О.М. Пилипенко, І.А. Шльончак, В.О. Єрмоленко

Біогаз – альтернативне дизельне паливо

Черкаси 2017

ВСТУП……. 6

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПАЛИВ, ЇХ ВИРОБНИЦТВО ТА ВИКОРИСТАННЯ В ДВИГУНАХ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ..... 7

1.1. Альтернативні види палива на сучасному етапі розвитку ……. 7

1.2. Існуючі технології виробництва біогазу……... 17

1.3. Особливості конструкції дизеля для роботи за газодизельним циклом…….. 23

1.4 Аналіз результатів виконаних досліджень з переобладнання дизелів в газодизелі …… 26

1.5 Конвертація дизеля в газодизель…….. 32

2. РОЗРОБКА НОВІТНЬОГО ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ З УДОСКОНАЛЕННЯМ ТА МОДЕРНІЗАЦІЄЮ ОБЛАДНАННЯ……. 35

2.1 Установка для виробництва, очищення та зберігання біогазу……. 35

2.2 Розробка системи автоматизації виробництва біогазу…… 39

2.3 Аналіз хіміко-біологічних показників сировини для зброджения біомаси…… 46

2.4 Мікробіологічна ферментація органічної маси……. 50

2.5 Обґрунтування основних параметрів процесу ферментації органічної маси…….. 54

2.6 Побудова математичних моделей, які описують процес виробництва біогазу…… 55

3. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ПАЛИВОПОДАЧІ ГАЗОДИЗЕЛЯ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ СТЕНДОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ….. 72

3.1 Програма і об’єкт експериментальних досліджень…… 72

3.2 Обладнання та вимірювальна апаратура для експериментальних досліджень…….. 74

3.3 Розробка системи живлення дизеля для його роботи на біогазі…… 81

4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА МАТЕМАТИЧНА ЇХ ОБРОБКА…… 82

4.1 Результати стендових досліджень дизеля, що працює на біогазі…. 82

4.2 Математична обробка результатів стендових досліджень дизеля при живленні біогазом…….. 89

4.3 Результати дослідження екологічних показників дизеля, що працює на біогазі……... 92

5. ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВИПРОБУВАННЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА DONG FENG НА АВТОБУСІ «БОГДАН» МОДЕЛІ А-092…… 100

5.1 Математичні моделі, які описують двигун як споживач палива та джерело шкідливих речовин…….. 100

5.2 Перевірка адекватності математичних моделей, які описують паливну економічність двигуна……. 102

5.3 Практичні рекомендації та техніко-економічний розрахунок ефективності переобладнання дизеля для роботи на біогазі…….. 105

ВИСНОВКИ…….. 112

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…… 114

Додаток А…….. 119

Додаток Б…….. 122

ВСТУП

Стрімкий розвиток автомобільного транспорту (АТ) на всіх етапах характеризується поліпшенням споживчих властивостей автомобіля, у тому числі зниженням максимально допустимого вмісту токсичних речовин у відпрацьованих газах (ВГ) двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ). Це пояснюється значними темпами приросту на існуючій дорожній мережі України загальної кількості автомобілів (від 5 до 15% щорічно останнім часом) термін експлуатації яких більше нормативного. Широке застосування таких автомобілів призводить до підвищення інтенсивності руху, яке ускладнює умови дорожнього руху, погіршує його безпеку, забруднює відпрацьованими газами навколишнє середовище на дорогах і особливо на вулицях міст та населених пунктів [1-3].

Сьогодні в Україні більше ніж 31% із загальних забруднень навколишнього середовища припадає саме на автомобільний транспорт. Внесок АТ в сумарні викиди шкідливих речовин у містах України складає біля 80% загального забруднення основу якого складають автомобілі з бензиновими двигунами, головним чином з карбюраторними системами живлення, чи системами впорскування, які не відповідають сучасним екологічним вимогам. Така ситуація в нашій державі спонукала на створення комплексного підходу до вирішення проблеми обмеження токсичності існуючого парку автомобілів за рахунок використання біогазу в ДВЗ. А також щорічно зростаючі норми викидів АТ до вимог Європейської Економічної Комісії Організації об’єднаних націй (ЄЕК ООН) стосовно екологічності автомобілів як на стадії виробництва, так і під час експлуатації пояснюють актуальність роботи по вдосконаленню показників транспортних засобів на сучасному етапі [10].

Необхідно зазначити, що автомобільний транспорт потребує альтернативи традиційним моторним паливам нафтового походження. Одним із перспективним видів палива є біогаз, вироблений з відходів сільськогосподарської продукції тваринного чи рослинного походження.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПАЛИВ, ЇХ ВИРОБНИЦТВО ТА ВИКОРИСТАННЯ В ДВИГУНАХ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

1.1 Альтернативні види палива на сучасному етапі розвитку

У зв'язку з обмеженістю запасів невідновлюваних природних ресурсів (у першу чергу нафти) на Землі, останнім часом більшість провідних країн світу звернула увагу на альтернативні джерела енергії, які можна використовувати замість традиційних моторних палив. Ще однією причиною підвищеної уваги до нетрадиційних моторних палив є здатність деяких із них (природного газу, водню, оксигенатних біопалив тощо) відновлюватись.

У світлі розглянутих проблем дефіциту енергоресурсів і задач оздоровлення екології у всіх розвинених країнах ведеться напружений пошук та адаптація до умов експлуатації замінників традиційних видів палив – так званих альтернативних палив [3,4], які умовно можна поділити на чотири категорії:

– традиційне нафтове паливо (бензин, дизельне паливо) з додаванням синтетичних компонентів, які покращують ті чи інші властивості цих палив або зменшують їх витрату;
– синтетичні палива, які отримують шляхом переробки кам’яного вугілля, горючих сланців, природного газу;
– водень, електроенергія;
– спиртові палива, олії, біогаз, природний та нафтовий гази.

Палива першої групи, тобто традиційні палива нафтового походження з добавками синтетичних компонентів, являють собою суміші. Їхні властивості, як моторних палив, не можуть бути однозначно охарактеризовані, оскільки визначаються складом сумішей.

Як добавки використовують такі палива як аміак, вторинні і третинні спирти, ефіри тощо, оскільки їх використання у чистому вигляді викликає певні складності.

Доцільно використовувати сумішеві палива у разі використовування низькооктанових нафтових фракцій. Використання таких антидетонаторів як пропан, етан, метан та інших, в якості домішок до рідких моторних палив обумовлене їх світовими запасами.

Використання сумішевих палив дає можливість збільшити запаси рідких моторних палив шляхом включення до сумарного бензинового фонду низькооктанових нафтових продуктів і низькооктанових газоконденсатних бензинів, заміни частини їх аж до 100 % під час подавання в двигун відносно екологічно чистого палива - стиснутого природного газу. В результаті цього, внаслідок більшого застосування каталітичного доочищення відпрацьованих газів автомобільних двигунів, знижується вміст оксиду вуглецю, оксидів азоту і канцерогенних утворень у продуктах згоряння.

До другої групи альтернативних палив можна віднести синтетичні бензини та дизельне пальне, основною сировиною для яких є вугілля, горючі сланці, природний вуглеводневий газ. Сучасні технології переробки вуглеводнів дозволяють виробляти синтетичне пальне з відходів деревообробної промисловості, сільського господарства і навіть з побутового сміття. Особливістю розроблених технологій є те, що з однієї і тієї ж сировини можливо отримати різні види палива.

Якщо аналізувати перспективи широкого застосування синтетичного палива, то основною сировиною може вважатися лише вугілля, хоча його запаси не безмежні.

За своїми властивостями синтетичні палива близькі до палив нафтового походження, тому їх можна застосовувати без будь-яких суттєвих змін у конструкції сучасних двигунів, хоча й існують деякі проблеми, пов’язані з хімічним складом цих палив [5]. Разом з тим, відповідно до витрати енергії при виробництві синтетичного палива з вугілля в 1,6…2 рази перевищують витрати

на виробництво нафтового бензину або дизельного палива, вартість транспортної роботи у 1,2…1,3 рази вища порівняно з цими ж паливами нафтового походження. Тому, як вказується в роботі, необхідно освоювати виробництво синтетичних палив, але немає підстав очікувати широкого застосування у найближчі роки.

Найбільший інтерес серед альтернативних палив викликає водень, який віднесено до третьої групи. Це пояснюється, з одного боку, найбільшою потенційною сировинною базою, з іншого – багатьма привабливими особливостями водню як моторного палива [6]. За енергоємністю водень перевищує нафтові палива в 2,5...3 рази, спирти - в 5...6 разів, аміак - у 7 разів. Водень у суміші з повітрям спалахує у широкому діапазоні, аж до коефіцієнту надміру повітря рівному 10.

Одним із альтернативних джерел енергії, які можна використовувати для виробництва рушійної сили на транспорті, є електроенергія [7]. З точки зору її властивостей, електроенергія дозволяє значно покращити умови експлуатації транспортних засобів, які нею живляться, наприклад:

- відсутність шкідливих викидів;
- простота конструкції і керування, висока надійність і довговічність силової установки;
- можливість заряджання від побутової електромережі, хоча такий спосіб в 5-10 разів довший від заряджання від спеціального підзарядного пристрою;
- зменшується шумове забруднення навколишнього середовища;
- зростає плавність ходу такого автомобіля внаслідок безступінчатого регулювання тягового зусилля на колесах;
- поліпшення санітарних умов в салоні при перевезенні пасажирів.

Необхідно зазначити, що електроенергія не є абсолютно чистий вид енергії, а екологічна чистота електромобілів є досить відносною. При виробництві електроенергії мають місце значні викиди в атмосферу, а в процесі виробництва (від одержання сировини для виготовлення акумуляторів до

готового стану), заряджання і експлуатації акумуляторів утворюються побічні відходи, які потребують обов'язкової утилізації або переробки. При розрахунку на одиницю пробігу викиди електромобіля перевищують аналогічні викиди автомобілів, які використовують газові види палива (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 - Екологічна характеристика СПГ та дизельного палива

Вид палива	Емісія в атмосферу, г/км				
	CO	*CH*	NO_x	SO_x	Інші
СПГ	0,03	0,16	0,15	0,11	0,018
Дизельне паливо	0,65	0,17	0,53	0,2	

До четвертої (основної) групи альтернативних палив належить дуже багато різновидів палив. При їх розгляді необхідно враховувати вартість, об'єми, доступність енергоресурсів, економічність та нешкідливість їх застосування на підприємствах і в експлуатації, екологічну і експлуатаційну безпеку, легкість заправки і зберігання, стабільність фізико-хімічних характеристик і багато інших показників і властивостей з урахуванням їх повного життєвого циклу [8]. Коротко охарактеризуємо названі вище в класифікації альтернативні палива, виходячи з цих критеріїв.

Останнім часом все більше досліджень присвячено застосуванню як моторних палив спиртів, зокрема метилового (метанол) та етилового (етанол) . Спирти, як паливо для автомобільних ДВЗ, почали використовувати ще в кінці 19 століття. Г. Форд в 1880-х рр. реконструював одну з своїх ранніх моделей автомобіля з чотирьохтактним двигуном для використання спирту в якості палива.

Етанол отримують переважно з рослинної сировини шляхом бродіння. Його можна отримати також шляхом синтезу етилену або ацетону. Проблема, що має місце на стадії отримання етанолу, полягає в тому, що, як і в випадку з метанолом, необхідні значні енергетичні витрати. Відповідно до [9] витрати енергії на отримання метанолу в 1,6 рази, а етанолу в 1,7 рази більші порівняно

з бензином.

Якщо оцінювати етиловий і метиловий спирти з точки зору застосування як моторних палив, то їм властиві як переваги, так і недоліки в порівнянні з моторними паливами нафтового походження. Це видно з табл. 1.2, де наведені середні показники палив, узяті з різних джерел [10,11] .

До переваг спиртів також належать більш широкі межі поширення полум'я в спиртоповітряних сумішах в порівнянні з бензоповітряними сумішами, що може забезпечити стабільну роботу двигуна на збіднених спиртоповітряних сумішах [12,13]. Також спирти є бажаними для використання з точки зору відтворення сировинної бази.

У зв'язку з високим значенням октанового числа спирти можна використовувати в поршневих двигунах зі ступенями стискання, характерними для дизелів при застосуванні іскрового запалювання. Фірма «Volkswagen» на базі стандартного чотирициліндрового дизеля марки «Rabbit» створила і випробувала двигун, призначений для роботи на метанолі. В конструкцію двигуна були внесені необхідні зміни, ступінь стискання був знижений з 23 до 16,5. Випробування двигуна показали, що при роботі дизеля на метанолі викиди вуглеводнів були в 3...5 разів вищі, а оксидів азоту на 50...70% нижчі порівняно з роботою на дизельному паливі. Відносно низькі викиди монооксиду вуглецю і альдегідів були вищі при роботі дизеля на метанолі, в той час як викиди твердих частинок в цьому випадку практично відсутні.

Таблиця 1.2 - Порівняльна таблиця властивостей палив

Властивість	Паливо	
	Метанол	Етанол (95%)
Октанове число за моторним методом, од.	98	99
Нижча теплота згоряння, кДж/кг	19700–22375	25140–27000

Теоретично необхідна кількість повітря, кг повітря/кг палива	6,46	9,0
Енергія, що міститься в 1 л суміші при нормальній температурі, кДж/л	3,99	3,88
Теплота випаровування, кДж/кг	1165	1031
Відношення теплоти випаровування до нижчої теплоти згоряння, %	5,2	4,1
Теоретичне зниження температури суміші за рахунок повного випаровування, ºС	140	98
Теоретичне значення температури суміші при температурі повітря +30ºС і повному випаровуванні, ºС	-110	-68
Розрахункове зростання масового наповнювання циліндрів сумішшю, %	174	139
Густина палива, г/см^3	0,791...0,796	0,789...0,796
Елементарний склад, %: C, H, O,	 37,5 12,5 0,5	 52,2 13,6 34,2

Результати порівняльних випробувань автомобіля з цим двигуном при роботі на метанолі і дизельному паливі наведено в табл. 1.3.

Серед альтернативних палив для дизелів найбільший інтерес викликають олії, отримувані з різних олійних рослин (соняшника, рижію, сої, льону, ріпаку) [14,15,16].

З аналізу літературних джерел, в яких наводяться результати досліджень з використання олій як моторних палив, можна зробити висновок, що їх практичне застосування перш за все пов'язують з використанням ріпакової олії (РО) та продуктами її переробки. Для використання палива, що отримується з рослинної сировини, розглядають два шляхи. Один з них це очищення рослинних олій до кондицій дизельного палива, а другий - модифікація дизельного двигуна таким чином, щоб при згоранні сирої олії у ньому не утворювався шкідливий нагар.

Таблиця 1.3 - Показники автомобіля при живленні двигуна метанолом і дизельним паливом

Вид палива	Викиди шкідливих речовин, г/км				Витрата палива, л/100 км	
	CH	*CO*	NO_x	Альдегіди	Міський цикл	Магістральний цикл
Дизельне	0,17	0,65	0,53	0,012	5,84	4,54
Метанол	0,84	1,75	0,29	0,06	14,2	10,1

На автомобільному транспорті перший шлях вже реалізується. Паливо Biodiesel, що являє собою рапсовий метиловий ефір (РМЕ), уже реалізується більш ніж на 800 заправних колонках Німеччини. Оскільки РМЕ є надзвичайно агресивною рідиною, паливні баки, паливопроводи та інші елементи повинні мати спеціальне покриття, стійке до РМЕ.

Розробка спеціальних двигунів економічно невигідна. Низький потенціал рослинної сировини у порівнянні з абсолютним споживанням дизельного пального є причиною того, що на автомобільному транспорті доцільніше використовувати РМЕ у звичайних дизелях.

У 2004 році близько 80 % європейського біодизеля було вироблено з ріпакової олії, при цьому приблизно третина урожаю ріпака в 2004 році було використано саме для виробництва біопалива.

В країнах Євросоюзу біодизель почали виробляти у 1992 році. До кінця першої половини 2008 року в країнах Євросоюзу було побудовано 214 заводів по виробництву біодизеля сумарною потужністю 16 млн. тон біодизеля у рік .

В четверту категорію альтернативних палив входить біогаз.

Біогаз, що отримують внаслідок бродіння біомаси. Розклад біомаси проходить під дією трьох видів бактерій. У ланцюгу харчування бактерії харчуються продуктами життєдіяльності попередніх. Перший вид – бактерії гідролізні, другий – кислотоутворюючі, третій – метаноутворюючі.

Склад біогазу: 55 - 75 % метану, 25 - 45 % CO_2, незначні домішки H_2 та H_2S. Після очистки біогазу від CO_2 отримують біометан. Біометан — повний аналог природного газу, різниця лише у походженні.

Серед промислово розвинених країн перше місце у виробництві і використанні біогазу займає Данія. Біогаз займає до 18 % в її загальному енергобалансі. В Західній Європі не менш половини усіх птахоферм опалюються своїм біогазом [17].

Зріджений нафтовий газ (ЗНГ) у багатьох роботах розглядається в якості вагомого альтернативного джерела енергії [18]. Основними компонентами ЗНГ є пропан і бутан.

Виробництво ЗНГ безпосередньо пов'язане з нафтопереробною промисловістю. Тому використання зрідженого газу є дуже важливим з точки зору економії рідких палив і більш низьких викидів шкідливих речовин. Разом з тим розширення застосування зріджених нафтових газів можливе тільки за умови збільшення обсягів видобування і переробки нафти, що є недоцільним з огляду на існуючі екологічні проблеми.

Велике економічне і екологічне значення має переведення автомобільного транспорту на природний газ [19,20]. Це звільняє ресурси рідкого палива і знижує забруднення повітряного басейну.

По підрахункам екологів, у великих містах біля 70% всіх шкідливих викидів в атмосферу приходиться на долю втомобілів Використання природного газу як палива для автомобільних двигунів дозволило б значно

поліпшити екологічну ситуацію в містах, тим більше, що є інформація про значні запаси природного газу у світі. За даними фірми „British Petroleum" розвідані світові запаси природного газу складають біля 145 трильйонів $м^3$ чи 136,6 млрд. еквівалентних т. нафти. Запаси природного газу по тепловому вмісту наближаються до запасів нафти (біля 141 млрд. т.). Матеріальні витрати на паливо в сфері експлуатації на бензині складають 25-30 % собівартості перевезень, а з газовими двигунами - тільки 10-15 %. Це говорить про важливість швидшого вирішення задачі використання газового палива на автомобільному транспорті.

В наш час природний газ застосовується для ТЗ в стиснутому, зрідженому або адсорбованому вигляді. Зараз у всьому світі на стиснутому природному газі працює 1735772 транспортних засоби, створено 4425 газозаправних станцій.У Великобританії щорічно близько 350 автомобілів і автобусів переобладнуються для роботи на природному газі [9].

Така тенденція до зростання кількості "газових" автомобілів пов'язана з позитивними властивостями природного газу як моторного палива. Також це пояснюється тим, що його розвідані запаси значно більші, ніж запаси нафти; порівняно з бензином природний газ має більш високе октанове число (110-120); межі спалахування газоповітряної суміші від електричної іскри більш широкі; агрегатний стан забезпечує більш рівномірний розподіл суміші по циліндрах двигуна. Фізико-хімічні властивості СПГ як моторного палива наведені у табл. 1.4.

Все це забезпечує можливість стабільної роботи двигуна з іскровим запалюванням на збіднених паливоповітряних сумішах, нижчу токсичність

відпрацьованих газів за продуктами неповного згоряння і викидами сполук сірки. Крім того, за умови роботи на природному газі відсутнє розрідження моторної оливи, її змивання зі стінок циліндра, внаслідок чого менше зношуються деталі двигуна.

Природний газ представляє собою найбільш повноцінний з усіх можливих замінників рідких нафтових моторних палив, що обумовлює той

факт, що перехід на нього не потребує зміни конструкцій серійних двигунів, більше того, двигун стає двопаливним. До того ж природний газ, на противагу нафті, не потребує ніякої технологічної переробки (окрім сушки). Використання газового палива позитивно впливає на довговічність двигуна [21, 22].

В Україні також триває процес збільшення кількості транспортних засобів, які працюють на природному газі, у тому числі і шляхом переобладнання автомобілів, які живляться рідким паливом нафтового походження, з метою економії рідких палив та зменшення кількості шкідливих речовин, які містяться у відпрацьованих газах двигунів автомобілів [23, 24].

Таблиця 1.4 - Фізико-хімічні властивості СПГ

Показники	Значення
Хімічна формула	CH_4
Молекулярна маса, кг/кмоль	16,04
Температура кипіння при 760 мм рт. ст. °С	-161,5
Нижча теплоздатність (при 15°С і 760 мм рт. ст.) МДж/кг	48,7
Теоретично необхідна для згоряння кількість повітря, кг/кг	17,2
Октанове число (за моторним методом)	110
Температура займання при атмосферному тиску, °С	640-680
Межі займання (по об'єму), %:	
нижній	5,3
верхній	14,0
Коефіцієнт надлишку повітря α, який відповідає нижній (α max) і верхній (α min) межам займання:	
α max	1,88

α min	0,65

Застосування стиснутого природного газу призводить до зниження вмісту CO_2 у ВГ на 20-30 %, що запобігає руйнуванню озонового шару. Вміст CO у ВГ автомобілів, які живляться СПГ, значно менший, порівняно з роботою на рідкому паливі [25].

Тому застосування СПГ в якості моторного палива є особливо актуальним з огляду на постійно зростаючі вимоги до екологічної безпеки ТЗ (від ЄВРО 1 до ЄВРО 4).

