанням, грн.	$Z_{ЕН}$	114300	106680
Витрати на оплату праці обслуговуючого персоналу, грн.	$Z_{ПЕРС}$	12700	12575
Витрати на придбання різальних інструментів, грн.	$Z_{РІЗ}$	10800	10800
Витрати на опалення та водопостачання приміщень, грн.	$Z_{ОП}$	184000	184000
Всього	Е	321800	314055

Результати розрахунків економічної ефективності зведено в табл. Я.6.8.

Таблиця Я.6.8 - Показники економічної ефективності використання нового кутера

Показники	Позначення	Величина показників		Зміна показників	
		до впровадження	після впровадження	абсолютна	відносна, %
1	2	3	4	5	6
Річний випуск продукції, т	$A_1$	2800	3136	336	12
Продуктивність кутера, кг/год	$Q$	2250	2520	270	12
Собівартість продукції, грн./кг	$C$	50	49,5	-0,5	-0,25
Встановлена потужність електродвигуна, кВт	$N$	90 кВт/год	84 кВт/год	-6	-7
Виробничі площі, м <sup>2</sup>	$S$	16.2	8.5	-7,7	-48
Тривалість допоміжних операцій, хв/зм	$t$	25	17	-9	-30

продовження табл. Я.6.8

1	2	3	4	5	6
Ціна продукції, грн/кг	<i>П</i>	72	72	0	0
Капітальні вкладення, грн	<i>К</i>	276800	160000	-116800	-42
Експлуатаційні витрати, грн		321800	314055	-7745	-2,5
Річний економічний ефект, грн	<i>Е</i>	-	1764627	-	-
Термін окупності, років	<i>T<sub>ок</sub></i>	-	0,22	-	-

Таким чином розроблений кутер забезпечує (у порівнянні з базовою конструкцією вітчизняної моделі кутера) зменшення капітальних вкладень на 42%; зменшення витрат на оплату виробничих площ на 48%; зменшення витрат на оплату праці оператора на 1%. Економічний ефект від впровадження розробленої конструкції  $E=1764627$  грн з терміном окупності  $T_{ок}=2,5$  місяці.

#### Я.6.4. Економічна ефективність від впровадження раціонального заточування та зміцнення різальних інструментів вовчків і кутерів.

Порівнювали економічну ефективність використання розробленої технології заточування і верстату зміцнення з базовими технологіями з використанням спеціалізованих заточувальних верстатів і традиційних технологій зміцнення різального інструменту вовчків і кутерів.

В табл. Я.6.9 наведено вартість заточувального верстата та його складових вузлів. З метою порівняння капіталовкладень та отриманого економічного ефекту в ній наведено дані про вартість елементів конструкцій заточувальних верстатів зарубіжних моделей.

Таблиця Я.6.9 - Вартість елементів конструкції заточувального верстату

Назва елементу конструкції	Вартість, грн.	
	Вітчизняні моделі для заточування різального інструменту вовчків і кутерів	Зарубіжні моделі для заточування різального інструменту вовчків і кутерів с
Заточувальний верстат	24500; 7000; 12100	270000; 162000; 124000
Станина	4600; 1800; 2200	73000; 80000; 21000
Привод абразивного круга	6125; 3200; 3200	67500; 43800; 32000
Привод планшайби	8575; -; 4300	94500; -; 44000
Копір	-; 200; -	-; 1800; -
Пульт керування	5200; 1800; 2400	35000; 40000; 27000

Капітальні вкладення на виготовлення заточувального верстата з використанням ельборових кругів визначаються за кошторисом (табл. Я.6.10).

