**Батраченко О. В.***Черкаський державний
технологічний
університет***Batrachenko A. V.***Cherkasy State
Technological University***УДК 637.5.02:519.87****ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ
ПАРАМЕТРІВ НОЖІВ КУТЕРА
НА ЧАСТОТИ ЇХ ВЛАСНИХ
КОЛИВАНЬ**

В статті наведено результати математичного моделювання, які дозволяють встановити залежність між конструктивним виконанням ножів кутера і значеннями частот їх власних коливань. Встановлено, що ножі всіх досліджених типів при використанні їх в сучасних високошвидкісних кутерах працюють в області частот коливань, наближених до резонансу. Це викликає істотне підвищення деформацій і напружень, які можуть бути визначені для ножів за умов статичного навантаження. Для ножів, що мають мінімальну питому товщину, спостерігається явище резонансу в діапазоні робочих частот обертання ножових головок сучасних кутерів. Отримані результати вказують на необхідність пошуку ефективних шляхів підвищення вібростійкості ножів куттера.

Ключові слова: ніж куттера, частота коливань, резонанс, міцність, деформації, напруження.

Постановка проблеми. Кутери, як відомо, призначені для подрібнення кускової м'ясної сировини до стану фаршу, змішування його інгредієнтів, подрібнення фаршу до стану м'ясної емульсії, а також дозволяють вакуумувати фарш, охолоджувати або термообробляти [1]. Все це підвищує увагу виробників до ефективності роботи кутера, оскільки параметри його роботи суттєвим чином впливають як на якість, так і на кількість виготовленого продукту.

Ефективність обробки сировини в кутерах визначається, головним чином, конструктивними та кінематичними параметрами ножів. Серед іншого, до ножів кутера ставляться досить суперечливі вимоги: задля зменшення небажаного нагріву фаршу товщина ножа повинна бути мінімальною, а задля забезпечення високої міцності ножа його товщина має бути достатньо значною. Слід зазначити, що висока міцність ножів необхідна для мінімізації ризиків їх руйнування, оскільки в разі руйнування ножа при його роботі виходить з ладу сам ніж (або декілька з них), стає непридатною для використання м'ясна сировина в чаші, а також пошкоджується чаша та кришка ножової головки кутера. В результаті, при руйнуванні ножів кутер виходить з ладу на тривалий час та потребує значного обсягу ремонтних робіт, що в решті спричинює суттєві матеріальні збитки.

Проблема міцності ножів насправді є багатогранною. При роботі ножа на нього діє сила різання сировини, тиск сировини на поверхню леза, тиск сировини на бокову поверхню ножа від подачі сировини чашею, відцентрові сили та сили тертя. Ніж при своїй роботі почергово входить в сировину і виходить з неї, причому контакт із сировиною відбувається за короткий проміжок часу, що вказує на ударний характер динамічного навантаження. Необхідним є забезпечення високої статичної міцності ножів, їх витривалості при знакозмінних навантаженнях, міцності при ударному впливі.

Ці задачі на даний час вирішуються шляхом добору раціональних геометричних форм ножа, його товщини, оптимальної за своїми механічними властивостями марки матеріалу, видом та режимами термічної обробки, витримуванням певних правил загострювання та експлуатації ножів. Але слід вказати, що сучасні конструкції кутерів [2] відповідно до технологічних вимог мають інтенсифіковані режими роботи, при яких частота обертання ножової головки сягає 6000 об/хв., а швидкість різання на кінці леза ножа – 180 м/с (тоді як раніше достатньою вважалась швидкість різання у 100 м/с і частота обертання ножів до 3000 об/хв.). При таких режимах роботи значно зростають числові значення вказаних навантажень, а також пропорційно



підвищенню частоти обертання зростає напруження ножів на утому, що на практиці призводить до більш частого руйнування ножів в сучасних моделях кутерів [3, 4]. В решті проблема забезпечення належної міцності і довговічності ножів кутера постає перед виробниками різального інструменту в новому форматі.