Все перераховане робить переобладнання транспортних засобів на стиснутий природний газ економічно вигідним, не дивлячись на зниження (до 20 %) максимальної потужності двигуна та незначне погіршення тягово-швидкісних показників переобладнаних автомобілів.

Одним з перспективних напрямків вважають переведення на живлення газом дизелів з дещо зниженим ступенем стискання та встановлення системи іскрового запалювання. На практиці використовують газодизелі, основним паливом для яких є природний газ, що подається в циліндри двигуна в суміші з повітрям у процесі впуску. Запалювання газоповітряної суміші здійснюється невеликою дозою впорскнутого дизельного палива.

1.2 Існуючі технології виробництва біогазу

Двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) отримали досить широке поширення у світі. За відповідними літературними джерелами в енергетичному балансі розвинених країн ДВЗ складають біля 80% від сумарної потужності, що виробляється енергоустановками. Однак, серед ДВЗ значне місце займають саме дизелі. Дизелі установлюють на всіх видах сільськогосподарської техніки, більшій частині вантажного автотранспорту та від недавнього часу і на автобусах малого класу. Перспектива використання дизельних двигунів обумовлює актуальність досліджень, присвячених проблемі використання в

ньому біогазу, виготовленого в результаті переробки сільськогосподарської продукції.

Сучасні технології переробки сільськогосподарської продукції спрямовані на утилізацію органічних відходів або їх переробку в готову продукцію (наприклад: біологічно активні добрива, кормові добавки, біостимулятори, біогаз тощо) [1-3].

Одна з найбільш поширених технологій виробництва біогазу є технологія анаеробного метанового зброджування (біоконверсні технології). Технологія дозволяє вирішувати низку екологічних і соціально-економічних проблем: продовольчу (підвищення врожайності сільськогосподарських культур за використання високоякісних органічних добрив); енергетичну (отримання біогазу) і екологічну (ліквідація патогенної мікрофлори, зменшення забруднення повітряного та водного басейнів). Біоконверсні установки працюють за принципом рівномірного та повного змішування субстрату, підтримування його гомогенного складу з метою ферментації, протидії розшаруванню маси і отримання двох кінцевих продуктів - біогазу та зброджено маси [5, 6].

У світі існує велика кількість експериментальних і промислових установок для метанового зброджування рідкого гною, посліду і різних органічних відходів. Більшість діючих установок знаходиться в Китаї (до 15 млн.) та Індії (до 70 тис.) [7]. Найбільш поширена біоконверсна установка та технологія виробництва біогазу зображена на рисунку 1.1.

Огляд досліджень з вивчення процесу метанового зброджування органічних відходів і способів його інтенсифікації вказує на те, що основні параметри процесу метанового зброджування гнойової бїо*маси* достатньо досліджені і обґрунтовані, але при цьому біохімічні механізми ферментації змішаною культурою ще недостатньо вивчені. Потребують подальшого дослідження процес підготовки біомаси безпідстилкового гною до ферментації, способи інтенсифікації метанового зброджування, в першу чергу, шляхом

підвищення активної біомаси анаеробних бактерій і подальшої оптимізації параметрів самого процесу.

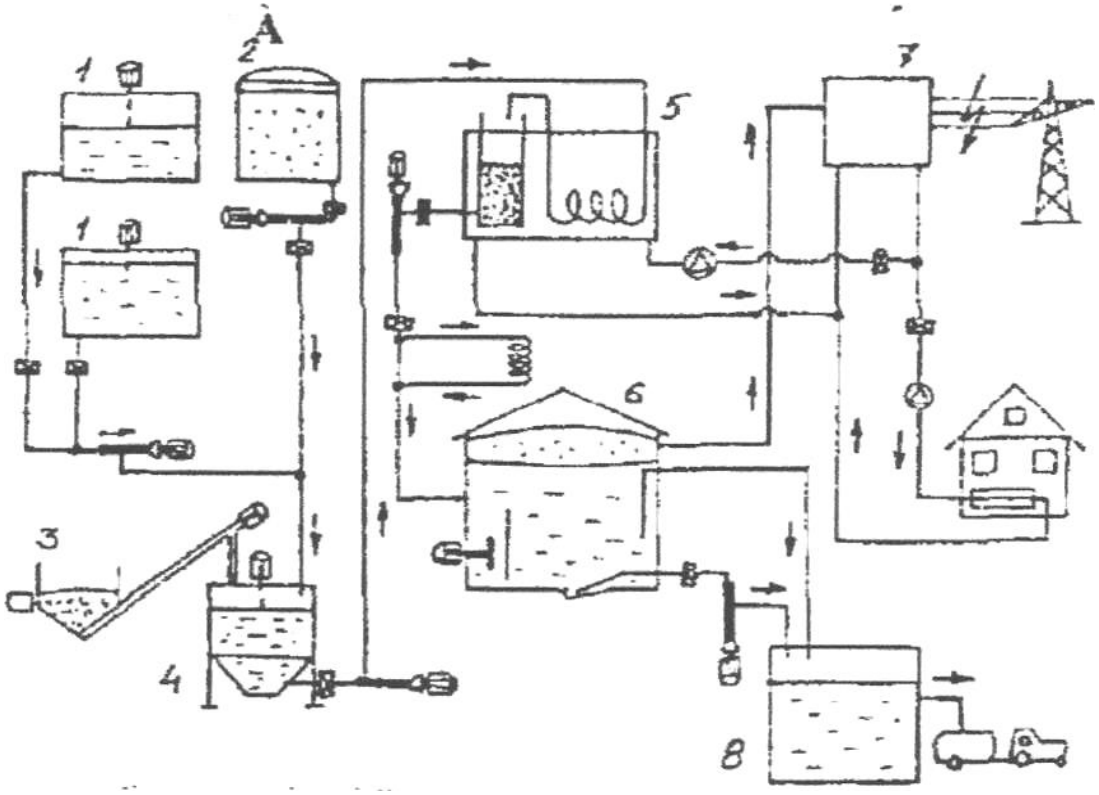

Рисунок 1.1 – Технологічна схема біоконверсної установки:

1 - гноєзбірник з мішалкою; 2 - ємкість для рідкої консервованої біомаси кормових культур; 3 - пристрій для подрібнення інших видів біомаси; 4 - вагодо-зувальний пристрій з мішалкою; 5 - підігрівач субстрату; 6 - біореактор з мішалкою "Ліпп" і вбудованим газгольдером; 7 - модульна теплоелектроус-тановка; 8 - сховище збродженої маси.

Випробування установки, яка працює за цією технологією, показали, що вона забезпечує технологічний процес твердофазної ферментації гною великої рогатої худоби та овець вологістю 83%.

Одна з поширених біогазових установок, яка працює за технологією переробки твердої фракції сільськогосподарської продукції представлена на рисунку 1.2. Основою установки є ферментер-газгольдер, принцип дії якого полягає в наступному: гній подається в циліндричний резервуар *1* по розвантажувально- завантажувальній трубі *5* за допомогою асенізаційної

машини. На початку роботи газовий ковпак *3* знаходиться в нижньому положенні. В процесі анаеробного зброджування виділяється біогаз, який накопичується в газовому ковпаку. По мірі накопичення біогазу за рахунок зростання тиску здійснюється поступове переміщення газового ковпаку вгору по напрямним жолобам *8* за допомогою роликів *7*. Відбір газу здійснюється через кран *9*, при цьому газовий ковпак переміщується вниз і повторно перемішує зброджуваний субстрат [7].

Багато розробників біогазових установок, що пропонують безпосередньо подавати тверді субстрати в ферментер називають свою систему «методом сухої ферментації», але слід зазначити, що ці системи відносяться до «мокрих» технологій переробки сільськогосподарської продукції.

Існували технології, технологічний процес яких базувався на послідовній переробці сільськогосподарських субстратів в твердому вигляді, тобто без допоміжної рідини. До таких технологій відноситься технологія DRANCO (Dry Anaerobic Composting - сухе анаеробне компостування), компогаз, ATF (анаеробна суха ферментація), а також метод А-З (анаеробне-аеробне-анаеробне). Ці технології були розроблені для бродіння біовідходів і не знайшли подальшого застосування [8].

Іншою технологією виробництва біогазу є технологія переробки твердого підстилкового гною. Біогазові установки, що працюють за вище зазначеною технологією, застосовуються у Франції, Чехословаччині, Угорщині та в інших країнах. Згідно зазначеної технологічної схеми твердий гній завантажується безпосередньо в метантанк, де здійснюється процес рідкофазної ферментації гною. Зброджений гній надходить в установку для розділення на рідку і тверду фракції. Рідка фракція знову надходить в метантанк, а тверда фракція відводиться в додаткові ємкості для зберігання.

На основі аналізу науково-технічної і патентної літератури, а також результатів експериментальних досліджень, проведених в останні роки в УкрЦВТ, розроблена і запропонована конструкційна схема універсального тве-

рдофазного мікробіологічного реактора, який може працювати як в режимі анаеробної, так і в режимі аеробної ферментації твердих відходів.

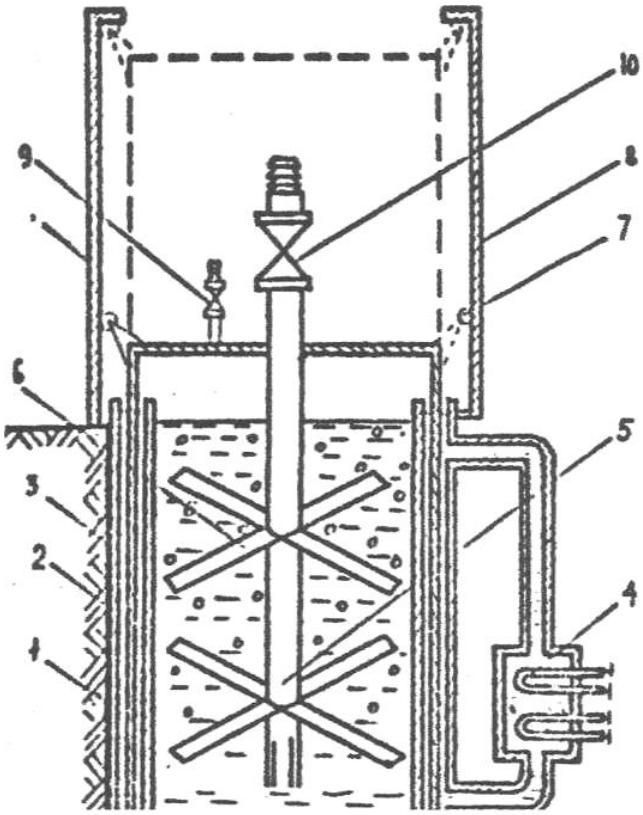

Рисунок 1.2 – Конструкція ферментера-газгольдера для виробництва біогазу

1 — циліндричний резервуар; 2 - корпус; 4 - тен для підігріву води; 5 - перемішувач; 6 - трубопроводи; 7 — направляючі роліки; 9 - манометр; 10 — вал для перемішувача;

Актуальність використання СПГ в Україні підтверджується наступними даними. Україна посідає друге місце в Європі та перше серед країн СНД за обсягами споживання СПГ. За оцінкою фахівців ДП „ДержавтотрансНДІпроект" та ДК „Укртрансгаз" станом на червень 2007 року в Україні на СПГ працювало понад 100 тис. автомобілів, а кількість автомобільних газонаповнювальних компресорних станцій (АГНКС) станом на травень 2008 року налічувала 249 одиниць. Для довідки: в Пакистані – 1606 АГНКС, Бразилії – 1442, Аргентині –

1400, США – 1340, Італії – 558. У Німеччині за програмою будівництва понад 1000 АГНКС уже введено в експлуатацію 700 [9].

Тому, одним з найбільш перспективних палив на транспорті є СПГ. Гарні фізико-хімічні властивості природного газу, його значні запаси, розвинута мережа доставки у різні регіони країни магістральними газопроводами та екологічні переваги у порівнянні з традиційними видами палив дозволяють розглядати природний газ як найбільш перспективне та універсальне моторне паливо України XXI ст.

Переведення автомобільного транспорту на СПГ має велике економічне і екологічне значення. Це звільняє ресурси рідкого палива і знижує забруднення повітряного басейну. За підрахунками екологів, у великих містах біля 70% всіх шкідливих викидів в атмосферу приходиться на долю автомобілів [10, 11].

Загальновідомо, що сільськогосподарська техніка обладнана дизелями, які мають кращу паливну економічність, є невибагливими в експлуатації та обслуговуванні. Однак, зростання вимог до екологічних показників транспортних машин, в тому числі сільськогосподарського призначення, потребує удосконалення їх конструкції, яке забезпечить суттєве зменшення викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами .

Одним із ефективних способів поліпшення екологічних показників транспортних засобів з дизелями є їх переобладнання для роботи на СПГ (в тому числі з можливістю роботи на біогазі).

Відомо, що найбільш поширені режими, в яких працюють ДВЗ, є неусталені. Витрата палива та шкідливі викиди суттєво залежать від роботи двигуна в цих режимах. Тому, дослідження техніко-економічних показників транспортних засобів з переобладнаним з дизеля газодизельним двигуном під час руху в експлуатаційних режимах є актуальною науково-технічною задачею.

1.3 Особливості конструкції дизеля для роботи за газодизельним циклом.

У світі для покращення екологічної ситуації, поряд із впровадженням альтернативних силових установок на автомобільному транспорті все більшого розповсюдження набувають автомобілі, двигуни яких працюють на природному газі. Цей процес іде як за рахунок зростаючого випуску нових автомобілів, так і за рахунок переобладнання існуючих моделей.

З початком застосування природного газу в якості моторного палива на автомобільному транспорті розроблялися і відповідні системи живлення, які б дозволили використовувати позитивні якості газового палива з найбільшою ефективністю як в двигунах внутрішнього згоряння з різними типами сумішоутворення, запалювання робочої суміші та організації робочого процесу [26] так і в дизелях.

Одним, досить цікавим напрямком у процесі збільшення частки природного газу серед моторних палив на рухомому складі автомобільноготранспорту є створення на базі транспортних дизелів чисто газових двигунів. Це може покращити екологічний ефект і збільшити обсяги використання природного газу на різних автомобілях та автобусах.

Щоб переобладнати дизель в газовий варіант на двигун встановлюють нові поршні зі зміненими формами камери згоряння або спеціальні проставки під головку блоку (для зменшення ступеня стискання), встановлюють замість демонтованої системи живлення дизельним паливом та системи регулювання частоти обертання дизеля – додаткову системи запалювання [27], встановлюють систему живлення газовим паливом.

Подібні газові двигуни, які створюються на базі дизелів, працюють з меншою жорсткістю, оскільки у них тиск в циліндрах при згорянні робочої суміші наростає більш плавно. Та й максимальний тиск робочого процесу менший, що зменшує теплове і механічне навантаження не тільки деталей двигуна, а й усієї трансмісії автомобіля. Звідси і більший порівняно з дизелем термін служби його газової модифікації. В різних країнах світу продовжують займатися розробкою і випуском конвертованих газових двигунів на базі

дизелів і двигунів з іскровим запалюванням з великим робочим об'ємом для вантажних автомобілів, міських та магістральних автобусів [28, 29].

Переобладнання дизелів в газові двигуни з примусовим запалюванням можливе тільки у заводських умовах з організацією спеціального виробництва газових двигунів і після переобладнання двигун стає однопаливним і може працювати лише на природному газі, що вимагає розвиненої інфраструктури живлення природним газом.

Значний інтерес у цьому відношенні представляє дизель, який конвертовано для роботи за газодизельним циклом . Такі конвертації спочатку широко використовувались в суднових і стаціонарних двигунах, а останнім часом, внаслідок зростання дефіциту рідких нафтових палив і підвищення вимог до екологічної чистоти, успішно застосовуються і для двигунів сухопутних транспортних засобів.

За газодизельного циклу в циліндр двигуна під час такту впуску надходить суміш газового палива з повітрям, яка утворюється в газоповітряному змішувачі. В період такту стиснення газоповітряна суміш стискується, в результаті чого температура її підвищується і до кінця такту стає вищою від температури самозаймання дизельного палива (590—650 К), але нижчою від температури самозаймання газу (940—990 К). У стиснуту газоповітряну суміш через форсунку, як і в звичайному дизелі, впорскується невелика кількість запального дизельного палива. Навколо великої кількості розпилених, випаруваних крапель рідкого палива, що займаються одночасно в багатьох місцях, утворюються численні первинні вогнища займання газоповітряної суміші.

Робочий процес у газодизеля проходить так само, як і в дизелів — за змішаним циклом, під час якого частина палива згоряє за сталого об'єму, а частина — за сталого тиску. Але в газодизелях за сталого об'єму згоряє більше палива, ніж у дизелях, тому максимальний тиск згоряння вищий за однакових умов, вищий також індикаторний ККД.

Використання газодизельного циклу на автомобільних двигунах дає

змогу зменшити витрати дизельного палива на 70—80 % внаслідок заміщення його газовим паливом. При цьому завдяки такому самому ступеню стиснення, як у дизеля, забезпечується високий термічний ККД циклу і зберігається така сама потужність, як у дизеля. Паливна економічність вища, ніж у переведених на газ автомобільних двигунів з іскровим запалюванням і нижчим ступенем стиснення.

В Україні та в країнах ближнього зарубіжжя найбільшого застосування здобули газодизелі Камського автомобільного та Ярославського моторного заводів. В табл. 1.5 наведено основні характеристики деяких з них з системами живлення і регулювання.

Таблиця 1.5 Основні характеристики газодизелів

Характеристики	КамАЗ-7409.10	ЯМЗ-236ГД	ЯМЗ-238ГД	ЯМЗ-240ГД	ЯМЗ-240НПГД
Число циліндрів	8	6	8	12	12
Діаметр циліндра, мм	120	130	130	130	130
Хід поршня, мм	120	140	140	140	140
Робочий об'єм циліндрів, л	10,85	11,5	14,86	22,3	22,3
Ступінь стискання	17	16,5	16,5	16,5	15,2
Потужність брутто, кВт	154	132	176	265	368
Номінальна частота обертання, $хв^{-1}$	2550	2100	2100	2100	2100
Максимальний крутний момент, Нм	637	667	883	1275	1765
Частота обертання за максимального крутного моменту, $хв^{-1}$	1300-1800	1500-1600	1400-1600	1500-1600	1500-1600
Тип регулятора частоти обертання	Трире-жимний	Всережимний			

1.4 Аналіз результатів виконаних досліджень з переобладнання дизелів в газодизелі

У доступних літературних джерелах міститься небагато даних про дослідження автомобільних газодизелів. Публікації, в основному, присвячені описанню конструкції систем живлення і регулювання двигунів. В проведених дослідженнях розглядаються питання керування та регулювання газодизелів, в тому числі з застосуванням математичного моделювання для проведення розрахунків.

Нерозглянутим залишається питання вибору і обґрунтування доцільності конвертації дизеля в газодизель.

В "НАМІ" була розроблена і застосовувалась система живлення і регулювання газодизеля, під назвою „система живлення ГД-НАМИ", на газодизелях: КамАЗ-7409.10 і Raba-Man D 2156HM 6U, які встановлювались на автомобілях КамАЗ та автобусах Ікарус і ЛАЗ-4202 [30].

Витрати запальної дози дизельного палива за годину за номінальної потужності у газодизеля КамАЗ-7409.10 постійні і становлять 5–7,5 кг/год, при цьому мінімальні питомі витрати газового палива за швидкісною характеристикою 0,26–0,273 нм^3/(кВт·год), а за номінальної потужності 0,28–0,294 нм^3/(кВт·год).

Під час роботи фактична економія дизельного палива внаслідок заміщення його газовим паливом істотно залежить від умов експлуатації автомобіля, оскільки зі зменшенням навантаження частка теплоти, що вноситься з дизельним паливом, зростає. Очевидно, що при русі у міському циклі, коли двигун більшу частину часу працює з неповним навантаженням, економія менша, ніж у разі заміських магістральних перевезень, коли двигун працює переважно з повним або близьким до нього навантаженням.

У газодизелі ЯМЗ-240ГД запальну дозу дизельного палива можна змінювати в межах від 20–25 до 40–45% витрат у порівнянні з роботою за дизельним циклом.

Запальна доза на номінальному режимі при роботі за газодизельним циклом складає 27% у порівнянні з роботою двигуна за дизельним циклом.

Номінальна потужність при роботі за газодизельним циклом –259 кВт, що на 2,3% більше ніж при роботі за дизельним циклом (253 кВт).

Враховуючи, що при роботі за дизельним і газодизельним циклами в циліндри двигуна палива попадають в різних агрегатних станах і мають різні теплоти, для оцінки економічності переобладнання було визначено ефективний ККД η_e, подачу $G_{п.з}$ запальної дози дизельного палива і частки теплоти q, що вноситься з ним, залежно від ефективного крутного моменту *Ме* дизеля ЯМЗ-240 та газодизеля ЯМЗ-240ГД на номінальному швидкісному режимі (при частоті обертання 2100 $хв^{-1}$) та при максимальному крутному моменті (при частоті обертання 1500 $хв^{-1}$).

Ефективний ККД дизеля, майже в усьому діапазоні навантажень, вищий ніж у газодизеля, лише при максимальному навантаженні, при частоті обертання n = 1500 $хв^{-1}$ він менше ніж у газодизеля. Запальна доза дизельного палива стала, зростання відбувається при значеннях *Ме* більших 1000 Нм в обох режимах.