Таблиця Я.6.10 - Кошторис капітальних вкладень на виготовлення заточувального верстата з газо термічним зміцненням інструментів

Статті витрат	Позначення	Значення	
		Базові конструкції верстатів для заточування інструментів	Нова конструкція заточувального верстату
Витрати на конструювання обладнання, грн.	З <sub>к</sub>	15000	6750
Витрати на виготовлення обладнання (З <sub>в</sub> =1,4÷1,8 ·З <sub>к</sub> ), грн.	З <sub>в</sub>	23000	10350
Витрати на придбання обладнання для електроіскрового зміцнення інструментів	З <sub>г</sub>	-	8000
Витрати на придбання оснащення, грн.	З <sub>пр.</sub>	1400	900
Витрати на монтаж обладнання, грн.	З <sub>мон.</sub>	1200	800
Витрати на виділення виробничих площ, грн.	З <sub>пл</sub>	2500	1200
Інші витрати, грн.	З <sub>ін</sub>	500	500
Всього	К	43600	28500

Експлуатаційні витрати визначаються за кошторисом (табл. Я.6.11).

Таблиця Я.6.11 - Кошторис експлуатаційних витрат

Статті витрат	Позначення	Значення	
		Базова конструкція верстата	Нова конструкція верстата
Витрати на оплату електроенергії, що споживається обладнанням, грн.	З <sub>ЕН</sub>	12400	12400
Витрати на оплату праці обслуговуючого персоналу, грн.	З <sub>ПЕРС</sub>	12700	11000
Витрати на придбання абразивного інструменту, грн.	З <sub>РІЗ</sub>	2300	2300
Витрати на опалення та водопостачання приміщень, грн.	З <sub>ОП</sub>	8600	8600
Всього	Е	36000	34300

Результати розрахунків економічної ефективності зведено в табл. Я.6.12.

Таблиця Я.6.12 - Показники економічної ефективності використання заточувального верстату з газотермічним зміцненням інструментів

Показники	Позначення	Величина показників		Зміна показників	
		до впровадження	після впровадження	абсолютна	відносна, %
Річний випуск продукції, шт.	$A_1$	15240	19050	+3810	+25
Продуктивність верстату, шт./год	$Q$	8	10	+2	+25
Собівартість продукції, грн./шт.	$C^*$	10,61	5,84	-4,77	-45
Встановлена потужність електродвигуна, кВт	$N$	5,2	5,2	0	0
Виробничі площі, м <sup>2</sup>	$S$	10,2	5,8	-4,4	-56,7
Тривалість допоміжних операцій / хв./зм.	$t$	38,4	27,5	-10,9	-28,4
Капітальні вкладення, грн.	$K$	43600	28500	-15100	-34,6
Експлуатаційні витрати, грн.	$E$	36000	34300	-1700	-4,7
Річний економічний ефект, грн.	$\mathcal{E}$	-	61158	-	-
Термін окупності, років	$T_{ок}$	-	0,3	-	-

\* - Собівартість визначається за формулою  $C = \frac{V_{ножа}}{k \cdot n}$ , де  $V_{ножа}$  – вартість одиниці різального інструменту (прийнято усереднене значення  $V_{ножа} = 450$  грн.);  $k$  – кількість робочих змін до повної утилізації ножа (прийнято значення для звичайних не зміцнених ножів  $k = 42,4$ );  $n$  – коефіцієнт, що враховує підвищення довговічності різальних інструментів після зміцнення на заточувальному верстаті (для верстатів базової конструкції  $n = 1$ ; для верстату розробленої конструкції  $n = 2$ ).

Таким чином розроблена конструкція установки для відновлення різальних властивостей і зміцнення інструментів м'ясорізальних машин забезпечує у порівнянні із базовою конструкцією в зменшення капітальних вкладень на 34,6%; зменшення витрат на оплату виробничих площ на 56,7%;

підвищення довговічності інструментів у 2 рази. Економічний ефект від впровадження розробленої конструкції  $\Delta=61158$  грн. з терміном окупності  $T_{ок}=3,6$  місяці.

#### **Я.6.5. Економічна ефективність від впровадження технології плазмового зміцнення ножів вовчків і кутерів**

Порівнювали економічну ефективність використання установки для плазмового зміцнення ножів вовчків та кутерів та установки для лазерного зміцнення інструментів.