Ведучи мову про пошук шляхів вирішення даної проблеми поряд із зазначеними чинниками силового навантаження ножів хотілося б відзначити ще один, якому, на погляд автора, поки що не приділено достатньої уваги дослідників. Таким чинником є вібраційне навантаження ножів кутера. Виконуючи до 6000 об/хв і при цьому маючи періодичний контакт із сировиною, ніж виконує до 100 коливань за секунду внаслідок деформації при різанні сировини. Зважаючи на достатньо високу частоту коливань ножів, їх значну довжину та невелику товщину, ймовірно припустити, що при їх роботі може виникати явище резонансу, яке, як відомо, призводить до різкого збільшення деформацій тіла та до його руйнування. Дослідження параметрів коливань ножів кутера може надати можливість визначити раціональні шляхи підвищення їх міцності, а відтак і довговічності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Відома низка праць, присвячених дослідженню міцності ножів кутера в умовах статичного навантаження [3, 5 та ін.]. Проте можна виділити одну працю, що присвячена моделюванню процесу коливання ножів під час кутерування [6]. В даній роботі проведено частотний аналіз ножів кутера звичайної будови та перфорованих ножів, які мають на своїй боковій поверхні наскрізні отвори. Моделювання проводилось із використанням спеціалізованого програмного пакету, в основі алгоритму роботи якого лежить метод кінцевих елементів. В роботі наведено результати визначення частот власних коливань для двох вказаних типів ножів кутера та зроблено висновки про доцільність використання ножів із підвищеною жорсткістю. Проте в даній роботі не наведено ґрунтовних відомостей про вібростійкість ножів основних типів, які найчастіше використовуються на практиці, зокрема залежно від товщини цих ножів. Все означене не дозволяє використовувати результати вказаної роботи для прогнозування показників вібростійкості ножів сучасних промислових кутерів. Актуальним є вирішення означених проблемних питань.

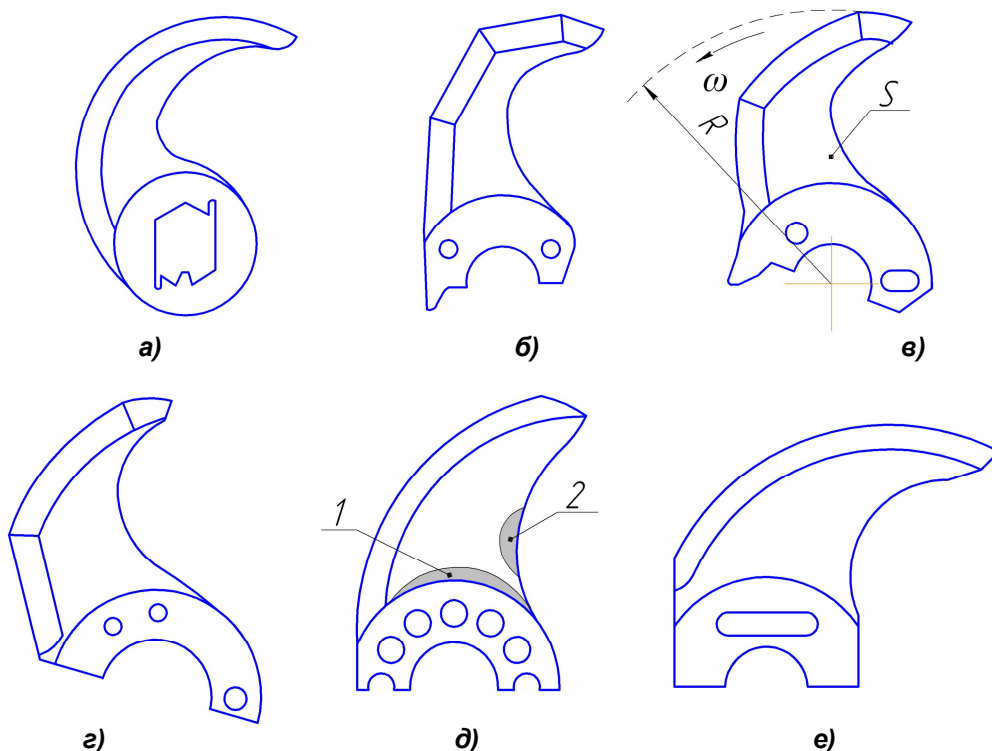


Рис. 1. Схеми конструкцій ножів, які найчастіше використовуються на практиці: а) – тип I; б) – тип II; в) - тип III; г) - тип IV; д) - тип V; е) - тип VI; R – найбільший радіус обертання точок леза ножа; S – товщина ножа; ω – напрямок обертання ножа при подрібненні сировини; 1, 2 – зони виникнення найбільших напружень в тілі ножа при його статичному навантаженні