В роботі [33] описана система подача газу під надмірним тиском і регулювання для переобладнання дизеля Caterpiller 3208 в газодизель з мікропроцесорним регулятором і результати її дослідження. До конструкції дизеля не вносилися зміни, не змінювався також встановлюваний кут випередження впорскування. Для регулювання подачі газового і рідкого палив служить електронний блок управління на базі мікропроцесора, в який поступають дані про положення педалі управління, частоту обертання, співвідношення газового і дизельного палив, а також про температуру охолоджуючої рідини в системі охолодження двигуна.

Дослідження на газодизелі Caterpiller 3208 показали, що оптимальні характеристики газодизеля можна отримати, якщо регулювати одночасно і подачу газового палива $q_г$, і подачу запального дизельного палива $q_{дп}$ залежно від частоти обертання і навантаження.

Caterpiller 3208 від навантаження при різних частотах обертання, чим більше навантаження на двигун тим більший відсоток заміщення дизельного палива

газовим. При повному навантаженні заміщення дизельного палива газовимскладає 67...78%.

Електронний блок керування, окрім формування необхідних характеристик паливоподачі, впливає на електромагнітний газовий клапан і оберігає від аварійних ситуацій у разі порушення нормального функціонування системи регулювання.

Під час випробувань отримані залежності ефективного крутного моменту *Ме* від частоти обертання колінчастого вала n під час роботи двигуна за дизельним і газодизельним циклами (рис. 1.3). Також отримані залежності ефективного ККД від ефективного крутного моменту *Ме* при 1400 хв$^{-1}$ (рис. 1.4).

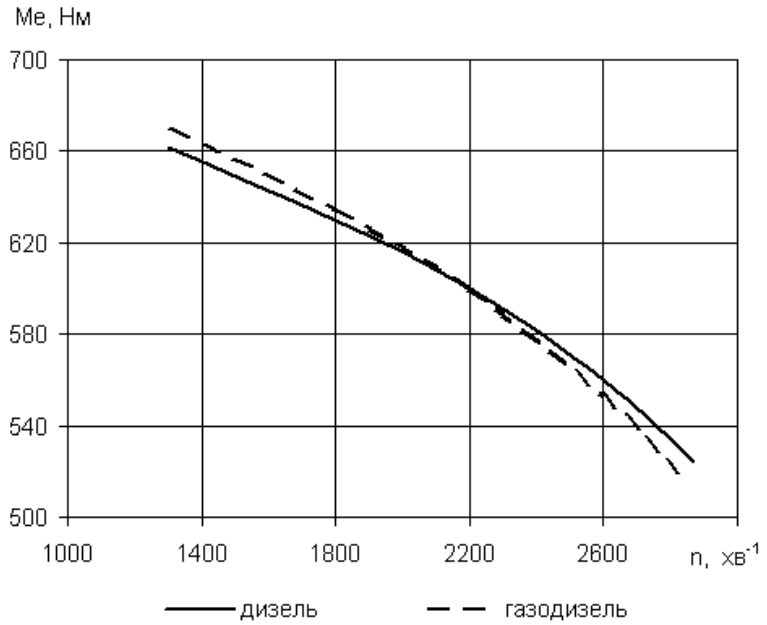

Рисунок 1.3 - Швидкісні характеристики дизеля й газодизеля Caterpiller 3208

Як видно з рис. 1.4 - значення ефективного крутного моменту, при роботі двигуна за дизельним і газодизельним циклами, майже не відрізняються. При зміні частоти обертання від 1300 хв$^{-1}$ до 2200 хв$^{-1}$ значення крутного моменту

дизеля нижче ніж у газодизелі, далі при збільшенні обертів колінчастого вала значення крутного моменту газодизеля менше ніж у дизеля.

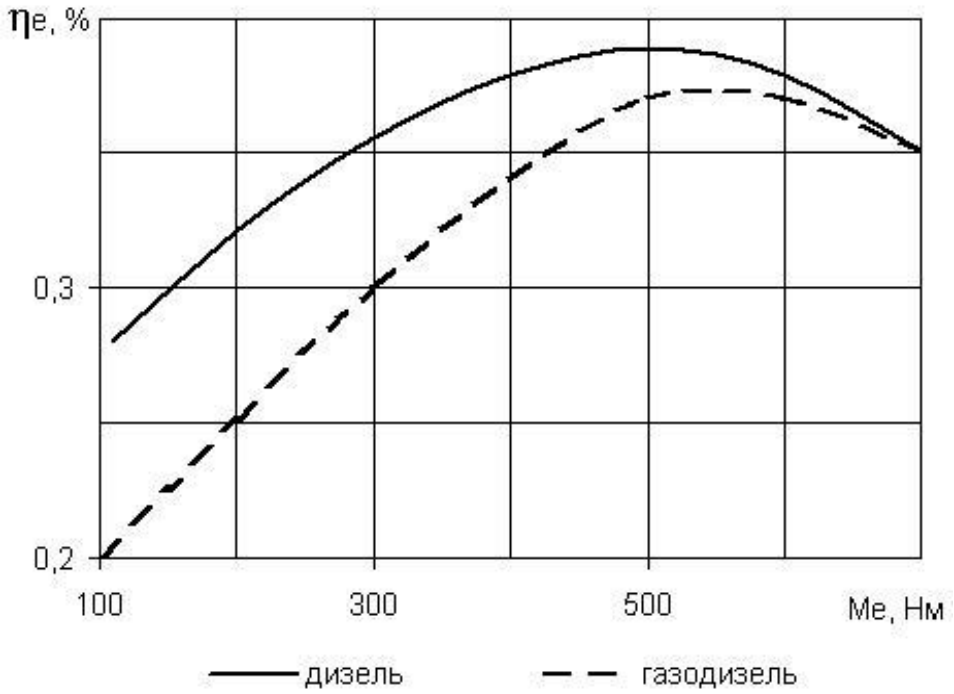

Рисунок 1.4 – Залежність ефективного ККД Caterpiller 3208 від ефективного крутного моменту при n = 1400 хв$^{-1}$

Як видно з рис. 1.4 - при часткових навантаженнях, значення ефективного ККД при роботі двигуна за дизельним циклом більше ніж при роботі за газодизельним циклом, за повного навантаження він однаковий для дизельного і газодизельного циклів. Характер зростання ефективного ККД однаковий для обох циклів.

Фірма „Фуджи" створила чотиритактний газодизель 6LG-32X, в якому запальна доза дизельного палива складає 5%. При випробуваннях були отримані навантажувальна характеристики двигуна (рис. 1.5). Як видно з рисунку, питома витрата теплоти при роботі за газодизельним циклом на всіх режимах, окрім номінального, вище ніж при роботі за дизельним циклом [31].

Як видно з рисунку доза запального дизельного палива зменшується по мірі зростання навантаження від 15 до 5 %.

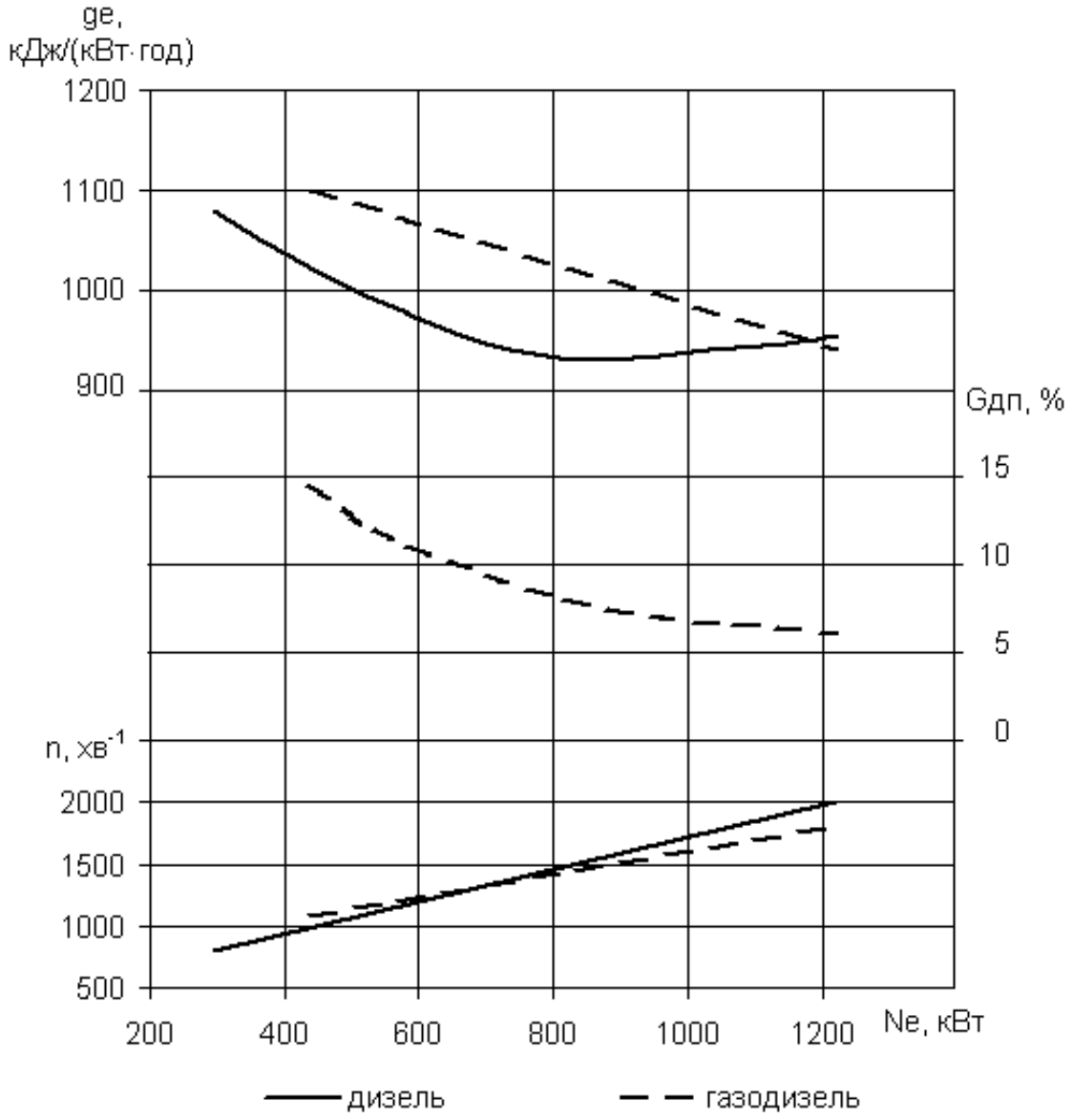

Рисунок 1.5 - Навантажувальні характеристики двигуна 6LG-32X при роботі за дизельним і газодизельним циклами

Дослідження показників при конвертації дизеля в газодизель, провела фірма „MAN” [34]. При випробуваннях вимірювались: t – температура відпрацьованих газів, до і після турбіни; P_z – максимальний тиск циклу; $P_в$ – тиск моменту відкриття випускного клапану; $G_{пов}$ – питома витрата повітря (рис. 1.6).

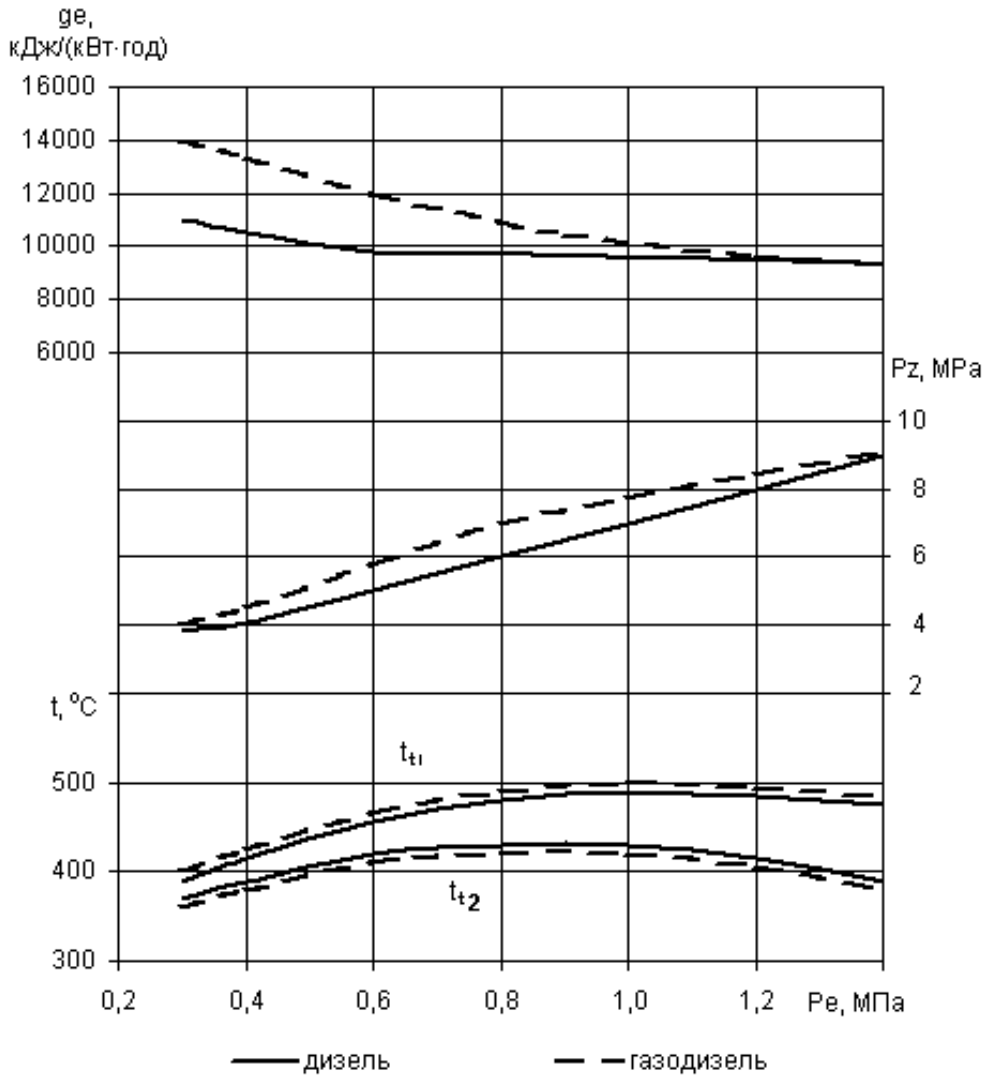

Рисунок 1.6 - Навантажувальна характеристика двигуна 8L 52/55 AOG фірми „MAN”, конвертованого для роботи за дизельним і газодизельним циклами [32]

Випробування двигуна 8L 52/55 AOG, конвертованого для роботи за дизельним і газодизельним циклами показали, що при роботі за газодизельним циклом збільшується питома витрата теплоти g_e в області часткових навантажень. Середній ефективний тиск в циліндрі двигуна P_e = 0,4 – 1,2 МПа, що пояснюється збільшенням питомої витрати повітря, при цьому склад суміші наближується до межі спалахування, знижується швидкість горіння, зростає теплота згоряння і погіршується термічний ККД.

1.5 Конвертація дизеля в газодизель

Робочий процес газодизеля конвертація дизелів в газодизель виконується, як правило, без істотних змін в конструкції двигуна і зводиться до оснащення машини газобалонної установкою і системою подачі газу у впускну систему дизеля. При цьому штатна система паливоподачі конвертованого дизеля повинна забезпечувати подачу в камеру згоряння запальний дози рідкого палива.

Газодизель, створеним шляхом конвертації серійних дизелів, притаманна цінна експлуатаційна риса - двопаливного, особливо важлива в умовах недостатньої кількості газозаправних станцій. Це означає, що при закінченню газу з балонів двигун може нормально працювати на одному дизельному паливі. Вартість палива для газодизеля визначається вартістю дизельного палива і газу з урахуванням співвідношення їх витрат. Для зменшення загальної вартості палива намагаються зменшити величину запальний дози рідкого палива, яке істотно дорожче еквівалентної кількості газу. Зменшення запальний дози має певні обмеження. Перше обмеження визначається властивостями штатної паливної апаратури, яка при малих циклових подачах не може забезпечити рівномірного розподілу палива по циліндрах в широкому діапазоні частот обертання.

Відповідними регулюваннями паливного насоса можна досягти задовільною рівномірності запальний дози при її величині, рівної 8 ... 10% від значення на номінальному режимі. При цьому рівномірність розподілу палива по циліндрах в номінальному режимі дизеля буде порушена. Крім того, зменшення запальний дози призводить до перегріву розпилювачів форсунок, охолодження яких істотно залежить від кількості палива яке приоходить скрізь них. Друге обмеження пов'язане з особливостями робочого процесу конвертованих газодизель, який має суттєві відмінності від процесів відомих спеціальних газорідинних двигунів. Ці відмінності полягають у наступному.

Жорсткість роботи конвертованого газодизеля більше, ніж базового дизеля. Це пояснюється великою тепловиділенням у факелі після запалення палива, оскільки окрім горіння рідкого палива починає горіти ще й газ. Збільшення подачі газу при збільшенні навантаження і сталості запальний дози рідкого палива призводить як до підвищення максимального тиску, так і швидкості його наростання (жорсткості процесу).

Горіння газоповітряної суміші після запалювання факелом рідкого палива відбувається як у двигуна з іскровим запалюванням. У двигунів з надмірно високим ступенем стиснення, якими є конвертовані на газ дизелі, це створює умови для виникнення детонації. На відміну від двигуна з зовнішнім сумішоутворенням і іскровим запалюванням, у якого форма камери згоряння пристосована до поширення полум'я по всьому об'єму, конвертований газодизель має камеру згорання, пристосовану до внутрішнього сумішоутворенню.

У вантажних дизелях реалізовані різноманітні способи сумішоутворення [41] з відповідними формами камер згоряння. Ця обставина викликає необхідність дослідження допустимих меж збагачення газоповітряної суміші і встановлення раціонального співвідношення між рідким і газоподібним паливом в залежності від способу сумішоутворення базового дизеля. За рахунок меншого результуючого коефіцієнта надлишку повітря потужність конвертованого газодизеля на межі димлення може бути більшою, ніж у базового дизеля. Якщо у дизеля через недосконаліть процесу сумішоутворення не вдається повністю використовувати повітряний заряд, то у газодизеля за рахунок більш якісного зовнішнього сумішоутворення можна досягти суттєвого збагачення паливно-повітряної суміші. Тим не менш, як підказує досвід, не слід перевищувати встановлені заводом-виробником межі максимальної потужності, насамперед, через зростання теплової напруженості.

Так, при потужності газодизеля, рівної номінальному значенню по базовому дизелю, спостерігається підвищення максимальної температури циклу і температури відпрацьованих газів на 80 ... 100 °.

Конкретне значення максимальної потужності в режимі газодизеля має ряд обмежень, одне з яких визначається способом сумішоутворення базового дизеля. У цих двигунів є істотний запас повітря (1,5 ... 1,6), за рахунок чого можна досягти підвищення потужності. Двигуни з камерами згоряння в поршні, мають достатній запас повітря для досягнення максимальної потужності в режимі газодизеля (1,5 ... 1,6), однак наявність організованого потоку заряду в камері згоряння при збагаченні газоповітряної суміші може підвищувати ймовірність виникнення детонації. Особливо це відноситься до двигунів з наддувом. При використанні природного газу, що володіє більш високою антидетонаційної стійкістю, частка заміщення дизпалива може бути істотно збільшена.

У результаті проведення стендових випробувань дизельного двигуна RABA-MAN D2156 MN 6U були отримані порівняльні зовнішні швидкісні характеристики при роботі в дизельному і газодизельному режимах [42].

Показано, що при використанні схеми з запальною дозою дизельного палива, рівний 15% від номінальної подачі, зміна крутного моменту і ефективної потужності якісно збігається для обох режимів роботи двигуна. При цьому питома витрата дизельного палива на навантаженнях, близьких до номінальної, знижується в 5 і більше разів. Разом з цим дослідження показують, що переведення з дизельного в газодизельний режим роботи і послідовне збільшення частки газового палива в загальному енергетичному балансі двигуна, не робить негативного впливу на його загальний тепловий стан.

2. РОЗРОБКА НОВІТНЬОГО ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ З УДОСКОНАЛЕННЯМ ТА МОДЕРНІЗАЦІЄЮ ОБЛАДНАННЯ

2.1 Установка для виробництва, очищення та зберігання біогазу

Основні конструктивні та технологічні рішення загальної компоновки установки для виробництва біогазу являють собою комплекс устаткування, яке забезпечує процес твердої ферментації сільськогосподарської продукції з метою виробництва біогазу. Комплекс було реалізовано за допомогою розроблення конструкторської документації.

Установка, яка забезпечує новітній процес отримання біогазу призначена для утилізації відходів органічного походження (гній ВРХ та свиней, пташиний послід, мул очисних споруд, та ін..) з метою одержання біогазу для використання у дизелях (рис. 2.1, 2.2). Крім того установка дозволяє отримувати органічні мінеральні добрива або кормові добавки.