В табл. Я.6.13 наведено вартість установки для плазмового зміцнення та установки для лазерного зміцнення інструменту (CO<sub>2</sub>-лазер, модель німецької фірми TRUMPF) та їх складових вузлів.

Таблиця Я.6.13 - Вартість елементів конструкції установок для зміцнення інструменту

Назва елемента конструкції	Вартість, грн.	
	Обладнання для лазерного зміцнення різальних інструментів	Обладнання для плазмового зміцнення різальних інструментів
Установка для зміцнення	8125000	320000
Система створення концентрованого потоку енергії	2720000	79700
Система генерування електричних імпульсів	2250000	107000
Система керування	1280000	50400
Маніпулятор	1861000	73400
Додаткове оснащення	14000	9500

Капітальні вкладення на виготовлення установок для плазмового та лазерного зміцнення інструменту визначаються за кошторисом (табл. Я.6.14).

Таблиця Я.6.14 - Кошторис капітальних вкладень на виготовлення зміцнювальних установок

Статті витрат	Позначення		
		Базова конструкція	Нова конструкція
1	2	3	4
Витрати на конструювання обладнання, грн.	$Z_k$	2830400	107140

продовження табл. Я.6.14

1	2	3	4
Витрати на виготовлення обладнання ( $Z_B=1,4 \div 1,8 \cdot Z_K$ ), грн.	$Z_B$	5238570	192860
Витрати на придбання оснащення, грн.	$Z_{пр.}$	14500	5150
Витрати на монтаж обладнання, грн.	$Z_{мон.}$	32000	6820
Витрати на облаштування виробничих площ, грн.	$Z_{пл}$	6730	6730
Інші витрати ( $Z_{інш}=1,01 \cdot [Z_K \dots Z_{пл}]$ ), грн.	$Z_{ін}$	2800	1300
Всього	К	8125000	320000

Експлуатаційні витрати визначаються за кошторисом (табл. Я.6.15).

Таблиця Я.6.15 - Кошторис експлуатаційних витрат

Статті витрат	Позначення	Витрати, грн.	
		Базова конструкція установки	Нова конструкція установки
Витрати на оплату електроенергії, що споживається обладнанням, грн.	$Z_{ЕН}$	38400	15360
Витрати на оплату праці обслуговуючого персоналу, грн.	$Z_{перс}$	24000	24000
Витрати на придбання матеріалів, грн.	$Z_{різ}$	24400	5200
Витрати на опалення та водопостачання приміщень, грн.	$Z_{оп}$	36000	36000
Всього	Е	122800	80560

Результати розрахунків економічної ефективності використання технології плазмового зміцнення інструментів у табл. Я.6.16.

Таблиця Я.6.16 - Показники економічної ефективності використання технології плазмового зміцнення інструментів

Показники	Позначення	Величина показників		Зміна показників	
		до впровадження	після впровадження	абсолютна	відносна, %
Річний випуск продукції, ножів	$A_I$	7112	24384	+17272	+342
Продуктивність технологічного обладнання, м <sup>2</sup> /год	$Q_I$	0,076	0,4	+0,324	+426
Продуктивність технологічного обладнання, ножів/год	$Q$	7	24	+17	+343
Собівартість продукції, грн/цикл обробки	$C^*$	3,54	3,54	0	0
Встановлена потужність, кВт	$N$	12	5,2	-6,8	-56,7
Коефіцієнт корисної дії	$\eta$	0,05	0,8	+0,75	16 раз
Виробничі площі, м <sup>2</sup>	$S$	16,2	16,2	0	0
Тривалість допоміжних операцій хв/зм	$t$	55	40	-15	-27
Капітальні вкладення, грн	$K$	812500	32000	-780500	-96
Експлуатаційні витрати, грн	$E$	122800	80560	-42240	-34,4
Річний економічний ефект, грн	$\mathcal{E}$	-	2727862	-	-
Термін окупності, років	$T_{ок}$	-	2,5	-	-

\* – Собівартість визначається за формулою  $C = \frac{V_{ножа}}{k \cdot n}$ , де  $V_{ножа}$  – вартість одиниці різального інструменту (прийнято усереднене значення  $V_{ножа} = 450$  грн.);  $k$  – кількість робочих змін до повної утилізації ножа (прийнято значення



для не зміцнених ножів  $k = 42,4$ );  $n$  – коефіцієнт, що враховує підвищення довговічності різального інструменту після зміцнення ( $n = 3$  після зміцнення лазерним чи плазмовим методом).