Мета дослідження. Метою даної статті є дослідження вібростійкості ножів кутера в умовах їх використання в сучасних промислових кутерах.

Основні результати дослідження. Досліджувались частоти власних коливань 6 типів конструкцій ножів (рис. 1), які найчастіше використовуються в сучасних моделях кутерів. Відповідно до рисунку 1 ножі представлених типів відносяться до кутерів наступних марок [7]: тип I – „Seydelmann”; тип II і III – „Laska”; тип IV – „Kilia”; тип V – „Alpina”; тип VI – „Л5-ФКБ”.

Дослідження частот власних коливань проводилось шляхом математичного моделювання за допомогою програмного комплексу T-Flex Analysis, алгоритм роботи якого базується на методі скінчених елементів. Для кожного типу ножа були побудовані 3D-моделі, при цьому максимальний радіус обертання точок ножа склав 300 мм, а товщина ножа приймала три значення, кожне з яких визначалось за допомогою масштабного коефіцієнту k ($k_1=42,9$; $k_2=60$; $k_3=85,7$). Масштабний коефіцієнт k вираховувався за виразом:

$$k = \frac{R}{S}, \quad (1)$$

де R – максимальний радіус обертання точок леза ножа, мм;

S – товщина ножа, мм.

Значення k визначались згідно [7], при цьому значення k_1 відповідає ножам із найбільшою питомою товщиною, а значення k_3 – ножам із найменшою питомою товщиною. Використання масштабного коефіцієнту k дозволяє отримати результати моделювання, які можна інтерпретувати для ножів кутерів різної продуктивності, тобто для кутерів із чашами різного об'єму, ножі яких мають різну довжину. В даному випадку, для ножів з $R=300$ мм, значення масштабного коефіцієнту k відповідали наступним значенням товщини ножа: при $k=42,9$ - $S=7$ мм; при $k=60$ - $S=5$ мм; при $k_3=85,7$ - $S=3,5$ мм.

При моделюванні параметрів коливання ножів марка матеріалу ножів визначалась, як сталь легована з межею текучості 620,4 МПа (значення межі текучості відповідає марці сталі 65Г, яка широко використовується вітчизняними виробниками для виготовлення ножів кутера).

Візуалізацію отриманих результатів (для деяких типів ножів) наведено на рисунку 2. Значення власних частот коливань ножів наведено в таблиці 1, при цьому, враховуючи дійсний режим роботи сучасних кутерів, визначались лише дві перші частоти власних коливань $V_{власн.1}$ та $V_{власн.2}$.