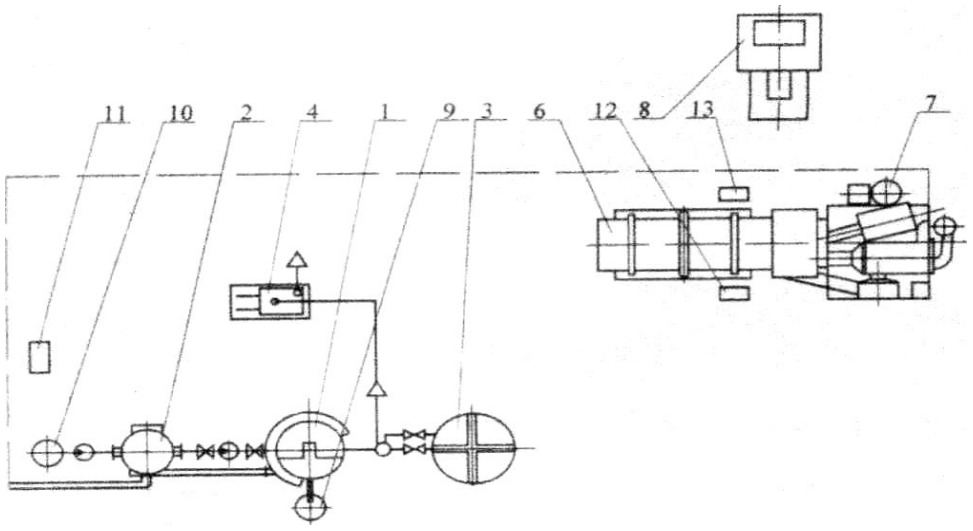

Рисунок 2.1 – Установка для виробництва біогазу

1 - біореактор; 2 - підігрівач- витримував; 3 - газгольдер; 4 - компресор; 5 - змішувач; 6 - сушарка; 7 - шнек; 8 – прес-гранулятор; 9,10 - ємкість; 11,12,13 - пульт управління.

Обладнання може бути використане на сільськогосподарських підприємствах і підприємствах харчової і переробної промисловості.

Підігрівач - витримував (рис. 2.2) представляє вертикальну ємність, на якій встановлена кришка, куди завантажується біомаса з подальшим її підігріванням.

В нижній частині підігрівача вмонтований водяний котел, який служить для підігріву біомаси. Котел має решітку для утримання твердого палива. Біомаса підігрівається до температури 30±5°С і проходить першу стадію зброджения в анаеробних умовах. Таким чином підготовлена біомаса більш ефективно використовується в біореакторі, куди закачується насосом, де проходить основний процес її ферментації.

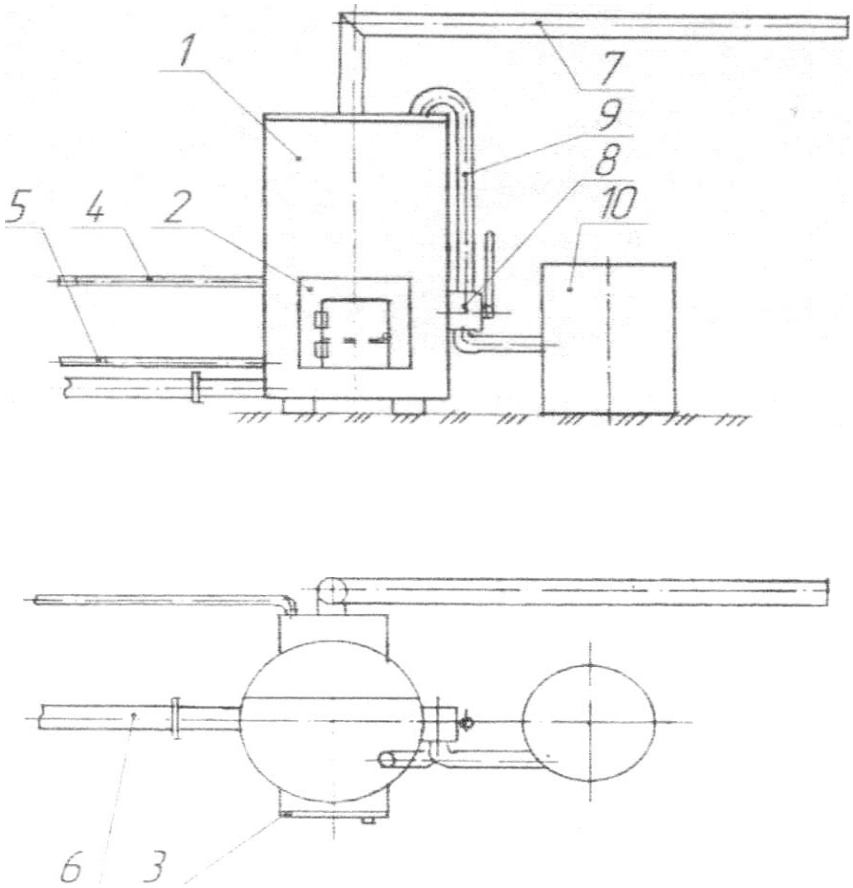

Рисунок 2.2-Підігрівач - витримувач

1 - ємкість підігрівача; 2 - бак батареї; 3 – дверці; 4-лінія гарячої води; 5 - лінія зворотна; 6 – трубопровід; 7 – димохід; 8 -ручний насос; 9 – шланг; 10- ємкість видаткова; 11 - топка.

Біореактор (рис. 2.3) – це вертикальна ємкість, яка складається з двох частин:

- нижня частина, яка установлена на рівну бетонну основу;
- верхня частина, яка установлена за допомогою фланців і болтів.

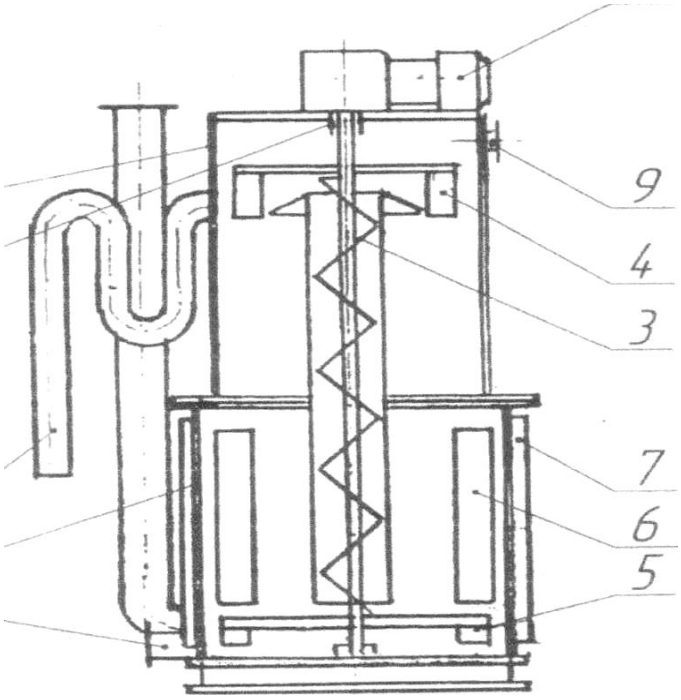

Рисунок 2.3 – Біореактор

1 - верхня частина; 2 - нижня частина; 3 – шнек; 4 - верхня мішалка; 5 - нижня мішалка; 6 -батарея; 7 - біоінкубатор; 8 – привід; 9 - штуцер, 10- вхідний патрубок; 11 - вихідний патрубок; 12 — сальник; 13 - атмосферна труба.

В нижній конструкції біореактора знаходиться дві мішалки і вертикальний шнек (для підйому густої біомаси та подальшого її перемішування), вертикальна труба, три камери - інкубатори (для вирощування мікроорганізмів), три вертикальні батареї (для підігріву біомаси). В верхній конструкції біореактора знаходиться мішалка з переливним конусом на трубі шнека.

Газгольдер (рис.2.4) являє вертикальну ємкість з двома коаксіальними стінками, які заповнені водою. В ємкість зверху встановлюється ковпак для збирання біогазу. По мірі накопичення біогазу, ковпак піднімається по направляючих до верхнього упору. Газгольдер з'єднаний з біореактором за допомогою верхнього газопроводу, всередині якого знаходиться спеціальний резервуар, заповнений водою (для запобігання запалювання).

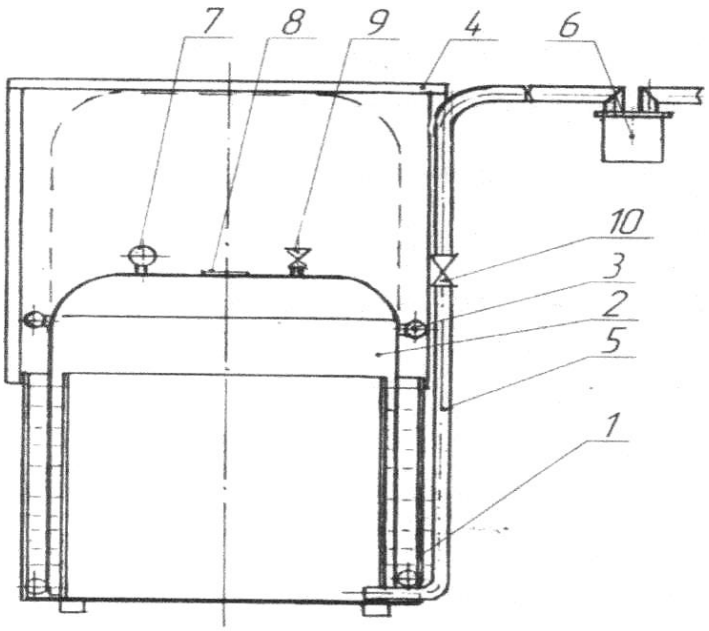

Рисунок 2.4 – Газгольдер

1 - зовнішня ємкість; 2 – ковпак; 3 – кран; 4 – огорожа;

5 – азопровід; 6 –запобіжник виникнення запалювання; 7 –манометр; 8 - розривна мембрана; 9- запобіжний клапан;

10- кран газовий.

В результаті опрацювання конструктивних і технологічних рішень запропонованої компонувальної схеми біокомплексу для виробництва біогазу, була розроблена конструкторсько-технологічна документація. Конструкторсько-технологічна документація була застосована під час виготовлення окремих елементів комплексу, модернізуючи його для розробки спеціальних улаштувань накачування і зберігання біогазу.

2.2. Розробка системи автоматизації виробництва біогазу

Технологічний процес створення біогазу є безперервним та складним. Це потребує створення комплексної системи безпеки процесу, у частині забезпечення інформаційної підтримки керування безпекою виробництва. У складі такої інформаційної системи безпеки повинні застосовуватися, щонайменше, автономно працездатні підсистеми (ланки): прогноз аварій, катастроф; оцінка й прогноз стану виробництва; вибір адекватних реакцій; оцінка ефективності реакцій [].

Нехай задано: X - простір умов експлуатації системи безпеки (СБ); Y - множина елементів (кабелів, сповісників, аналого-цифрові перетворювачі, комутатор (концентратор), мультиплексом, синхронізатор, реєстратор інформації, розподільник імпульсів, сигнальні елементи, виконавчі елементи та ін.), з яких комплектується СБ.

Елементом простору умов експлуатації будемо вважати вектор $x \in X$: $x = \{x_1, x_2 ... x_y\}$, компонентами якого є числові значення параметрів, що характеризують зовнішні умови, які впливають на елементи СБ в процесі експлуатації об'єкта. Для кожного компонента векторах $x \in X$ можна визначити значення $x_{ij}; j = 1,2,3...J_i$; $i = 1,2,3...I$; які є границями якісної зміни характеру зовнішніх умов. Приналежність $i-$ї $; i = 1,2,3...I$; компоненти вектора x до інтервалу $(x_{ij-1}, \mathrm{x_{ij}}); j = 1,2,3...J_i$; буде називатися $\mathrm{j-м}$ станом $i-$ї компоненти вектора зовнішніх умов.

Якщо збільшення індексу j відповідає зміні в напрямку жорсткості умов експлуатації, то простір X може бути розбите на підмножини

$X_j = \{x_i : x_i \le x_{ij}, j = 1,2,3...J_i, i = 1,2,3...I\}$, які задовольняють умовам:

1. $X_j \subseteq X_{j+1}, j = 1,2,..., \max\limits_i J_i$;
2. $\bigcap\limits_{j=1}^{\max\limits_i J_i} X_j = X^0$ X^0 - умова ідеальної експлуатації;

3. $\bigcup_{j=1}^{\max\limits_i J_i} X_j = X$.

Так як J_i, I - скінчені, то множина $\{X_j\}$, $j = 1,2,...,\max\limits_i J_i$ - скінчені, при цьому

$$card\{X_j\} \le \prod_{i=1}^{I} J_i \le \aleph_0$$

Множина Y елементів СКЕ має закінчену кількість підмножин:

1) $Y_1 = \{y_{\mu 1}, \mu = 1,2,...,M_1\}$- сповісники (температури, диму, полум'я…);

2) $Y_2 = \{y_{\mu 2}, \mu = 1,2,...,M_2\}$- датчики виходу вогнегасної речовини;

3) $Y_3 = \{y_{\mu 3}, \mu = 1,2,...,M_3\}$- аналого-цифрові перетворювачі;

4) $Y_4 = \{y_{\mu 4}, \mu = 1,2,...,M_4\}$ - сигнальні елементи;

5) $Y_5 = \{y_{\mu 5}, \mu = 1,2,...,M_5\}$- виконавчі елементи;

6) $Y_6 = \{y_{\mu 6}\}$ - ЕРП;7) $Y_7 = \{y_{\mu 7}\}$- комутатор (концентратор);

8) $Y_8 = \{y_{\mu 8}\}$- мультиплексор;

9) $Y_9 = \{y_{\mu 9}\}$- синхронізатор;

10) $Y_{10} = \{y_{\mu 10}\}$- розподільник імпульсів;

11) $Y_{11} = \{y_{\mu 11}\}$- реєстратор інформації.

елементами яких є технічні засоби передачі, розподілу й перетворення електроенергії. Очевидно, що при цьому повинні виконуватися очевидні умови:

1. $Y_l \bigcap Y_j = 0$, $\forall l \ne j = 1,2,...L$;

2. $\bigcup_{l=1}^{L} Y_l = Y$.

Кожний елемент множини $Y_l; l = 1,2,...L;$ визначений набором ознак (властивостей), що дозволяють однозначно відповістити на запитання про можливості використання даного елемента при заданих зовнішніх умовах X_j.

Для запобігання й ліквідації погроз і їхніх наслідків система комплексної безпеки даної концепції, в основному, повинна мати:

- високоефективні й надійні комунікаційні, інформаційні й інші технології, а також відповідне програмно-технічне забезпечення;

- сучасні засоби автоматизованого збору інформації про стан об'єкта, що захищається, виконавчих органів і передачі її по лініях зв'язку на відповідний ієрархічний центр обробки інформації;

- засоби контролю й підтримки готовності виконання службових обов'язків на належному рівні особовим складом і оперативно-технічними службами;

Крім того, система повинна мати здатність координувати взаємодії оперативно-технічних служб об'єкта й екстрених служб.

На рисунку 2.4 зображена схема запропонованого пристрою. При виникненні пожежі в контрольованому закритому об’єкті спрацьовують датчики (1, 2 і 3). При цьому сигнал надходить на входи, що запускають, комутатор 4, на виході якого сигнал з'являється , через 15 с.

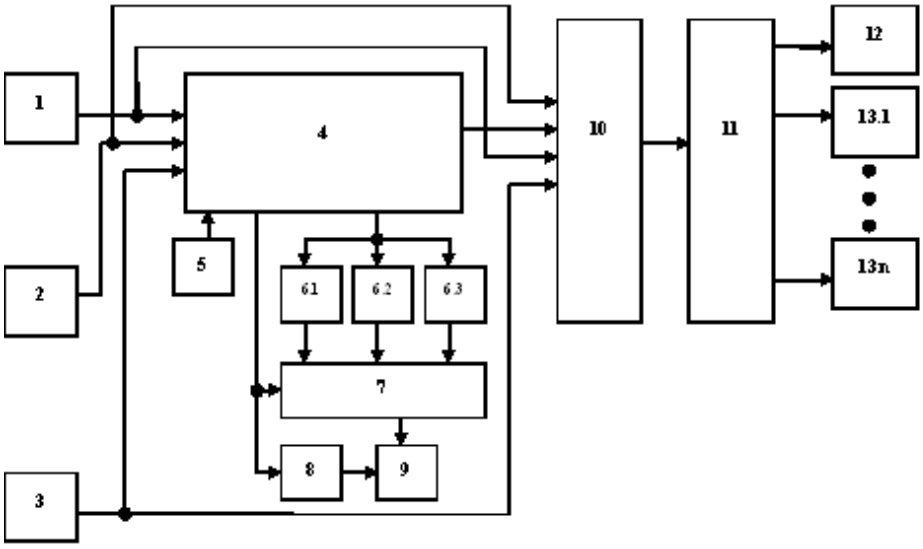

Рисунок 2.5 – Функціональна схема системи безпеки устаткування для виробництва біогазу

1 – диференційний сповіщувач температури;
2 – адресно-аналоговий сповіщувач диму;
3 – ручний сповіщувач;
4 – модуль адресації пожежний;
5 – датчик виходу вогнегасячої речовини;
6 – аналого-цифрові перетворювачі 6.1 - 6.3;

7 – мультиплексор;
8 – синхронізатор;
9 – реєстратор цифрової інформації;
10 – ПЕОМ;
11 – модуль керуючий МА-В;
12 – сигнальний елемент;
13 – виконавчі елементи (лафетний стовбур УПР-1).

Модуль адресації пожежний 4 по синхронізуючих сигналах синхронізатора 8 підключає по черзі вхідні шини до входів аналого-цифрових перетворювачів 6.1-6.3, інші сигнали в цей час від них відключені. Кожний з вихідних сигналів датчиків в відповідному аналого-цифрового перетворювачі перетворюється в восьмирозрядний двійковий код. Перетворений аналого-цифровим перетворювачем 6 сигнал в восьмирозрядний двійковий код подається на мультиплексор 7, в залежності від управляючого сигналу синхронізатора 8 один з інформаційних входів мультиплексора 7 подається вхід реєстратора цифрової інформації 9. Збереження інформації в реєстраторі цифрової інформації 9 відбуваються синхронно під управлінням синхронізатора 8, що дає можливість послідовно зберегти в пам'яті реєстратора інформацію про динаміку розвитку пожежі, час виходу вогнегасячої речовини, час локалізації вогнища загоряння. Якщо спрацювали всі три датчики (1, 2 і 3) , то сигнал поступає на відповідні входи мажоритарного елемента ПЕОМ 10, що реалізує логічну функцію "2 або 3 з 4" і призводить до появи сигналу на його виході й запуску модуля керуючого МА-В 11 імпульсів, що включає один з виконавчих елементів 13 (лафетний стовбур УПР-1), який в свою чергу включає в роботу засіб пожежогасіння (на схемі не зображений). Одночасно вмикається сигнальний елемент 12, що інформує про виникнення пожежної ситуації. У випадку одночасного спрацьовування комбінації із двох датчиків (1-2), (1-3) пристрій працює за вище зазначеним алгоритмом

Таблиця 2.1 Тип та призначення окремих виконавчих елементів розробленої автоматичної системи безпеки виробництва біогазу

Тип пристрою	Призначення
Сповіщувач пожежний адресно-аналоговий (диму)ІП 212-49А	1. Вимір рівня диму в місці установки. 2. Самодіагностика, контроль димового каналу. 3. Контроль і компенсація запиленості.
Сповіщувач пожежний адресно-аналгов.температури)ІП105/2А1	1. Вимір рівня температури в місці установки. 2. Самодіагностика, контроль димового каналу. 3. Контроль і компенсація запиленості.
Модуль керуючий МА-В	Керування пристроями охоронної й пожежної автоматики 1. Вихід реле (контакти замикання 5А, 220В) 2. Контроль ланцюга керування й живлення одного пристрою. 3. ШЗ для контролю стану виконавчого пристрою.
Адресна мітка керування оповіщенням, пожежогасінням МА- УОП	Керування пристроями охоронної й пожежної автоматики. 1. Вихід реле (контакти замикання 3А, 24В) 2. Контроль шлейфа керування декількома пристроями.
Адресна мітка пожежогасіння МА-7ТС, дод. живлення 24В МА-7ТС.12, живлення 12В МА-7ТСН, живлення 24В	1. Контроль шлейфа сигналізації з пожежними сповіщувачами, контроль вилучення сповіщувача. 2. Розрізняє одне й два спрацьовування в

	шлейфі. 3. Забезпечує скидання тривоги димових сповіщувачів, короткочасного відключення їхнього живлення. Струм споживання сповіщувачів у режимі чергування - до 1 мА (для МА-7ТСН - від 1 до 2 мА).
Адресна мітка пожежна МА-7ТСУ, живлення 24В МА-7ТСУ.12, живлення 12В	1. Контроль шлейфа сигналізації з пожежними сповіщувачами, контроль вилучення сповіщувача. 2. Розрізняє одне й два спрацьовування в шлейфі. 3. Забезпечує скидання тривоги димових сповіщувачів, короткочасного відключення їхнього живлення. 4. Додатковий вихід керування сиреною (відкритий колектор 200 мА).
Модуль адресації пожежний МА-РК живлення 24В (12В).	1. Контроль пристрою зчитування Touch Memory (Proximity) для постановки/зняття об'єкта з охорони або включення автоматики пожежогасіння. 2. Контроль шлейфа сигналізації з пожежними сповіщувачами стану з контактним виходом. Максимальна кількість пожежних сповіщувачів - 20 шт
Розмикач лінії РЛ-1	Ізолятор короткозамкненої ділянки інформаційної лінії. 2. Подвоювач лінії.

МПП(Н)-6-КД-1-БСГ-У2, ПП-3	Виконавчий елемент. Модуль порошкового пожежогасіння «**BiZone**».Пристрій електронного пуску.
УПР-1	Виконавчий елемент. Роботизований лафетний стовбур.
DL 06-66/T	Оповіщувач для кріпленням на стелі, потужність 10 Вт, круглий, метал., 100 V, белый, D-140мм.