Таким чином використання технології плазмового зміцнення ножів вовчків і кутерів забезпечує (у порівнянні із застосуванням технології лазерного зміцнення) зменшення капітальних вкладень на 96%; зменшення енерговитрат на 58%; підвищення продуктивності обробки інструментів в 3,4 рази. Економічний ефект від впровадження технології плазмового зміцнення замість використання технології лазерного зміцнення  $E = 27278624$  грн з терміном окупності  $T_{ок} = 3$  місяці.

#### **Я.6.6. Узагальнення економічних показників**

Використання результатів проведених досліджень дозволяє отримати комплексний і частковий економічний ефект від використання окремих технічних рішень та запропонованих технологій.

Так при використанні вовчка-кутера вдосконаленої конструкції можна отримати економічний ефект в розмірі 1352394 грн. (термін окупності 1,8 місяців). Використання кутера з удосконаленими ножами дозволяє отримати економічний ефект 1764627 грн при терміні окупності капіталовкладень 2,5 місяці. При застосуванні установки для заточування та зміцнення ножів м'ясорізальних машин можна отримати економічний ефект в розмірі 61158 грн з терміном окупності капіталовкладень 3,6 місяці. Економічний ефект 2727862 грн. можна отримати, якщо при виготовленні різальних інструментів вовчків і кутерів для зміцнення застосувати технологію плазмового зміцнення замість технології лазерного загартування.

Загальний очікувальний річний економічний ефект при використанні всіх запропонованих технічних рішень складає 5844883 гривень.

МОНОГРАФІЯ

Сухенко Владислав Юрійович,  
*доктор технічних наук, професор*  
Сухенко Юрій Григорович,  
*доктор технічних наук, професор*  
Сарана Віктор Володимирович,  
*кандидат технічних наук, доцент*  
Муштрук Михайло Михайлович,  
*кандидат технічних наук, доцент*

# **МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І ОБЛАДНАННЯ ПЕРЕРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ АПК**

**За редакцією доктора технічних наук  
Сухенка В.Ю.**

Редактор В.Ю. Сухенко  
Комп'ютерна верстка В.Ю. Сухенка

Формат 60.90/16. Тираж 300 пр. Ум. друк. арк. 40. Зам. № 745

Видавець і виготовлювач ТОВ «ЦП «КОМПРИНТ»  
03151, Київ, вул. Предславинська, 28  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру  
суб'єкта видавничої справи ДК № 4131 від 04.08.2011 р.

**ВІДОМОСТІ**  
про авторів посібника  
**«Технологічне обладнання та лінії молокопереробних підприємств»**

1. Сухенко Юрій Григорович

- Доктор технічних наук, завідувач кафедри процесів і обладнання переробки продукції АПК Національного університету біоресурсів і природокористування України (НУБіП України)

Адреса: 01033, м. Київ, вул.. Героїв оборони,15

Тел: 527-87-69

Моб. 8-067-5012335

2. Сарана Віктор Володимирович

- Кандидат технічних наук, доцент кафедри процесів і обладнання переробки продукції АПК НУБіП України

Адреса: 01033, м. Київ, вул.. Героїв оборони,15

Тел: 527-87-69

Моб. 8-067-2852437

3. Сухенко Владислав Юрійович

- Кандидат технічних наук, доцент кафедри процесів і обладнання переробки продукції АПК НУБіП України

Адреса: 01033, м. Київ, вул.. Героїв оборони,15

Тел: 527-87-69

Моб. 8-067-5023601