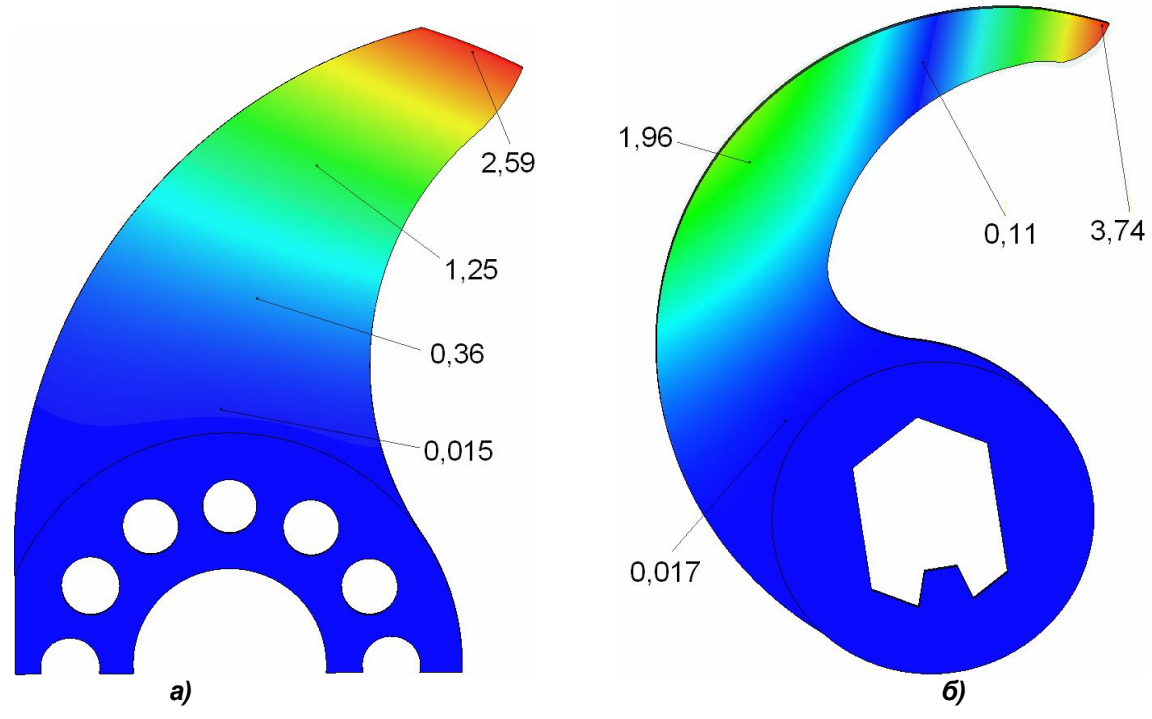
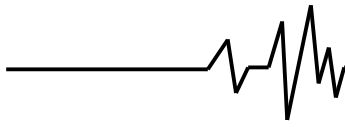


Рис. 2. Значення відносних переміщень ділянок ножів: а) – ножа типу V при досягненні ним першої власної частоти коливання $V_{власн.1}$; б) – ножа типу I при досягненні ним другої власної частоти коливання $V_{власн.2}$.



Таблиця 1

Значення першої $v_{власн.1}$ та другої $v_{власн.2}$ власних частот коливань ножів

Тип ножа	Власна частота $v_{власн.1}/v_{власн.2}$, Гц			Тип ножа	Власна частота $v_{власн.1}/v_{власн.2}$, Гц		
	Масштабний коефіцієнт k				Масштабний коефіцієнт k		
	42,9	60	85,7		42,9	60	85,7
I	97,0 / 241,0	69,6 / 172,8	48,9 / 121,3	IV	177,2 / 469,2	127,1 / 337,5	89,1 / 237,2
II	134,4 / 400,5	96,4 / 288,1	67,7 / 202,7	V	186,0	133,3 / 428,4	93,5 / 301,1
III	170 / 460,4	121,9 / 330,9	85,6 / 232,5	VI	181,5 / 500,5	130,2 / 359,9	91,3 / 252,9

Отримані дані були апроксимовані методом найменших квадратів квадратичною функцією виду:

$$v_{власн.1} = a + b \cdot k + c \cdot k^2 \quad (2)$$

де $v_{власн.1}$ – перша власна частота коливання ножа, Гц; k – масштабний коефіцієнт (визначається за виразом (1)); a, b, c – коефіцієнти (визначаються за таблицею 2).

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів рівняння регресії

Тип ножа	Значення коефіцієнтів			Тип ножа	Значення коефіцієнтів		
	a	b	c		a	b	c
I	213,665	-3,518	0,019	IV	390,166	-6,419	0,034
II	296,218	-4,880	0,026	V	410,421	-6,768	0,036
III	374,890	-6,180	0,033	VI	399,591	-6,573	0,035

Як слідує з отриманих даних, ножі усіх досліджуваних типів, при використанні їх в сучасних високошвидкісних кутерах, працюють в області частот, наближених до резонансу або ж можуть працювати саме в режимі резонансу. При цьому для ножів типу I зменшеної товщини спостерігається проходження першої резонансної частоти та наближення до другої (відповідно 48,9 Гц та 121,3 Гц), що вказує на вкрай низьку їх вібраційну стійкість.