У результаті досліджень експериментально встановлені основні характеристики автоматизованої системи керування оперативним пожежогасінням:

- середній час фіксації спрацьовування сповіщувачів – 300 мс;
- середня інертність спрацювання – 6 с;
- середній час скидання режиму «Пожежа» сповіщувачів – 5с;
- середня тривалість подачі вогнегасячого порошку виконавчим елементом (МПП(Н)-6-КД-1-БСГ-У2) – 15 с;
- середня тривалість подачі розпиленого струменя води (УПР-1) – 48 с;
- підключати адресні шлейфи будь-якої конфігурації: променевий, кільцевий при довжині лінії зв'язку до 2000м;
- встановлювати дублюючі пульти керування, видалення до 1000м.
- зберігати інформацію про всі події і обставини їх виникнення в енергонезалежній пам'яті 1000 подій.
- загальна кількість адресних пристроїв – 384 на один приймально-контрольний прилад.

Таким чином, на основі аналізу тенденцій розвитку систем безпеки, а також останніх досягнень радіоелектроніки й інформаційної техніки можна сформулювати основні вимоги, яким повинна задовольняти сучасна автоматизована система безпеки технологічно небезпечних об’єктів. Щоб повною мірою використати створену на основі засобів обчислювальної й

мікропроцесорної техніки систему безпеки, необхідно для кожного інформаційного фактора пожежі (дим, тепло, випромінювання полум'я й т.п.), а також для їхніх певних комбінацій розробити математичні моделі й відповідне інформаційне забезпечення на основі досить великого й експериментального матеріалу, що містить статистичну повноту.

2.3 Аналіз хіміко-біологічних показників сировини для зброджения біомаси

Сировиною для мікробіологічної ферментації є відходи сільськогосподарського виробництва, харчової і переробної промисловості та комунального господарства, які складаються з органічної речовини.

В багатьох країнах світу використовується достатньо сировини для організації промислового виробництва біопалива та продуктів переробки (біологічно-активних добрив та кормових добавок). В основному це відходи тваринництва, рослинництва, комунального господарства, харчової та переробної галузі.

Однак, найбільш придатною сировиною для інтенсивної ферментації органічної маси є відходи великої рогатої худоби (ВРХ), свиней, птиці, озерний сапропель, мул ставків і т. ін. [12].

Дані про добовий вихід та вологість екскрементів від однієї тварини наведі в (табл. 2.2). Середня вологість екскрементів: у корів молочної породи - 88%, у биків, телят, м'ясних тварин - 86%, зольність сухої речовини -16%, або середній вміст органічної речовини (ОР) складає 84%.

Тип тварин і *спосіб годування* (склад *корму)* визначають наявність в гнойовій масі включень різних розмірів, відношення твердих і рідких виділень. В гною свиней та в посліді птиці менше великих частинок і більше води, ніж в гною ВРХ (табл.. 2.2, 2.3).

Таблиця 2.2 – Добове виділення та вологість екскрементів ВРХ

№ п/п	Склад екскрементів	Корови	Бики	Телята				
				До 3 місяців	до 6 місяців	6-12 місяців	12-18 місяців	18 і більше місяців
1	Екскрементна маса, кг	55	40	4,5	7,5	14	27	35
	вологість,%	88,4	86	91,8	87,4	87,2	86,7	84,9
2	Кал маса, кг	35	30	1	5	10	20	23
	вологість, %	85,2	83	80	83	83,5	83,5	80,1
3	Сеч. маса, кг	20	10	3,5	2,5	4,0	7,0	12
	вологість, %	94,2	95	95,1	96	96,5	96	94,2

Примітка: 1. Густина сухої речовини екскрементів слід приймати 1250 кг/м, зольність сухої речовини - 16%. Кількість і вологість підстилкового гною ВРХ визначається розрахунковим шляхом в залежності від умов утримання тварин, а також виду, вологості і кількості підстилки на голову за добу.

Таблиця 2.3 – Добовий вихід екскрементів свиней та їх вологість

№	Склад експериментів	Хряки	Свиноматки			Поросята, дн.			Свині на відгодівлі, кг	
			Холості	Супоросні	Поросні	26-42	43-60	61-106	до 70	більше 70
1	Екскрементна маса, кг	11,1	8,8	10	15,3	0,4	0,7	1,8	5	6,5
	вологість %	89,1	90	91	90,1	90	86	86,1	87	87,5
2	Кал. маса, кг	3,86	2,46	2,6	4,3	0.1	0,5	0,7	2,05	2,7
	вологість, %	75	73,8	73,1	70	72,5	71,0	71,4	73	74,7
3	Сеч. маса, кг	7,24	6,34	7,4	11	0.3	0,4	1,1	2,95	3,8
	вологість, %	97	97,5	98,3	96,8	96,7	96	96,3	96,7	96,9

Таблиця 2.4 – Добовий вихід посліду від 1000 голів птиці, кг

№ п/п	Вид птиці	Вологість посліду	Вік птиці, неділь					
			1-2	3-4	5-6	7-8	9-22	більше 22
1	Кури і курчата	75,0	4-14	24-39	61-82	97-114	128-175	189
2	М'ясні кури	75,0	11-46	92-130	140-170	200-230	250-280	300
3	Бройлери	76,0	10-45	90-125	144-182	240-250	-	-
4	Індики	76,0	30-98	124-182	224-260	280-310	220-350	378
5	Гуси	83,0	50-140	280-330	360-390	440-450	480-490	490
6	Качки	83,0	30-60	90-120	170-200	210-220	230-250	250

В таблиці 2.5 показано відношення твердих і рідких частин гною. Від кормового раціону, якості корму і виду тварин залежить і хімічний склад екскрементів, що відповідно пояснюється виділеннями з екскрементів основної частини поживних елементів**,** які вживають тварини і птиця з кормами. Дані про склад основних поживних елементів в екскрементах тварин і птиці наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Хімічний склад екскрементів, %

№ п/п	Склад екскрементів	Свіжий кал		Свіжа сеча		Послід
		ВРХ	Свині	ВРХ	Свині	птиця
1	Вода	83,6	82,0	93,8	96,7	76,0
2	Суха речовина	16,2	18,0	6,2	3,3	24,0
3	Азот (N2)	0,29	0,6	0,58	0,43	1,65
4	*Фосфор* (P_2O_5)	0,17	0,41	0,0	0,07	1,0
5	*Калій* (K_2O)	0,10	0,26	0,49	0,83	0,62
6	Магній (M2O)	0,13	0,10	0,04	0,08	0,1
7	*Сірка* (SO_2)	0,04	0,04	0,13	0,08	0,12

При зміні раціону годівлі тварин і птиці змінюється і хімічний склад органічних відходів. Наприклад, при зменшенні в раціоні кількості концентратів, склад азоту і фосфору в екскрементах дещо знижується, а калію збільшується.

При переході від корму свиней картоплею до відгодівлі зерном в екскрементах значно збільшується склад сухої речовини, азоту і фосфору і зменшується склад калію.

Безпідстилковий гній характеризується високим вмістом поживних елементів, але гній ВРХ, свиней і пташиний послід відрізняються по складу (табл. 2.6)

Таблиця 2.6 – Порівняльна характеристика хіміко - біологічних властивостей гної ВРХ, свиней і пташиному посліді (% на сиру речовину)

Речовина, елемент	ВРХ (корови)	Свині (відгод. зерн.)	Птиця
Суха	10,0	10,0	24,0
Органічна	6,8	7,0	21,6
Азот	0,40	0,05	1,20
Фосфор	0,06	0,14	0,86
Калій	0,46	0,27	0,41
Кальцій	0,21	0,26	-
Магній	0,05	0,06	-
Натрій	0,05	0,04	-

Слід мати на увазі, що по мірі розбавлення безпідстилкового гною або посліду водою концентрація органічних речовин і поживних елементів в ньому знижується.

Крім основних поживних речовин в гною і посліді є мікроелементи. В гною ВРХ вологістю 92% вміст поживних елементів складає: 2,8 г Си, 22 г Мп, 12 г 2п, 24 г В, а в 1 т свинячого гною вологістю 95% - 2,9 г Си, 12 г Мп, 32 г 7м.

Органічна речовина безпідстилкового гною представлено органічними сполуками калу і сечі тварин. В склад органічної речовини входить целюлоза і геміцелюлоза, лигнін, пентозани і другі речовини, в тому числі в невеликих кількостях розчинні вуглеводи (крохмаль). Основна частина органічної речовини калу представлена речовинами в високим вмістом вуглецю, тому відношення С:М досить широке. В той же час, відношення С:М в сечі ВРХ складає 1,2:1,0, а в сечі свиней 0,8-0,9:1,0.

В зв'язку з відносно низьким вмістом кисню в безпідстилковому гної біохімічні процеси в ньому протікають значно повільніше, ніж в підстилковому гної і компостах.

Таким чином, такий гній добре переробляється переважно в анаеробних умовах збродження легко мінералізованих речовин калу і сечі. При цьому утворюються такі газоподібні продукти, як сірководень, вуглекислий газ, аміак, метан, мерконтан.

2.4 Мікробіологічна ферментація органічної маси.

Метанове збродження (біометаногенез або мікробіологічна ферментація) – це процес перетворення біомаси в енергію. При цьому біогаз (суміш метану і вуглецевої кислоти) утворюється при анаеробному зброджені органічних речовин спільнотою мікроорганізмів метаногенів. Анаеробне метанове збродження, успішно застосовується багато років в практиці комунального господарства для переробки (з метою знезараження) осадів і мулу очисних споруд. Біохімічні процеси бродіння проходять по одному і тому ж принципу для всіх видів органічної сировини і всіх типів конструктивних розробок.

Процес метаногенерації - складний біохімічний процес, який здійснюється в декілька стадій спільнотою мікроорганізмів, зв'язаних між собою трофічними зв’язками. Можна виділити три основні стадії збродження. На першій стадії складні високомолекулярні органічні з'єднання розщеплюються під впливом бактерій гідролітиків на більш прості низькомолекулярні. На другій стадії при участі кислото-утворюючих бактерій

проходить подальше розкладання з створенням органічних кислот, спиртів, вуглекислого газу, вуглецю та ін.. Кінцеве перетворення органічних речовин з генерацією біогазу (суміш метану і вуглекислоти) проходить на третьому етапі процесу (власне метанове зброджения).

Метанові бактерії є суворими анаеробами, тому присутність в біореакторах кисню і значної кількості іонів нітратів може перешкоджати виділенню метану.

Анаеробні умови в біореакторі, куди завантажується перероблена маса, збагачена розчинним киснем, створюються разом з герметизацією, за рахунок використання кисню факультативними анаеробними бактеріями типу Е. Існують окремі види метаногенів, здібних зберегти життєдіяльність при короткочасовій наявності кисню.

Метаноутворюючі бактерії розвиваються, як уже відмічалось в складі складної популяції, яка включає різні види анаеробних бактерій. Дякуючи цьому вони можуть використати для утворення метану практично всі природні органічні сполуки (крім лігніну).

Переважна більшість метаногенів досягає максимальної швидкості росту при температурі +30 +40°С. Є такі термофільні види з оптимумом температури від +50 до +80 °С. Оптимумом розвитку для термотолерантних груп +40 до +42 °С. В практиці переважно приймають два режими метаногенеза: мезофільний (+33 +37 °С) і термофільний (+50 +55 °С). В останній час находить застосування і проміжний термотолерантний (+40 °С). Швидкість розкладення і активність мікроорганізмів - метаногенів підвищується із збільшенням температури.

Вибір температурного режиму процесу метаногенерації при створенні і експлуатації біореакторів дискутується, як правило, не тільки швидкість біохімічної активності процесу, але і вимогами якості кінцевого продукту, наприклад, ступенем знезараження, дегельмінтизації, девіталізації збродженої маси, вмістом метану в складі біогазу, кліматичними і економічними факторами.

Враховуючи те, що так звана термотолерантна група анаеробів менш відчутна до різного роду неблагодійним зовнішнім діям, але біохімічно більш активна ніж мезофільна і на здійснення процесу вимагає менших енергетичних затрат при виборі режимів роботи біоконверсного комплексу в дослідженнях застосовували температурний режим в межах +40 °С. Результати функціональних випробувань при вологості субстрату (органічної маси) 86-89 % отримано від 3,5 куб. м/год до 4,5 куб. м/год біогазу.

Склад сировини і його властивості значно впливають на процес бродіння і вихід біогазу. Наприклад, свіжі гнойові стоки впливають на продукцію біогаза, так як від моменту дефекації в гнойових стоках проходить мікробіологічні процеси (свого роду підготовка), які приводять до гідролізу складних органічних сполук та накопиченню низькомолекулярних сполук, які беруть участь безпосередньо в біосинтезі метану.

Відомо [3], що після 10-15 днів зберігання гною ВРХ по концентрації органічних кислот є найбільш підготовлений в процесі анаеробного зброджения.

Із основних складових організаційної речовини, жири, по даним [1, 3] дають змогу виділити найбільшу кількість біогазу з високим вмістом метану (CH_4), білкові речовини - трохи менше, але теж з високим вмістом CH_4, і найменший вихід газу - фаза з найменшим вмістом CH_4.

Зброджения визначалось за формулою [1, 2, 3]:

$$а=0,92ж+0,62у+0,34б, \quad (4.1)$$

де ж, у, б - вміст жирів, вуглеводів, та білків в 1 г сухої органічної речовини (СОР)

Коефіцієнти у формулі визначають питомий вихід газу (л/т) відносно завантажуваних жирів, вуглеводів та білків.

Дані про кількість газу, який може бути виділений із різних сільськогосподарських відходів, залежить від їх сумішей при оптимальних умовах анаеробної переробки відрізняються за своїми значеннями і залежать від складу субстрату, умов проходження процесу, від терміну перебування

біомаси в біореакторі, бактеріального складу і активності метаногенеруючих бактерій.

В табл. 2.7 відображені результати отримання метану із різних сільськогосподарських відходів.

Слід відмітити, що крім відходів тваринництва, перспективною сировиною для метанового зброджения є різні відходи рослинництва (стебла, листя, корені і т. ін.). Спільна переробка відходів рослинництва і тваринництва на ферментаторах в біологічно-активні добрива із збалансованим співвідношенням C/N (зниження вуглецю при утворенні метану) сприяють покращенню агрохімічним властивостям ґрунту.

Таблиця 2.7 – Вихід біогазу (метану) при метановому зброджені різних органічних мас

п/п	Органічна маса	Вихід *CH4,* куб. м/кг СОР	Вміст СН4, %
1	Гній свиней	0,20...0,58	55...81
2	Гній ВРХ	0,20...0,41	52...80
3	Пташиний послід	0,37...0,64	34...62
4	Гній овечий	0,63	70
5	Силосні відходи	0,25...0,30	51...88
6	Молочні відходи	0,625	82
7	Трава	0,36...0,63	32...84
8	Стоки очисних споруд	0,60	70

Коли зброджению піддається субстрат, який містить, крім гною, другі рослинні рештки, слід звертати увагу на їх склад. При цьому потрібно враховувати характерне для певних високий вміст лігніну, який практично не розчиняється мікробами, і відповідно не приймає участі в процесі ферментації.

Тому, вихід біогазу із екскрементів жуйних тварин, які вживають корми з високим вмістом сирої клітковини, значно менший, ніж із екскрементів птиці і свиней.

При метановому зброджені одним із найбільш важливих факторів є співвідношення C/N в асиміляційній частині субстрату. Коли співвідношення C/N в гною дуже велике, то недостача азоту служить фактором, який перешкоджає процесу метанового збродження. Коли співвідношення дуже мале, то утворюється велика кількість аміаку токсичного для бактерій.

Різні автори називають різні цифри оптимального співвідношення C/N від 10 до 30 і навіть 45. Як правило в практиці для регулювання цього показника до сировини з відомими співвідношеннями добавляють іншу сировину з іншим відомим співвідношенням. При цьому слід мати на увазі, що в процесі метанового збродження це співвідношення міняється до 6-18, тому що вуглець (до 40% і більше) виділяється з біогазом, а азот залишається в зброджувальній біомасі і видаляється тільки при вивантаженні шламу.

2.5 Обґрунтування основних параметрів процесу ферментації органічної маси

Реалізація біоконверсних процесів в сільськогосподарському виробництві шляхом впровадження технологічного процесу метанового зброджування біомаси безпідстилкового гною дозволяє: отримувати біогаз - альтернативне джерело енергії; виробляти високоякісні органічні добрива; попередити забруднення навколишнього середовища [1, 2, 3]. Одним з основних шляхів підвищення ефективності метанового зброджування є визначення і дотримування оптимальних параметрів процесу, в тому числі і таких, як експозиція ферментизації, доза завантаження і вологість гнойової біомаси.

Для виявлення впливу цих показників на процес метанового зброджування біомаси безпідстилкового гною ВРХ в мезофільному режимі було проведено досліди на експериментальній установці біоконверсного комплекса (рис 2.1).

Дослідження проводились шляхом постановки експериментів по зброджуванню реальної біомаси безпідстилкового гною, моделюючи

функціонування установок промислового масштабу. В якості показника, який характеризує ефективність метанового зброджування, використано вихід біогазу з одиниці органічної речовини гнойованої біомаси, яка завантажується в мікробіологічний реактор. Температура ферментизації становила 35-53 ºС, а доза завантаження початкової гнойованої біомаси становила 0,6; 0,2 і 0,12 кубічних метрів за добу або відповідно 2,0; 6,6 і 4,2% робочого об'єму реактора за добу. Експозиція ферментизації становила 5,0; 15 і 25 діб. Тривалість експерименту було вибрано з розрахунку півтора кратного обміну всього об'єму мікробіологічного реактора з найбільшою експозицією ферментизації. При аналогічних дозах завантаження визначався і вихід біогазу в залежності від початкової вологості гнойової біомаси. Мінімальне значення її вологості не було нижчим 77%, що зумовлює її реологічними властивостями (при більш низьких значеннях вологості відбувається забивання зливних патрубків, що характерно і для промислових повномасштабних установок).

Визначення фізико-хімічних показників біомаси безпідстилкового гною ВРХ виходу біогазу, ступеня біоконверсії органічних речовин проведено відповідно до ІСНД 16.20.01-96. Враховуючи те, що фізико-хімічні показники біомаси безпідстилкового гною в умовах досліду були нестабільними (межі коливань склали за вмістом органічної речовини в АСР - 78,7..84,9%, за вмістом загального азоту - 0,12..0,21%, вмістом ЛЖК - 1230..2580 мг/л, за pH- 6,9..7,6 і за середньозваженим розміром часток - 1,5..3,90 мм, що характерно і для реальних промислових процесів метанового зброджування), то обробку результатів по виходу біогазу з метою отримування рівнянь регресії проведено на ПЕОМ за методом натуральних квадратів і синтезу регресивних моделей оптимальної складності з використанням методів самоорганізації (розділ 3).

2.6 Побудова математичних моделей, які описують процес виробництва біогазу

Сучасні біогазові установки розділяються на два види за технологією підготовки і бродіння сировини: рідкофазна технологія передбачає вологість зброджуваної органічної маси більше 85% і твердофазна - вологість органічної маси менше 85%.

Твердофазне бродіння являє собою серію послідовних операцій. Вихідну сировину (біологічні відходи, гній, шлам, жири або зелену масу) поміщають в герметично закритий ферментер, нагрівають та перемішують. При цьому в результаті анаеробних процесів у сировині утворюється біогаз.

Біогаз здебільшого застосовують для комбінованого виробництва електроенергії і тепла в блокових міні-ТЕЦ. Газову суміш очищують від сірководню (H2S) і подають до газопоршневого двигуна, який приводить в обертання генератор. Вироблений таким чином електричний струм надходить в мережу. Тепло із системи охолодження двигуна і тепло вихлопних газів відводиться за допомогою теплоносія *для* подальшого використання. Частина цього тепла (15-30%) необхідна для підігрівання для підігрівання біосировини та підтримання вибраної температури ферментації, оскільки бактеріальні штами, що відповідають за розкладання біомаси, найбільш продуктивні в діапазоні температур від 37 °C (мезофільні) до 55 °C (термофільні). Надлишкове тепло може бути використане різними споживачами. Найбільш ефективними є установки з цілорічним використанням тепла. В деяких проектах біогаз збагачують і закачують в газопровід. Таким чином зростають шанси для будівництва біогазової установки *в* тих зонах, де відсутні виробники тепла. Збагачений біогаз також можна використовувати як паливо в автотранспорті. Після метанового зброджування залишковий субстрат практично не має неприємного запаху. Його застосовують як органічне добриво у сільськогосподарському виробництві [13].

Для того, щоб вибрати режим ферментації гною та конструкційно-технологічні параметри ферментера, необхідно визначити вплив технологічних показників на вихід біогазу під час твердофазної ферментації органічної сировини в анаеробних умовах. Під час експериментальних досліджень свіжий

підстилковий гній ВРХ завантажували у ферментер дискретно чотири рази на добу через шість годин відповідно до експозиції зброджування.

Для інтенсивної твердофазної ферментації біомаси ЧДТУ пропонує ферментер, що містить корпус, кришку, газгольдер, пристрій для завантаження, патрубок завантаження, пристрій для розвантаження, калорифер, відрізняється тим, що додатково обладнаний розподілювачем, який встановлено в центрі корпусу, барботером, компресором, що зв'язаний із барботером, іннокулятором, який зв'язано із барботером, розпилювачем, який встановлено над розподілювачем, насосом іннокулятору, який зв'язано з іннокулятором і з розпилювачем; калорифер розташовано в центрі корпусу співвісно із патрубком завантаження таким чином, що патрубок завантаження проходить крізь калорифер.

Ферментер складається (рис.2.6.) з корпусу 1, закритого кришкою 2, який має газгольдер 3. Всередині корпусу 1 розташовано патрубок завантаження 5 та калорифер 7 таким чином, що патрубок завантаження 5 проходить крізь калорифер 7. Також всередині корпусу 1 розташовано барботер 8 та пристрій для розвантаження 13. Нижня частина барботера 8 сполучена із іннокулятором 10, що призначений для збору рідкої фракції. Барботер 8 підєднано до компресору 9, а іннокулятор 10 підєднано до насосу іннокулятора /7 та розпилювача 12, який встановлено всередині корпусу 7. Патрубок завантаження 5 сполучено із пристроєм для завантаження 6 та із розподілювачем 4, який знаходиться всередині корпусу 1. Над розподілювачем 4 встановлено розпилювач 12. Компресор 9 підєднано до вільної порожнини корпусу 1, ємності для збору біогазу 14 та повітрозаборнику 75.

При переробці рідких органічних відходів ферментер працює наступним чином. Сировина, що підлягає переробці (органічні відходи) пристроєм для завантаження ***6*** нагнітається до патрубку завантаження 5, з якого вона надходить до внутрішньої порожнини корпусу 7 через розподілювач *4,* рівномірно розміщуючись по об'єму внутрішньої порожнини корпусу *1* . За допомогою калориферу 7 сировина всередині корпусу *1* нагрівається до

заданої температури, оптимальної для проведення біохімічних процесів, та підтримується при ній. В результаті ферментаційних процесів (рідкофазна ферментація) із маси сировини в корпусі *1* починає виділятись біогаз, який накопичується в газгольдері *3* та який викачується компресором *9* у ємність для збору біогазу *14*. За необхідності, для підтримання визначеного середовища всередині корпусу *1*, компресором *9* в барботер *8* може нагнітатись біогаз. Як відомо, під час тривалої ферментації рідка фракція органічних відходів збирається на дні ємності - корпусу *1.* Задля підтримання належної вологості сировини використовують іннокулятор *10*. Рідка фракція надходить із сировини крізь отвори барботера *8* в іннокулятор *10*, звідки вона насосом іннокулятору *11* перекачується до розпилювача *12*, що зрошує зверху сировину в корпусі *1*. Після закінчення циклу процесу ферментації зброджена маса вивантажується пристроєм для розвантаження *13*, наприклад - шнековим. Після цього цикл може бути повторений.

При переробці твердих органічних відходів відмінність у роботі ферментера полягає у наступному. Задля інтенсифікації біохімічних реакцій твердо-фазної ферментації компресором 9 у робочий об'єм корпусу 1 через барботер 8 нагнітається повітря, яке відбирається через повітрозабірник 15 та розпилюється крізь отвори барботеру 8. За необхідності, для підтримання визначеного середовища всередині корпусу 1, компресором 9 в барботер 8 може нагнітатись біогаз. Температура сировини в зоні ферментації досягає 60-70 ºС. Компресор 9 може використовуватись і для нагнітання повітря у верхню частину корпусу 1. Після закінчення циклу процесу ферментації зброджена маса вивантажується пристроєм для розвантаження 13. Після цього цикл може бути повторений.

Використання розподілювача, що встановлено в центрі внутрішньої порожнини корпусу призводить до поліпшення однорідності розташування сировини всередині корпусу, що покращує процес 11 ферментації.

Розташування патрубку завантаження так, що він проходить крізь калорифер дозволяє більш повно використовувати теплову енергію калориферу та прискорити процес нагріву сировини.

Використання барботеру дозволяє інтенсифікувати процес ферментації, а здатність використовувати для роботи барботера біогаз дозволяє оптимізувати параметри середовища робочого об'єму корпусу.

Використання іннокулятору, що вказаним чином сполучено із барботером, насосом іннокулятору та розпилювачем дозволяє підвищити ефективність проведення процесу ферментації внаслідок можливості підтримувати належну вологість сировини.

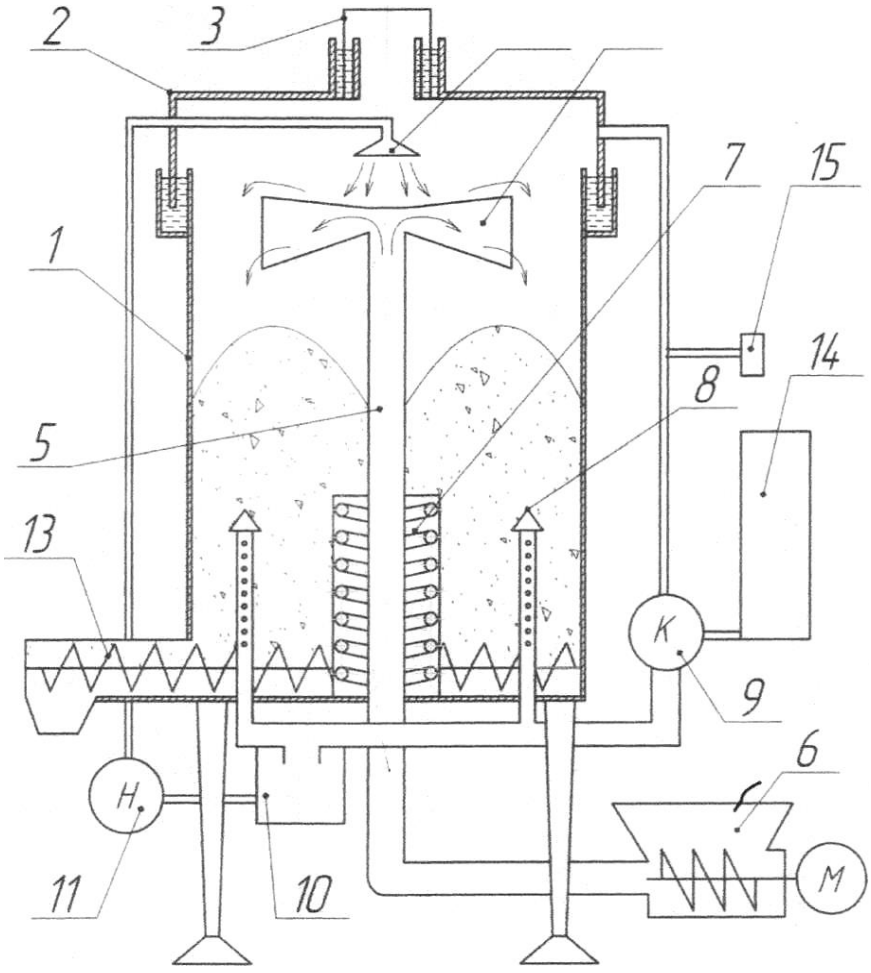

Рисунок 2.6 – Ферментер для твердофазної ферментації.

Рисунок 2.7 – Вивантаження збродженої маси із ферментера.

Таким чином, ферментер (біореактор), що містить корпус, кришку, газгольдер, пристрій для завантаження, патрубок завантаження, пристрій для розвантаження, калорифер, який відрізняється тим, що додатково обладнаний розподілювачем, який встановлено над розподілювачем, насосом і нокулятора, який зв'язаний з інокулятором і з розпилювачем. Крім того калорифер розташований в центрі корпусу співосно з патрубком завантаження, таким чином, що патрубок завантаження, проходить крізь калорифер, що дає змогу нагрівати наступаючу органічну масу до температури, яка встановлена в біореакторі.

Для проведення експериментальних досліджень твердофазної ферментації органічної маси були використані стандартні і спеціальні технічні засоби для випробування обладнання, яке представляє собою систему машин і комплект технологічного обладнання, яке працює по замкнутому циклу на натуральному технологічному матеріалі (органічна маса - гній ВРХ).

Основним критерієм оцінки роботи ферментера слугував показник питомого виходу біогазу з одного кілограма сухої речовини. Вихід біогазу контролювали щодобово газовим лічильником, показники якого заносили в

журнал випробувань ферментера. Результати експериментів представлені в таблиці 2.8.

В результаті експериментальних досліджень отримано рівняння регресії, яке встановлює залежність питомого виходу біогазу від температури, експозиції збродження і вологості гною ВРХ. У формулі 2.1 наведено рівняння регресії, яке є стандартним виглядом математичної моделі. Для повнофакторного експерименту при застосуванні трьох факторів це рівняння має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} V = {} & b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2 + \\ & + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3, \end{aligned} \quad (2.1)$$

Таблиця 2.8 – Результати експериментальних досліджень ферментації органічної маси (виробництво біогазу)

№ п/п	Фактори			δф, *м/доб*	V, *м3 /кг.доб*	Е*зат* *Мдж /м3хдоб*	Е*ф* *Мдж /м3хдоб*	Е*Т*, *Мдж /м3хдоб*	k*ефек*
	X1, (W)	X2, (Т, °С)	X3, (П,діб)						
1	87,0	53,0	15	1,594	0,078	16,1	12,2	24,9	-0,16
2	87,0	35,0	15	1,316	0,064	7,8	10,1	24,9	0,08
3	77,0	53,0	15	0,384	0,011	16,1	2,9	44,0	-0,29
4	77,0	35,0	15	0,312	0,008	8,2	2,4	14,9	-0,13
5	87,0	44,0	25	1,635	0,134	7,2	12,5	74,6	0,33
6	87,0	44,0	5	1,264	0,021	35,9	9,7	26,4	0,41
7	77,0	44,0	25	0,364	0,016	7,2	2,8	132,0	0,15
8	77,0	44,0	5	0,256	0,003	35,9	2,0	20,7	-0,25
9	82,0	53,0	25	1,536	0,091	9,7	11,8	103,3	0,11
10	82,0	53,0	5	0,964	0,011	18,4	7,4	20,7	-0,39
11	82,0	35,0	25	1,234	0,043	4,7	9,5	103,3	0,23
12	82,0	35,0	5	0,631	0,007	23,5	4,8	34,4	-0,18
13	82,0	44,0	15	0,734	0,026	12,0	5,6	14,9	-0,17
14	87,0	53,0	25	1,710	0,140	9,7	13,2	132,0	0,23
15	77,0	35,0	5	0,217	0,002	23,5	1,7	14,9	-0,16

Примітка:

W - вологість органічної маси, %;

Т - температура зброджування, °С;

t - експозиція зброджування, діб;

δ*ф*- фактичний вихід біогазу за добу, куб.м/доб;

V - виділення біогазу за добу з 1 кг абсолютно сухої органічної речовини, куб.м/ кгасордоб

Е*з а т* - енергетичні затрати на технологічний процес на 1 м3 біореактора, *Мдж /м3хдоб*;

Е*ф* - фактична енергія біореактора з 1 м3 біореактора, *Мдж /м3хдоб*;

Е*Т* - енергетичний потенціал біореактора, *Мдж /м3хдоб;*

k*ефек*- коефіцієнт енергетичної ефективності біореактора.

Для знаходження коефіцієнтів b_i було проведено відповідну кількість дослідів, котрі дозволили встановити значення функції відгуку *V* при різних співвідношеннях факторів (вологість, температура та експозиція зброджування). Для розрахунку коефіцієнтів регресії було використано метод найменших квадратів (МНК). Метод полягає в тому, що при розрахунку коефіцієнтів регресії мінімізується сума квадратів відхилень експериментальних точок від теоретичної кривої. Умова МНК записується наступним чином

$$U = \sum_{i=1}^{N} \xi_i^2 = min. \qquad (2.2)$$

Основною перевагою МНК є те, що він робить визначеною будь-яку довільну систему рівнянь, тобто число рівнянь виявляється рівним числу коефіцієнтів, що і необхідно для однозначного їх визначення.

Для довільного числа факторів коефіцієнти регресії розраховуються наступним чином

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} y_i , \qquad (2.3)$$

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} y_i X_{ji} , \qquad (2.4)$$

$$b_{uj} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} y_i X_{ui} X_{ji}\,, \qquad (2.5)$$

де N – загальне число дослідів;

y_i – параметр відгуку в i-тій точці;

X – кодоване значення фактора;

$j=u=0,1,2,\ldots k$ – номер фактора.

Мінімальна похибка апроксимації при обмеженій кількості дослідів досягалась за допомогою конкретизації значень факторів. Для визначення дисперсії повторюваності дослідів використовуються додаткові досліди, проведені декілька разів в однакових умовах в центрі плану, тобто при максимальному значенні рівнів факторів.

Було розроблено програму в середовищі Excel 2010, що дозволило провести математичну обробку отриманих результатів при різних співвідношеннях варіювальних факторів. За допомогою розробленої програми та методу найменших квадратів (з використанням системи MathCad 14) визначались значення коефіцієнтів регресії в рівнянні 4.7.

$$V = 94{,}2 - 2{,}24W - 0{,}64T - 0{,}44\tau + 0{,}014W^2 + 0{,}0047T^2 + 0{,}0042\tau^2$$
$$+0{,}0032WT + 0{,}0045W\tau - 0{,}0002T\tau \qquad (2.6)$$

де: V- питомий вихід біогазу, л/кг сухої маси за добу; W - вологість біомаси, %; Т - температура зброджування, °С; т - експозиція зброджування, діб.

Коефіцієнти регресійного рівняння вказують на силу впливу факторів. Чим більше значення величини коефіцієнта, тим більший вплив виявляє той чи інший фактор на функцію відгуку. Якщо коефіцієнт має знак « + », то при збільшенні значення фактора параметр оптимізації збільшується, якщо « - », то зменшується. Величина коефіцієнта відповідає вкладу даного фактора у

величину параметра оптимізації при переході фактора з нульового рівня на верхній чи нижній.

Щодо висновку про лінійність чи нелінійність математичної моделі, треба заначити, що модель вважається лінійною, якщо хоча б один із коефіцієнтів регресійного рівняння рівний нулю. Якщо всі вищеназвані коефіцієнти не дорівнюють нулю, то така модель вважається нелінійною. Результати розрахунків коефіцієнтів регресії та висновок про вид розробленої математичної моделі представлені в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Результати розрахунків коефіцієнтів регресії та висновок про нелінійність отриманої моделі

Коефіцієнти регресії для рівняння									
b0	b1	b2	b3	b11	b22	b33	b12	b13	b23
94,2	-2,24	-0,64	-0,44	+0,014	+0,004	+0,0042	+0,0032	+0,0045	-0,0002
Оцінка значимості коефіцієнтів регресії ("1" -- значимий, "0" -- незначимий)									
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Лінійність моделі:						Нелінійна			

Аналізуючи абсолютні величини коефіцієнтів регресії відповідних факторів, можна сказати, що ефект такого фактора, як вологість сировини *(b0)* на порядок вищий, ніж ефект інших двох факторів – температури та експозиції *(b1, b2)*. Аналогічно можна зробити висновки і про взаємодію факторів та їх квадратичне значення.

Складання рівнянь регресії проводилось для цільової функції (об’ємний вихід біогазу) з моделюванням процесу ферментації в біореакторі при використанні в ньому різних значень вологості, температури та експозиції зброджування сировини. Таким чином було складено регресійне рівняння, котре дозволило побудувати 3D-графіки залежності функції відгуку від вхідних параметрів та визначити оптимальні співвідношення останніх з точки зору максимального виходу біогазу (рис. 2.8-2.10).

Оскільки будь-який експеримент містить елемент невизначеності, пов‘язаний з наявністю похибок досліду, необхідно провести оцінку цих похибок. Для цього проводяться паралельні досліди в кожній точці факторного простору, а потім розраховується дисперсія повторюваності дослідів, яка дає оцінку варіації значень повторних дослідів. В роботі приймаємо, що дисперсія повторюваності однорідна у всіх точках факторного простору.

Таким чином, для перевірки дисперсії повторюваності дослідів достатньо зробити декілька повторних дослідів в точці, що відповідає максимальному значенні факторів. Саме таким способом ми і скористаємось для нашого випадку.

Дисперсію повторюваності можна розрахувати за формулою

$$S_0^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{q=1}^{n}\left(y_q - \bar{y}\right)^2, \qquad (2.7)$$

де n – кількість повторюваних дослідів;

y_q – параметр відгуку;

$\bar{y}$ - середнє арифметичне відхилення параметру відгуку,

$$\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{q=1}^{n} y_q, \qquad (2.8)$$

де q=1,2,…n – номер паралельного досліду.

Коли дисперсія повторюваності дослідів визначена, переходимо до перевірки значимості коефіцієнтів регресії. Перевірку значимості проводимо визначивши довірчий інтервал коефіцієнтів. Для всіх коефіцієнтів регресії довірчі інтервали рівні між собою, і визначаються за формулою:

$$\Delta b_j = \pm t\sqrt{\frac{S_0^2}{N}}, \qquad (2.9)$$

де t – табличне значення критерію Стьюдента при заданому рівні значимості α та відповідному числі ступіней вільності.

На практиці найчастіше рівень значимості приймається α=5%.

Число ступенів вільності для дисперсії повторюваності – число повторних дослідів мінус один, де одиниця – це число ступенів вільності використаних при розрахунку середнього арифметичного для параметру відгуку. Число ступенів вільності можна розрахувати за формулою

$$f_1 = n - 1, \tag{2.10}$$

де n – число повторних дослідів.

Коефіцієнт регресії значимий, якщо його абсолютна величина більша, ніж довірчий інтервал.

Останнім кроком математичної обробки результатів експерименту є перевірка адекватності математичної моделі. Перевірка гіпотези про адекватність моделі проводиться за *F*- критерієм Фішера, і визначається наступною формулою

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_0^2}, \tag{2.11}$$

де S_{ad}^2 - остаточна дисперсія або дисперсія адекватності,

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N} (y_i - \bar{y})^2}{f_2}, \tag{2.12}$$

де f_2 – число ступенів вільності для дисперсії адекватності, рівне числу різних дослідів, результати яких використовуються при розрахунку коефіцієнтів регресії, мінус число коефіцієнтів, що визначаються;

$$f_2 = N - (k + 1), \tag{2.13}$$

де N – загальне число дослідів;

k – число факторів експерименту.

Рівень значимості, як і в попередньому випадку, приймаємо α=5%.

Модель вважається адекватною, якщо розрахункове значення *F*-критерію не перевищує табличного значення. Таблиця для визначення значення *F*- критерію наведена в [14].

При цьому відносне значення середньо-квадратичного відхилення окремо взятого розрахунку не перевищує відносної похибки 5%. Відхилення

розрахункових та експериментальних даних не перевищують максимально допустимих відхилень.

В таблиці 2.10 наведені результати перевірки адекватності математичної моделі, яка показує залежність виходу біогазу від вологості, температури та експозиції зброджування. В результаті проведення розрахунків теоретичне значення *F*-критерію є меншим за табличне. Тому, адекватність розробленої моделі, яка описує процес виробництва біогазу в залежності від фізичних властивостей сировини, підтверджується.

Таблиця 2.10 – Результати математичної обробки рівняння регресії та перевірка адекватності моделі.

Дисперсія відтворюваності експерименту:	0,000816204
Табличний критерій Ст'юдента при p=0,95:	3,182446305)
Довірчий інтервал коефіцієнтів регресії:	0,03214515
Число степенів вільності__2:	8
Дисперсія адекватності:	0,005759623
Розрахунковий критерій Фішера при p=0,95:	3,056597372
Табличний критерій Фішера при p=0,95:	8,84523846
Адекватність моделі:	Адекватна

Таким чином, показано, що отримане рівняння регресії адекватне та може бути використане для прогнозованого виходу біогазу.

Аналізуючи значимість коефіцієнтів регресії та поверхню відгуку (рис. 2.8-2.10), можна сказати, що при збільшенні двох варіюючих факторів в досліді параметр оптимізації, а саме об'єм отриманого біогазу, збільшується і навпаки. Ці розрахунки підтверджуються експериментальними дослідженнями. З графічної інтерпретації рівняння видно, що питомий вихід біогазу однозначно збільшується із збільшенням вологості гною, його температури і експозиції зброджування. Так, за експозиції ферментації гною 15 діб та вологості зброджуваної маси гною ВРХ W=77% і температури зброджування Т=35 °С питомий вихід біогазу не перевищував 1 л/кг сухої маси за добу, а за вологості зброджуваної маси W=87% та температури зброджування Т=53 ºС питомий вихід біогазу знаходився в межах 4-5 л/кг сухої маси за добу (рис.4.3).

За температури зброджування *T=44 °C* та експозиції ферментації гною до 25 діб, за вологості зброджуваної маси гною ВРХ W=77% питомий вихід біогазу не перевищує 1 л/кг сухої маси за добу. За цієї ж температури зброджування вихід біогазу в межах 4-5 л/кг сухої маси за добу спостерігали за вологості гною *W=87%* та експозиції зброджування 20-25 діб (рис. 2.9).

За вологості гною W=82% збільшення виходу біогазу спостерігали лише через 15 днів зброджування. При цьому виявлено неоднозначний вплив температури на питомий вихід біогазу. Найнижчий вихід біогазу спостерігали за температури зброджування в межах від 37 до 39 °C (рис. 2.10).

Результати, представлені у вигляді графічних 3D-моделей, дають можливість наглядно побачити залежність того чи ішого параметру. В даному разі це параметр ефективності виходу біогазу.

У питанні розвитку технологій твердофазного зброджування необхідно приділяти увагу удосконаленню мікробіологічних процесів ферментації біомаси та пошуку ефективних конструкційно-технологічних рішень ферментерів, особливо це стосується технологічних операцій завантаження біомаси, її безперервного перемішування і дотримання стабільного температурного режиму роботи ферментера.