З метою відображення впливу вібраційного навантаження ножів на їх напружено-деформований стан було використане поняття коефіцієнту динамічності [10], який визначався за виразом:

$$\beta = \frac{A}{x_{ст}} = \frac{1}{1 - \frac{v_{вим.}^2}{v_{власн.}^2}}, \quad (3)$$

де A – амплітуда вимушених коливань; $x_{ст}$ – величина деформацій за умови статичного навантаження ножа; $v_{вим.}$ – частота вимушених коливань ножа, Гц; $v_{власн.}$ – частота власних коливань ножа, Гц.

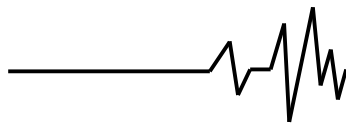
Коефіцієнт динамічності β вказує наскільки амплітуда вимушених коливань більше за деформацію тіла під дією статичного навантаження [10]. При наближенні частоти

вимушених коливань $v_{вим.}$ до частоти власних коливань $v_{власн.}$ значення коефіцієнту динамічності стрімко β зростає, що вказує на різке збільшення деформацій ножа під дією вібраційного навантаження.

В свою чергу, відповідно до закону Гука, в межах пружного деформування напруження σ , що виникають в тілі, прямо пропорційні відносним деформаціям цього тіла.

Таким чином напруження $\sigma_{вibr.}$, що виникають в тілі під дією вібраційного навантаження, в β разів більше за напруження $\sigma_{стат.}$, які виникають в тілі під дією статичного навантаження. Отже, значення коефіцієнту динамічності β дозволяє в кількісному вимірюванні визначити, наскільки зміниться напружений стан тіла при переході від статичного прикладання навантаження до вібраційного.

З використанням даних таблиці 1 за виразом (3) був проведений розрахунок значень коефіцієнту динамічності β для найбільш широковживаних діапазонів частот обертання ножів в сучасних кутерах (розраховані лише значення, що передують досягненню першої власної частоти коливання ножів $v_{власн.1}$). Отримані дані наведено в таблиці 3.



Таблиця 3

Значення коефіцієнту динамічності β

Частота обертання ножів n_n , хв. ⁻¹	Тип ножа								
	I			II			III		
	Масштабний коефіцієнт k			Масштабний коефіцієнт k			Масштабний коефіцієнт k		
	42,9	60	85,7	42,9	60	85,7	42,9	60	85,7
2000	1,13	1,30	1,87	1,06	1,14	1,32	1,04	1,08	1,18
3000	1,36	2,07	-	1,16	1,37	2,20	1,09	1,20	1,52
4000	1,89	12,12	-	1,33	1,92	33,0	1,18	1,43	2,54
5000	3,82	-	-	1,62	3,96	-	1,32	1,88	19,14
6000	-	-	-	2,24	-	-	1,53	3,06	-
7000	-	-	-	4,06	-	-	1,89	11,9	-

Частота обертання ножів n_n , хв. ⁻¹	Тип ножа								
	IV			V			VI		
	Масштабний коефіцієнт k			Масштабний коефіцієнт k			Масштабний коефіцієнт k		
	42,9	60	85,7	42,9	60	85,7	42,9	60	85,7
2000	1,04	1,07	1,16	1,03	1,07	1,14	1,03	1,07	1,15
3000	1,09	1,18	1,46	1,08	1,16	1,4	1,08	1,17	1,43
4000	1,16	1,38	2,27	1,15	1,33	2,03	1,16	1,35	2,14
5000	1,28	1,75	7,98	1,25	1,64	4,86	1,27	1,69	5,99
6000	1,47	2,62	-	1,41	2,29	-	1,44	2,44	-
7000	1,76	6,35	-	1,65	4,27	-	1,70	5,07	-

Висновки. Як слідує з отриманих результатів, ножі всіх досліджених типів при використанні їх в сучасних високошвидкісних кутерах працюють в області частот коливань, наближених до резонансу. Для ножів усіх типів при виконанні їх мінімальної питомої товщини ($k=85,7$) спостерігається явище резонансу в діапазоні робочих частот обертання ножових голівок сучасних кутерів (<6300 об/хв). Для ножів типу I резонанс спостерігається для усіх значень масштабного коефіцієнту k , причому при $k=85,7$ $v_{власн.1min}=2934$ хв.⁻¹. Найбільш жорсткими можна вважати ножі типу V, а також типу VI.