Таким чином, низька ефективність процесу виділення метану під час твердофазного бродіння в існуючих біореакторах обумовлена в першу чергу відсутністю засобів для проведення належної гомогенізації реагуючої біомаси.

За твердофазного зброджування, в залежності від фізичного стану сировини, а також потреб замовника, варіанти виконання біогазових установок можуть відрізнятися як технологіями переробки, так і устаткуванням. Кожен проект біогазової установки індивідуальний, але створений із застосуванням типових рішень, адаптованих до навколишніх умов.

Поширеним методом виробництва біогазу є анаеробне зброджування рідкої біомаси (вологість = 90-95%) метаногенеруючими мікроорганізмами. Застосування рідкофазних технологічних процесів є більш поширеним у практиці використання біогазових установок. Цей процес полягає у

безперервному введенні невеликими порціями вхідної сировини в метантенк, який являє собою місткість-змішувач без доступу повітря, де підтримується задана вологість і температура. Такі реактори виготовляють із залізобетону або сталі. Вони мають антикорозійне покриття. Спеціальні мішалки забезпечують перемішування сировини з основною реагуючою біомасою. Це сприяє певній однорідності ферментаційної суміші, частково стримуючи утворення поверхневої кірки. Виділений в процесі ферментації біогаз накопичується під куполом, потім проходить через систему очищення і подається до споживачів (в котел або когенераційну установку).

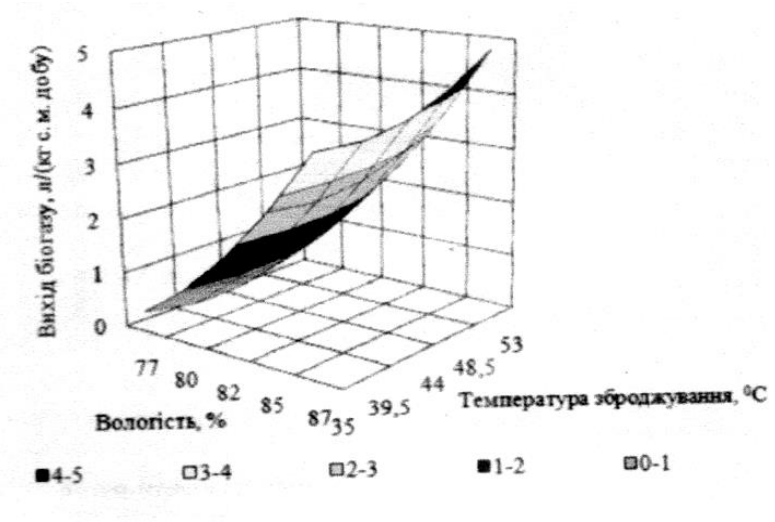

Рисунок 2.8 – Залежність виходу біогазу від температури збродження і вологості біомаси

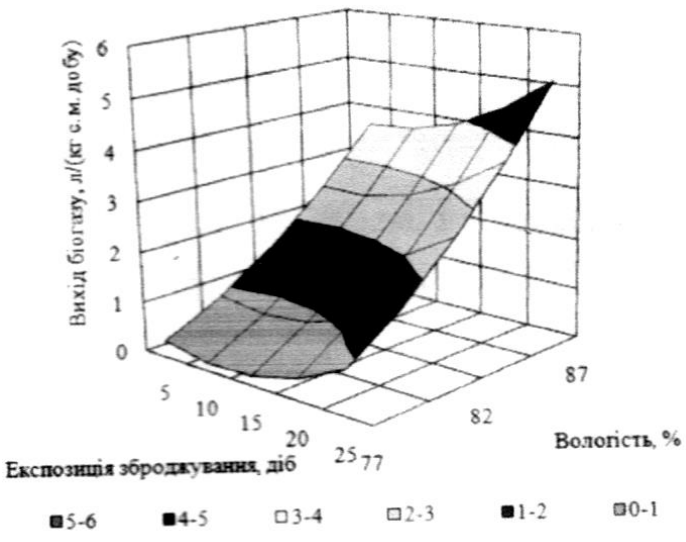

Рисунок 2.9. Залежність виходу біогазу від вологості біомаси та експозиції зброджування

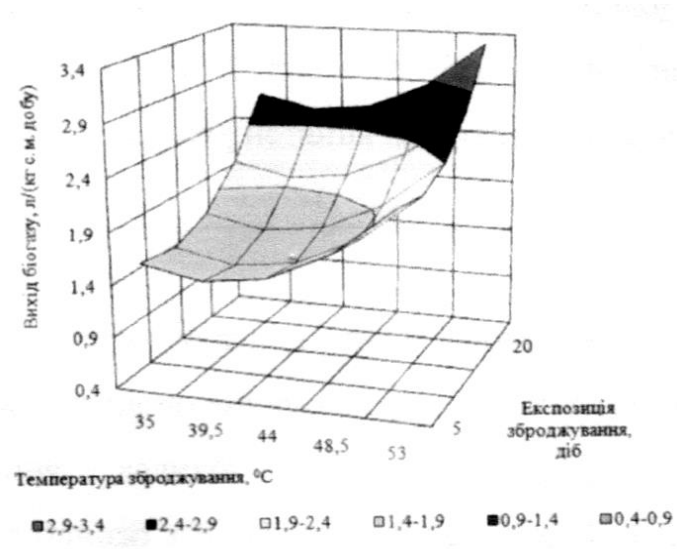

Рисунок 2.10 – Залежність виходу біогазу від температури та експозиції зброджування

Біогазові установки з анаеробними реакторами такої конструкції є дієвим елементом сучасного безвідходного виробництва в багатьох галузях сільського господарства та харчової промисловості. Якщо на підприємстві є відходи сільського господарства або харчової промисловості, з'являється реальна

можливість за допомогою біогазових установок не лише значно скоротити витрати на енергію, але й підвищити ефективність підприємства, отримати додатковий прибуток.

У конструкціях біогазових установок закладено принцип модульності, що дозволяє за необхідності нарощувати їх продуктивність.

Досвід експлуатації таких рідкофазних реакторів виявляє складності, обумовлені недосконалістю процесу, який виконується із застосуванням механічних гвинтових мішалок, можливості яких перемішувати субстрат в конкретний період часу в конкретному об'ємі, не проводячи перемішування шарів субстрату у вертикальній площині, не задовольняє вимоги технологічного процесу гомогенізації та потреби підведення поживних речовин до колоній метаноутворюючих мікроорганізмів по всьому об'єму біореактора. Крім того, в таких реакторах не усувається явище розшарування біомаси з утворенням непродуктивних баластних шарів різної питомої ваги.

У результаті накопичення мінеральної складової біомаси в нижній частині реактора в процесі експлуатації БГУ продуктивність реакторів падає і через два-три роки становить лише 50% від проектної, значно погіршуються експлуатаційні та економічні показники виробництва біогазу. Звільнення від баластних шарів є трудомісткою операцією, яку доводиться виконувати у шкідливих умовах.

Щоб вирішити технологічну проблему стосовно накопичення мінеральної складової біомаси в нижній частині реактора, необхідно удосконалити конструкцію реакторів. Для цього необхідно розробити технічні рішення, щоб усунути розшарування біомаси, зменшити енерговитрати на процес перемішування, створити технологічні і технічні рішення утилізації теплової енергії для можливостей використання термофільного режиму, забезпечити використання інокуляції та мобілізації.

3. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ПАЛИВОПОДАЧІ ГАЗОДИЗЕЛЯ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ СТЕНДОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Програма і об’єкт експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження включали:

- Стендові моторні дослідження проводились на дизелі CY4102BZQ із розробленою системою живлення у газодизельному режимі.

Під час експерименту визначались навантажувальні характеристики та характеристика холостого ходу дизеля CY4102BZQ при роботі за газодизельним циклом. При цьому визначались: ефективний крутний момент, частота обертання колінчастого вала двигуна, витрати дизельного палива, стисненого природного газу, положення рейки паливоподачі, кут повороту дросельної заслінки та кут повороту важіля паливоподачі ПНВТ.

Стендові дослідження проводились в лабораторії дослідження №2 Черкаського державного технологічного університету, на кафедрі "автомобілів та технології їх експлуатації".

Стенд складається з навантажувальної частини та вимірювального блоку. Підготовка стенда тягових властивостей мод. КИ – 5542 здійснювалась згідно з інструкцією з експлуатації.

Вимірювання положення рейки ПНВТ здійснювалося за допомогою повзункового реостата, закріпленого пластиною двома гвинтами на корпусі ПНВТ. Рухомий стержень реостата був жорстко з’єднаний з рейкою насоса. Фіксація положення рейки здійснювалася за допомогою омметра моделі DT-830B. Конкретному положенню рейки, відповідає конкретне значення опору реостата. На основі отриманих закономірностей положення рейки від опору, отримано тарувальний графік.

Для вимірювання кута повороту важеля управління паливоподачею використовувалася проградуйована шкала з кутом повороту регулюючого органу від 0 до 100°.

Об’єктом моторних стендових досліджень був дизель CY4102BZQ (рис. 3.1).

На дизелі був встановлений серійний паливний насос ZEXEL105118-7541 з відцентровим механічним всережимним регулятором. До початку досліджень дизель відпрацював не менше 110 годин. Експерименти на дизелі проводились з використанням повітряного фільтра та водяного радіатора системи охолодження. Відведення ВГ за межі приміщення здійснювалося через випускну трубу внутрішнім діаметром 50 мм і довжиною близько 6 м.

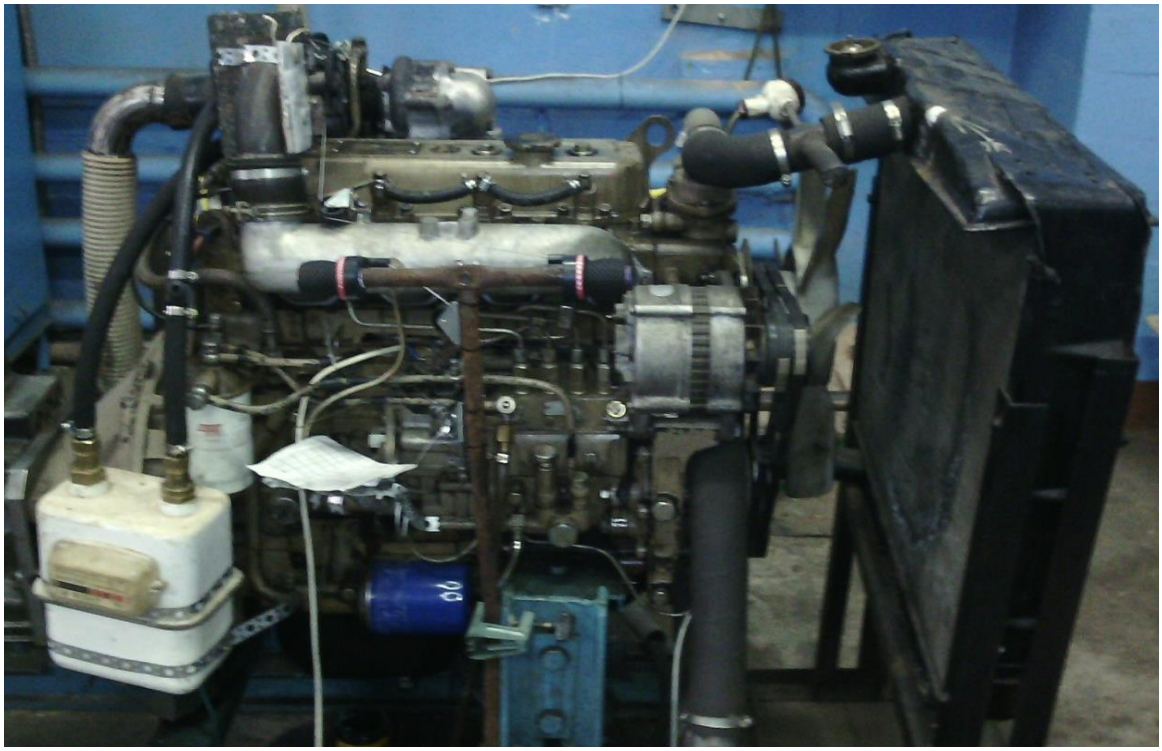

Рисунок 3.1 – Дизель CY4102BZQ, що досліджувався

Випробування проводилися на стандартному дизельному паливі марки SAE J967d, на моторному мастилі Castrol Magnatec Diesel SAE 10W40 B3.

3.2 Обладнання та вимірювальна апаратура для експериментальних досліджень

Моторні дослідження проводились на електричному гальмівному стенді КИ – 5542 ГОСНИТИ. Основою стенда є балансирна електромашина 4АНК2Б225516У3 потужністю 37 кВт при частоті обертання ротора 980 $хв^{-1}$ і максимальною гальмівною потужністю 100 кВт при частоті обертання ротора 2000 $хв^{-1}$ та динамометр з шкалою 0 – 60 кгс з ціною поділки 0,25 кгс, який був відтарований згідно інструкції з експлуатації на стенд КИ – 5542 ГОСНИТИ. Гальмівна установка з вимірювальними приладами, забезпечує точність вимірювання в відповідності до [43].

Управління стендом здійснювалося з пульта управління, на якому встановлені вимірювальні прилади. Після переходу з одного випробувального режиму до наступного, витримка часу становила не менше 30 с, перед фіксуванням показів приладів.

Частота обертання колінчастого вала дизеля вимірювалась за допомогою тахометра що встановлено на стенді Ки - 5542 та прилад типу ИМД-ЦМ (рис. 3.2) він призначений для контролю динамічного навантаження та випробування двигунів, для вимірювання частоти обертання колінчастого вала n, ефективної потужності N_e, крутного моменту $M_{кр}$, умовної потужності механічних втрат, умовного механічного ККД.

На зубчастий вінець маховика дизеля встановлено індуктивний первинний перетворювач КИ-13941, який слугує для перетворення частоти обертання колінчастого вала у пропорційну їй напругу і, через який прилад ИМД-ЦМ отримує необхідну інформацію від двигуна. Прилад дозволяє зняти швидкісну динамічну характеристику та по ній визначити частоту обертання колінчастого вала.

Рисунок 3.2. Дизельний тахометр ИМД ЦМ.

Витрата дизельного палива визначалась обємним методом (рис. 3.3). Ціна поділу шкали посудини – 20мл.

Похибка системи вимірювання витрат палива на номінальному режимі роботи дизеля складає ±0,1 кг/год. Згідно ГОСТ 18509-88 допустима похибка вимірювань ±0,24 кг/год. (рис 3.3).

Рисунок 3.3 – Пристрій для вимірювання витрат палива

Рисунок 3.4 – Загальний вигляд гальмівної установки з дизелем CY4102BZQ

Рисунок 3.5 – Пульт управління гальмівною установкою.

Час витрати палива вимірювався секундоміром мобільного телефону моделі Самсунг Гелексі.

Атмосферний тиск вимірювався барометром – анероїдом БАММ – 1 № 2073 з шкалою від 80000 до 106000 Па і ціною поділки 100 Па.

Витрата стисненого природного газу здійснювалась з допомогою газового лічильника "Візар" моделі 199ж (рис. 3.6).

Рисунок 3.6 - Газовий лічильник "Візар" моделі 199ж

Положення дросельної заслінки для подачі біогазу визначалось за допомогою проградуйованої шкали від 0 до 100%, яка встановлена безпосередньо на дросельну заслінку (рис 3.7).

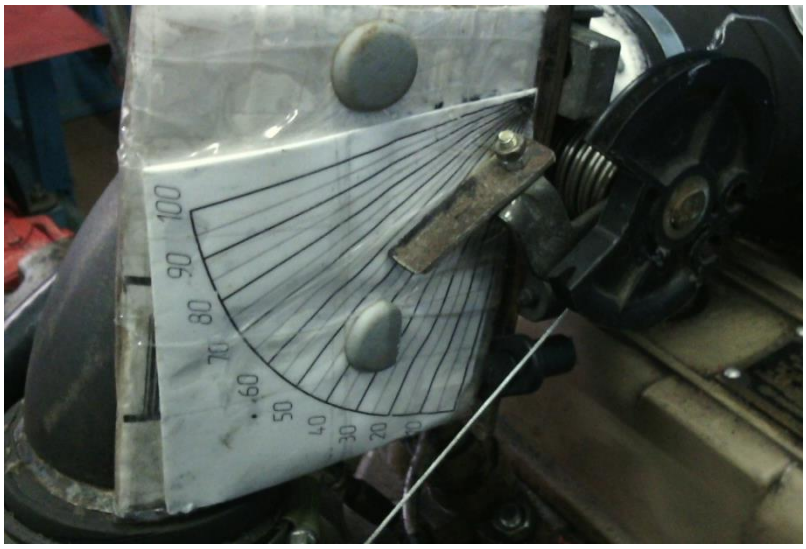

Рисунок 3.7 - Шкала положення дросельної заслінки в градусах, від 0 до 100

Положення кута повороту важеля паливоподачі визначалось за допомогою проградуйованої шкали від 0 до 100% (рис. 3.8)

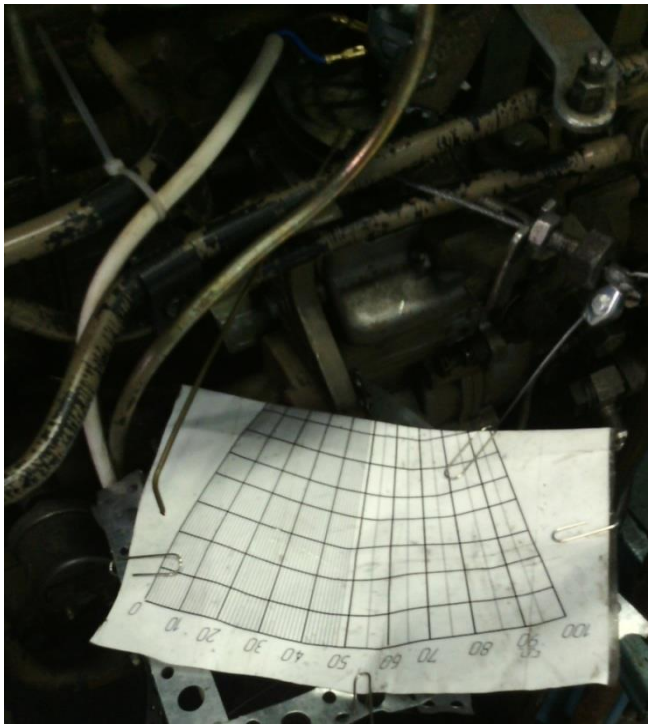

Рисунок 3.8 - Шкала положення кута поворота важіля паливоподачі ПНВТ

Управління важілями подачі газу та дизельного палива здійснювалося в ручному режимі (рис. 3.9).

Рисунок 3.9 - Управління важілями паливоподачі в газодизельному режимі

Таблиця 3.1 - Значення опору реостата в залежності від положення рейки ПНВТ

мм.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ом	10,25	10,51	10,77	11,03	11,29	11,55	11,81	12,07	12,33	12,59
мм.	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Ом	12,85	13,11	13,37	13,63	13,89	14,15	14,41	14,61	14,93	15,2

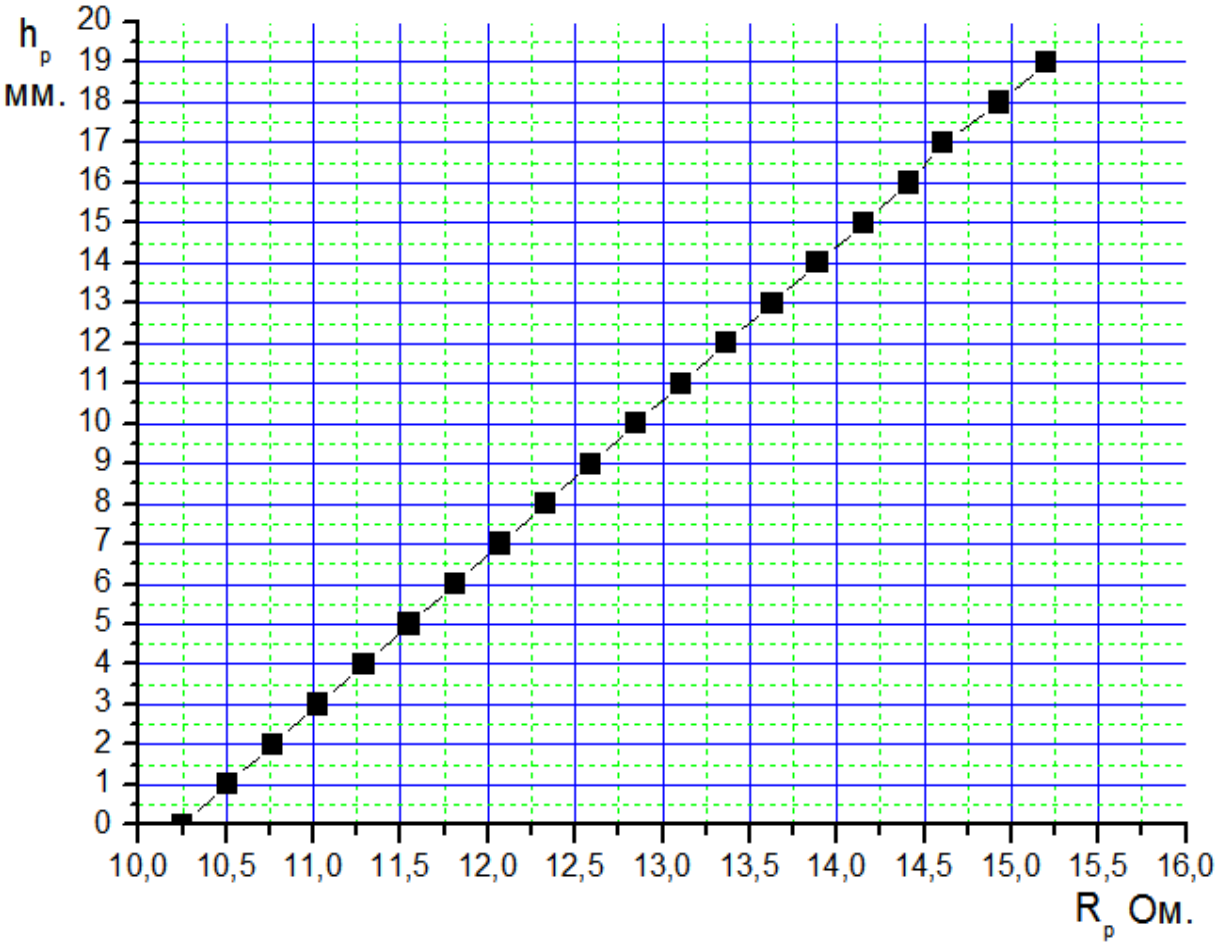

Рисунок 3.10 - Залежність електричного опору від положення рейки ПНВТ

де h_p - переміщення рейки ПНВТ;

R_p - опір реостата.