Звертає увагу на себе той факт, що для ножів типів II-VI навіть при виконанні їх максимальної питомої товщини ($k=42,9$) спостерігається підвищення коефіцієнту динамічності в межах $\beta=1,04\div 2,24$, що викликає істотне підвищення деформацій і напружень, які можуть бути визначені для ножів за умов статичного навантаження. На практиці це призводить до різкого збільшення напружень в зонах найбільшої їх концентрації (зони 1 і 2 на рис. 1, д), чим і можна пояснити поломку ножів в даних зонах відповідно до [3, 6, 8, 9].

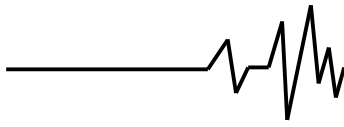
Слід зазначити, що коливання ножів у напрямку, перпендикулярному площині їх обертання, буде призводити до означеного підвищення деформацій та напружень, які викликаються лише часткою зусиль, що діють на ніж при його роботі (відповідно до даних

роботи [5]). Проте, не зважаючи на це, можна констатувати вкрай низьку вібраційну стійкість ножів кутера та необхідність обов'язкового врахування дії вібрації при розрахунку ножів на міцність.

Отримані результати вказують на необхідність пошуку ефективних шляхів підвищення вібростійкості ножів кутера, які б дозволили підвищити їх міцність без погіршення технологічних властивостей.

Список використаних джерел

1. Василевский О. М. Машины периодического действия для приготовления фарша / О. М. Василевский, О. В. Соловьев, Д. О. Трифонова // Мясные технологии. — 2007. — №5. — С. 42–46.
2. Промисловий каталог підприємства KILIA Vertrieb und Engineering GmbH & Co. KG [Електронний ресурс]. — Німеччина, 2014. — Режим доступу: <www.kilia.com>.
3. Маркус Л. И. Компьютерное моделирование причин аварийной поломки ножей высокоскоростных куттеров / Л. И. Маркус, А. Н. Шаталов, Р. А. Ананьев, А. Б. Смирнов // Мясная индустрия. — 2010. — №8. — С. 19–21.
4. Маркус Л. И. Металлографические исследования причин аварийной поломки ножей высокоскоростных куттеров / Л. И. Маркус, А. Н. Шаталов, В. С. Буркин // Мясная индустрия. — 2010. — №9. — С. 42–45.



5. Некоз О. І. Дослідження міцності ножів куттера при дії на них комплексного навантаження / О. І. Некоз, І. М. Литовченко, О. В. Батраченко // Вісник ЧДТУ. – 2013. – №3. – С. 54–61.

6. Schnackel W., Ehrle E., Haack O. (2004). Gelochte messer mindern spannung. Ermittlung der messerbelastung des kutterprozesses bei der herstellung von feinbrat // *Fleischwirtschaft*, (1), pp. 51–56.

7. Промисловий каталог виробничого об'єднання БОСК ПЛЮС [Електронний ресурс]. – Російська Федерація, 2014. – Режим доступу: <www.boskplus.ru>.

8. Martin Moser. Ermudungsbruch von Fleischhackmessern (Kuttermesser). [Електронний ресурс]. – Німеччина, 2010. Режим доступу: <http://martin-moeser.de/Veroeffentlichungen/Bruch_Kuttermesser.pdf>.

9. Haack W., Schnäckel W., Wilke J. (1999). Bearbeitungsvorgänge im Kutter - Konstruktive Voraussetzungen für qualitativ hochwertige Fleischwaren. *Fleischwirtschaft*, (4), pp. 36–40.

10. Бидерман В. Л. Теория механических колебаний / В. Л. Бидерман. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.

Список джерел в транслітерації

1. Vasylevskij O. M. Mashyny peryodycheskogo dejstvija dlya prygotovlenija farsha / O. M. Vasylevskij, O. V. Solov'ev, D. O. Tryfonova // *Myasnaja tehnologija*. – 2007. – №5. – С. 42–46.

2. Promyslovij katalog pidpry'emstva KILIA Vertrieb und Engineering GmbH & Co. KG [Elektronnyj resurs]. – Nimechchyna, 2014. - Rezhyim dostupu: <www.kilia.com>.

3. Markus L. Y. Kompyuternoe modelirovaniye prychnyn avaryjnoj polomky nozhej visokoskorostnix kutterov / L. Y. Markus, A. N. Shatalov, R. A. Anan'ev, A. B. Smyrnov // *Myasnaya yndustryja*. – 2010. – №8. – С. 19–21.

4. Markus L. Y. Metallografycheskye yssledovaniya prychnyn avaryjnoj polomky nozhej visokoskorostnix kutterov / L. Y. Markus, A. N. Shatalov, V. S. Burkyn // *Myasnaya yndustryja*. – 2010. – № 9. – С. 42–45.

5. Nekoz O.I. Doslidzhennya micznosti nozhiv kutera pry` diyi na nyx kompleksnogo navantazhennya / O. I. Nekoz, I. M. Lytovchenko, O. V. Batrachenko // *Visnyk ChDTU*. – 2013. – №3. – С. 54–61.

6. Schnackel W., Ehrle E., Haack O. (2004). Gelochte messer mindern spannung. Ermittlung der messerbelastung des kutterprozesses bei der herstellung von feinbrat // *Fleischwirtschaft*, (1), pp. 51–56.

7. Promyslovij katalog vyrobnychogo ob'yednannya BOSK PLYUS [Elektronnyj resurs]. – Rosijska Federaciya, 2014. – Rezhyim dostupu: <www.boskplus.ru>.

8. Martin Moser. Ermudungsbruch von Fleischhackmessern (Kuttermesser). [Електронний ресурс]. – Німеччина, 2010. Режим доступу: <http://martin-moeser.de/Veroeffentlichungen/Bruch_Kuttermesser.pdf>.

9. Haack W., Schnäckel W., Wilke J. (1999). Bearbeitungsvorgänge im Kutter - Konstruktive Voraussetzungen für qualitativ hochwertige Fleischwaren. *Fleischwirtschaft*, (4), pp. 36–40.

10. Byderman V. L. Teoryya mexanicheskyx kolebanij / V. L. Byderman. – М.: Visshaya shkola, 1980. – 408 p.

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НОЖЕЙ КУТТЕРА НА ЧАСТОТЫ ИХ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Аннотація. В статті приведені результати математического моделювання, которые позволяют установить зависимость между конструктивным выполнением ножей куттера и значениями частот их собственных колебаний. Установлено, что ножи всех исследованных типов при использовании их в современных высокоскоростных куттерах работают в области частот колебаний, приближенных к резонансу, или с достижением резонанса. Полученные результаты указывают на необходимость поиска эффективных путей повышения вибростойкой ножей куттера.

Ключевые слова: нож куттера, частота колебаний, резонанс, прочность, деформации, напряжения.

INFLUENCING OF STRUCTURAL PARAMETERS OF KNIVES OF BOWL CUTTER ON FREQUENCIES THEM OWN VIBRATIONS

Annotation. The results of mathematical design, which allow to set dependence between structural implementation of knives of bowl cutter and values of frequencies of their own vibrations, are resulted in the article. It is set that knives of all of the probed types at the use them in modern bowl cutters work in area of frequencies of vibrations, close to resonance, or with achievement of resonance. The got results specify on the necessity of search of effective ways of increase of durability of knives of bowl cutter.

Key words: knife of bowl cutter, frequency of vibrations, resonance, durability, deformations, tensions.