У табл. 3.2 приведені дані про вимірювальну апаратуру і прилади, що використовувались при експериментальних дослідженнях.

Оцінка похибок вимірювань при експериментальних дослідженнях здійснювалася виходячи з методу вимірювання.

При прямих і опосередкованих одноразових вимірюваннях помилки вимірювань визначаються помилками використовуваних приладів.

Дані табл. 3.2 дозволяють зробити висновки, що вони відповідають вимогам, які пред'являються до вимірювальної апаратури.

При проведенні експериментальних досліджень виконувалися прямі і опосередковані багатократні вимірювання.

В результаті математичної обробки цих вимірювань визначались: середнє арифметичне значення вимірюваної величини, середнє квадратичне відхилення і похибка середнього арифметичного. Виходячи з допустимої похибки середнього арифметичного, визначалась кількість дослідів.

Таблиця 3.2 - Похибки вимірювань приладів і обладнання

Параметр вимірювання, позначення	Розмірність	Засоби вимірювання	Точність	Точність за ГОСТ 18509 – 88
Крутний момент, $M_{кр}$	Н·м	Стенд КИ 5542	± 1	±1,7
Частота обертання колінчастого вала, n	хв$^{-1}$	Прилад ИМД-ЦМ	±0,4%	±14,0
Годинна витрата палива, $G_{год}$	кг/год	Об'ємний метод	± 0,1%	±0,1
Температура навколишнього середовища, t_c	° С	Спиртовий термометр ТБ-3-М1	± 0,5	± 1,0
Температура охолоджувальної рідини, t_{ox}	° С	Датчик	±0,1	±3,0
Атмосферний тиск, p_a	кПа	барометр	±0,1	±0,1
Час, t	с	Секундомір телефону Самсунг гелексі	±0,01	-

3.3 Розробка системи живлення дизеля для його роботи на біогазі

Дана система живлення двигуна забезпечує можливість його роботи як за дизельним так і за газодизельним циклами. Біогаз міститься у сталевих балонах. Контроль запасу газу здійснюється за показаннями манометра високого тиску ДУ 50. Заправка балонів біогазом здійснюється через заправочний пристрій. При відкритті витратного вентиля газ з балонів по стальному паливопроводі надходить до редуктора високого тиску [44].

При переході роботи двигуна за газодизельним циклом: відкривається електромагнітний клапан газової паливної магістралі для подачі біогазу до редуктора, де тиск газу понижується до робочого тиску 0,2 МПа та поступає до газового змішувача.

Дозована подача біогазу через змішувач надходить до впускного колектора після чого надходить і в циліндри двигуна. У кінці такту стискання у циліндр двигуна впорскується запальна доза дизельного палива, яка займається і підпалює газоповітряний заряд.

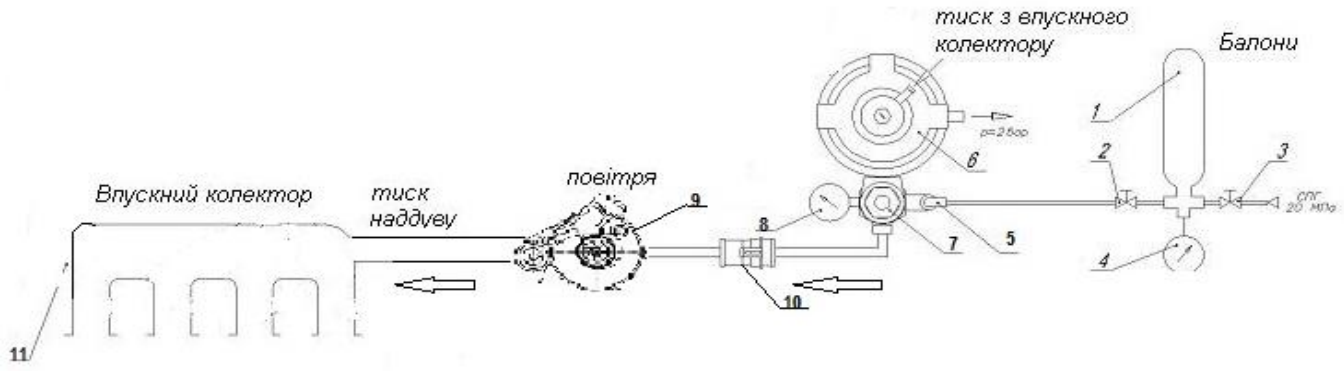

Рисунок 3.11 - Принципова схема подачі газу газодизельної системи живлення

1– балони для біогазу; 2 – витратний вентиль; 3 – наповню вальний вентиль; 4 – манометр високого тиску; 5 – штуцер підводу газа до редуктору; 6 – газовий редуктор; 7 – електромагнітний клапан; 8 – манометр редуктора; 9 - турбіна; 10 - кількісний регулятор подачі газу; 11 – впускний колектор двигуна.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА МАТЕМАТИЧНА ЇХ ОБРОБКА

4.1 Результати стендових випробувань

Для оцінки паливної економічності дизеля CY4102BZQ на усталених режимах, під час стендових досліджень, було визначено серію навантажувальних характеристик. Навантажувальні характеристики визначались для таких частот обертання колінчастого вала двигуна: n = 1850 хв$^{-1}$, n = 1675 хв$^{-1}$, n = 1500 хв$^{-1}$, n = 1325 хв$^{-1}$, n = 1150 хв$^{-1}$, які відповідають найбільш характерним режимам роботи двигуна при русі автобуса. Отримані в результаті експерименту максимальна потужність N_e та максимальний крутний момент $M_к$ відповідають значенням для дизеля CY4102BZQ.

В таблиці 4.1 наведено результати вимірювань витрати дизельного палива, дизеля CY4102BZQ в дизельному циклі.

Таблиця 4.1 - Робоча таблиця для $G_{дп}$, л/год при роботі за дизельним циклом.

№	X1	X2	$n_д$, хв$^{-1}$	$M_к$, Нм	$G_{дп}$, л/год
1	1,0	1,0	1675	227	9.587
2	1,0	-1,0	1675	82	5.573
3	-1,0	1,0	1375	227	8.117
4	-1,0	-1,0	1375	82	4.077
5	0,0	0,0	1500	155	7.991
6	2,0	0,0	1850	155	10.727
7	-2,0	0,0	1150	155	6.897
8	0,0	2,0	1500	300	13.702
9	0,0	-2,0	1500	10	2.003
10	2,0	2,0	1850	300	18.195
11	2,0	-2,0	1850	10	4.439
12	-2,0	2,0	1150	300	10.028

13	-2,0	-2,0	1150	10	1.664

В таблиці 4.2 наведено результати вимірювань витрати дизельного палива, дизеля CY4102BZQ в газодизельному циклі.

Таблиця 4.2 - Робоча таблиця для $G_{дп}$, л/год при роботі за газодизельним циклом.

№	X1	X2	$n_д$, хв$^{-1}$	$M_к$,Нм	$G_{дп}$, л/год
1	1,0	1,0	1675	227	0.939
2	1,0	-1,0	1675	82	0.319
3	-1,0	1,0	1375	227	0.251
4	-1,0	-1,0	1375	82	1.06
5	0,0	0,0	1500	155	0.654
6	2,0	0,0	1850	155	0.947
7	-2,0	0,0	1150	155	0.716
8	0,0	2,0	1500	300	2.552
9	0,0	-2,0	1500	10	0.153
10	2,0	2,0	1850	300	2.250
11	2,0	-2,0	1850	10	0.205
12	-2,0	2,0	1150	300	2.617
13	-2,0	-2,0	1150	10	0.069

В таблиці 4.3 наведено результати вимірювань витрати газу дизеля CY4102BZQ в газодизельному циклі.

Під час стендових досліджень також визначались характеристики активного ХХ (Додаток А).

Таблиця 4.3 - Робоча таблиця для $G_{газ}$, кг/год при роботі за газодизельним циклом

№	X1	X2	$n_д$, хв$^{-1}$	$M_к$, Нм	$G_{газ}$, кг/год
1	1,0	1,0	1675	227	8.15
2	1,0	-1,0	1675	82	7.01
3	-1,0	1,0	1375	227	5.78
4	-1,0	-1,0	1375	82	5.56
5	0,0	0,0	1500	155	7.33
6	2,0	0,0	1850	155	8.4
7	-2,0	0,0	1150	155	4.68
8	0,0	2,0	1500	300	9.46
9	0,0	-2,0	1500	10	6.14
10	2,0	2,0	1850	300	8.89
11	2,0	-2,0	1850	10	7.42
12	-2,0	2,0	1150	300	5.18
13	-2,0	-2,0	1150	10	4.11

На рис. 4.1 - 4.5 показано $G_{пал}$, $G_{газ}$ отримані в залежності від частоти обертання $n_д$ колінчастого вала та крутного моменту газодизеля, кута положення дросельної заслінки, кута повороту важеля ПНВТ та переміщення рейки ПНВТ.

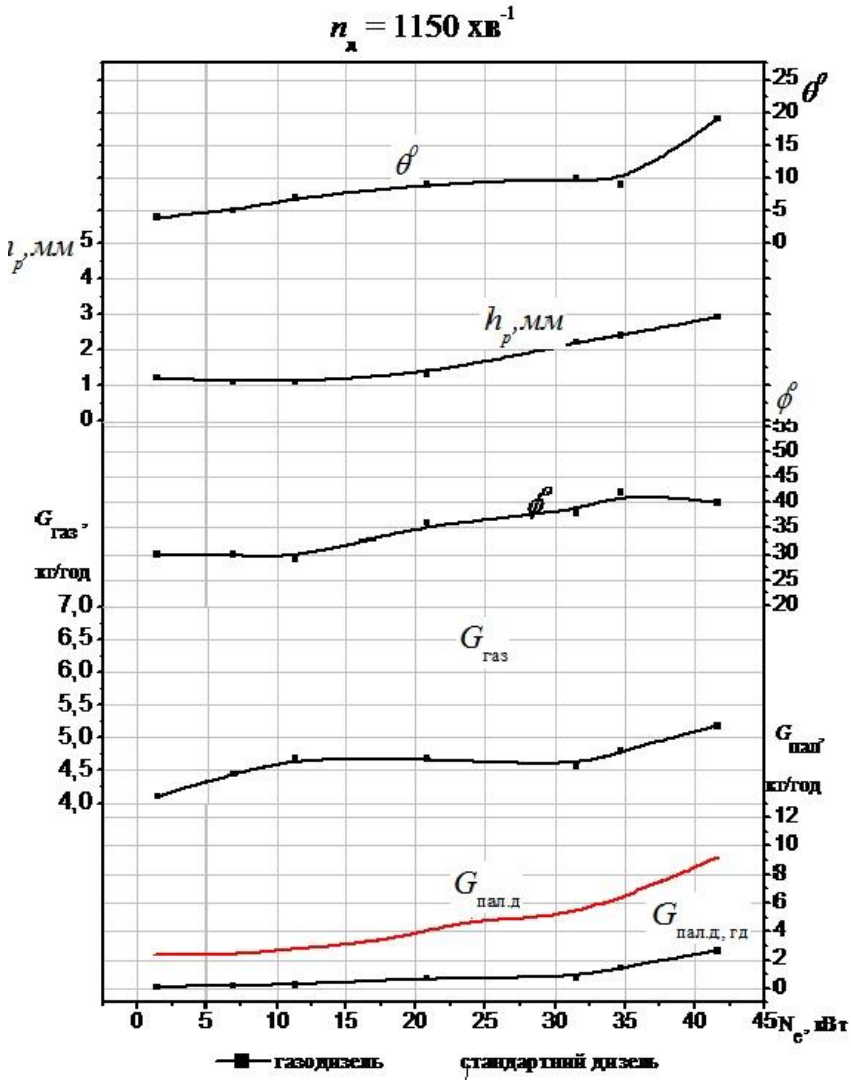

Рисунок 4.1 – Навантажувальна характеристика дизеля CY4102BZQ за дизельним та газодизельним циклами, отримана експериментально при $n_д$=1150 хв$^{-1}$

де θ^0 - кут повороту важіля паливоподачі ПНВТ;

ϕ^0 - кут відкриття дросельної заслінки;

h_p - переміщення рейки ПНВТ, мм.;

$G_{газ}$ - витрати газу, кг/год.;

$G_{дп}$ - витрати дизельного пального за дизельним циклом, кг/год;

$G_{дпгд}$ - витрати дизельного пального за газодизельним циклом, кг/год;

Ne - потужність, кВт/год.

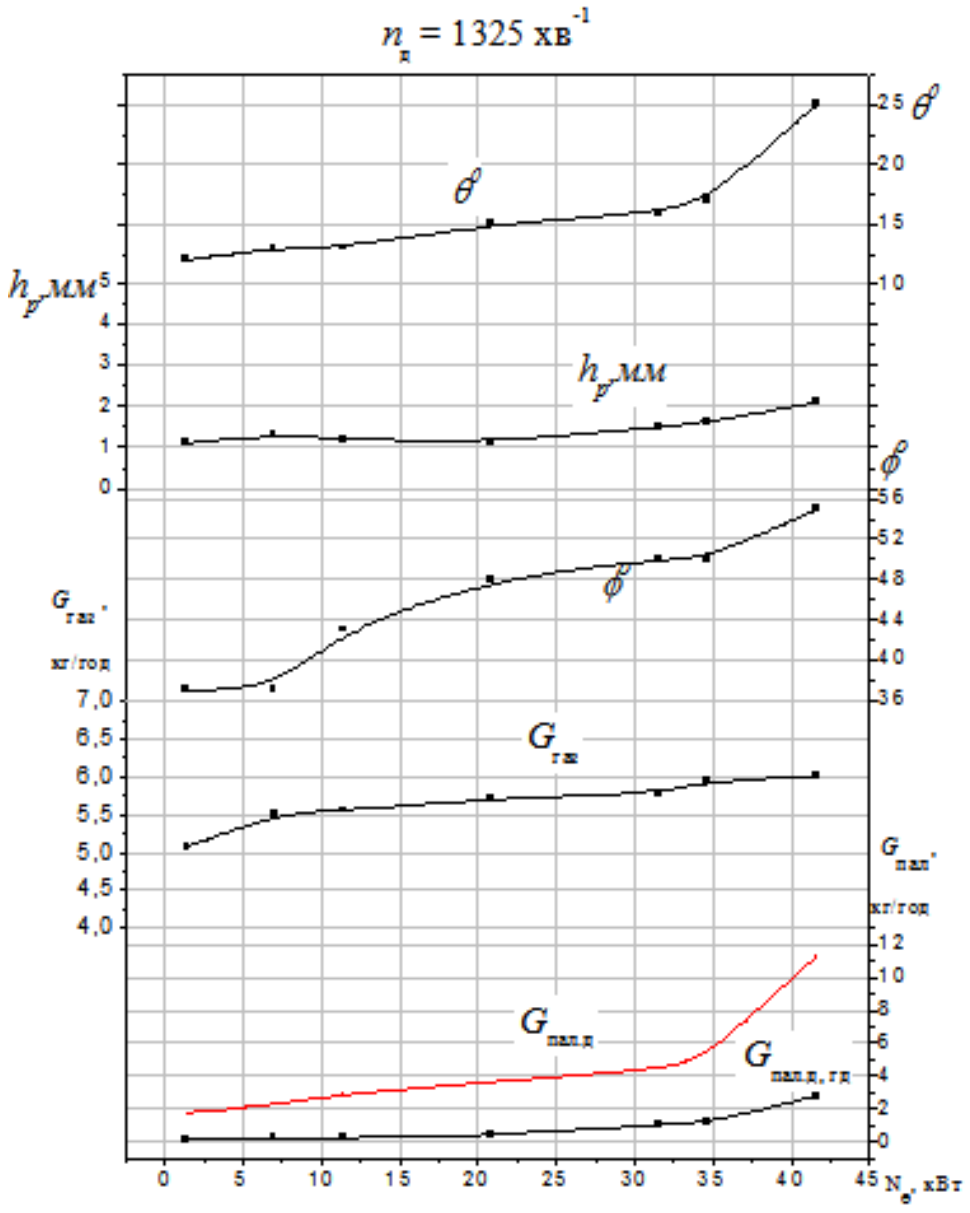

Рисунок 4.2 – Навантажувальна характеристика дизеля CY4102BZQ за дизельним та газодизельним циклами, отримана експериментально при $n_д$=1325 хв$^{-1}$

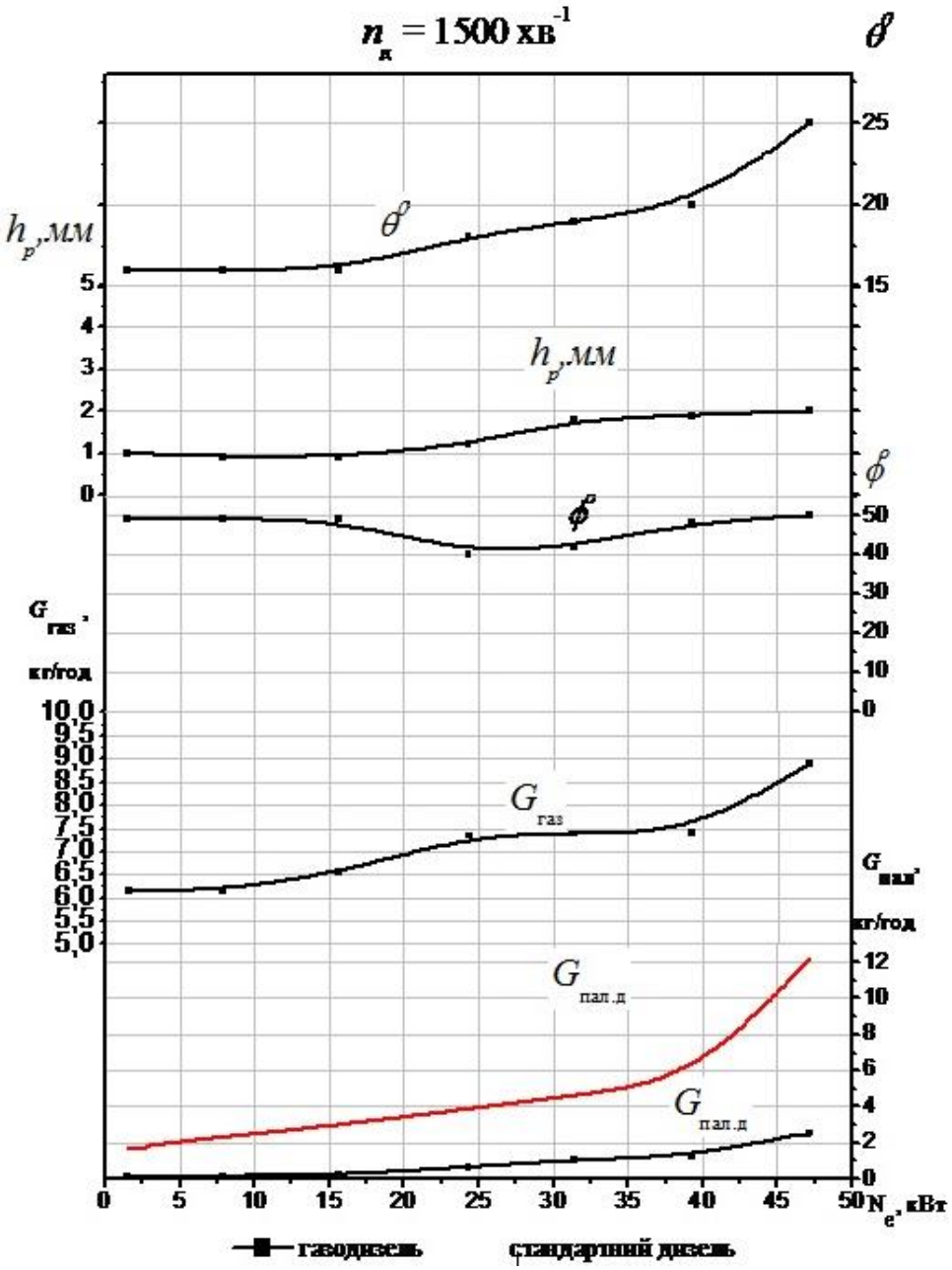

Рисунок 4.3 – Навантажувальна характеристика дизеля CY4102BZQ за дизельним та газодизельним циклами, отримана експериментально при $n_д$=1500 хв$^{-1}$

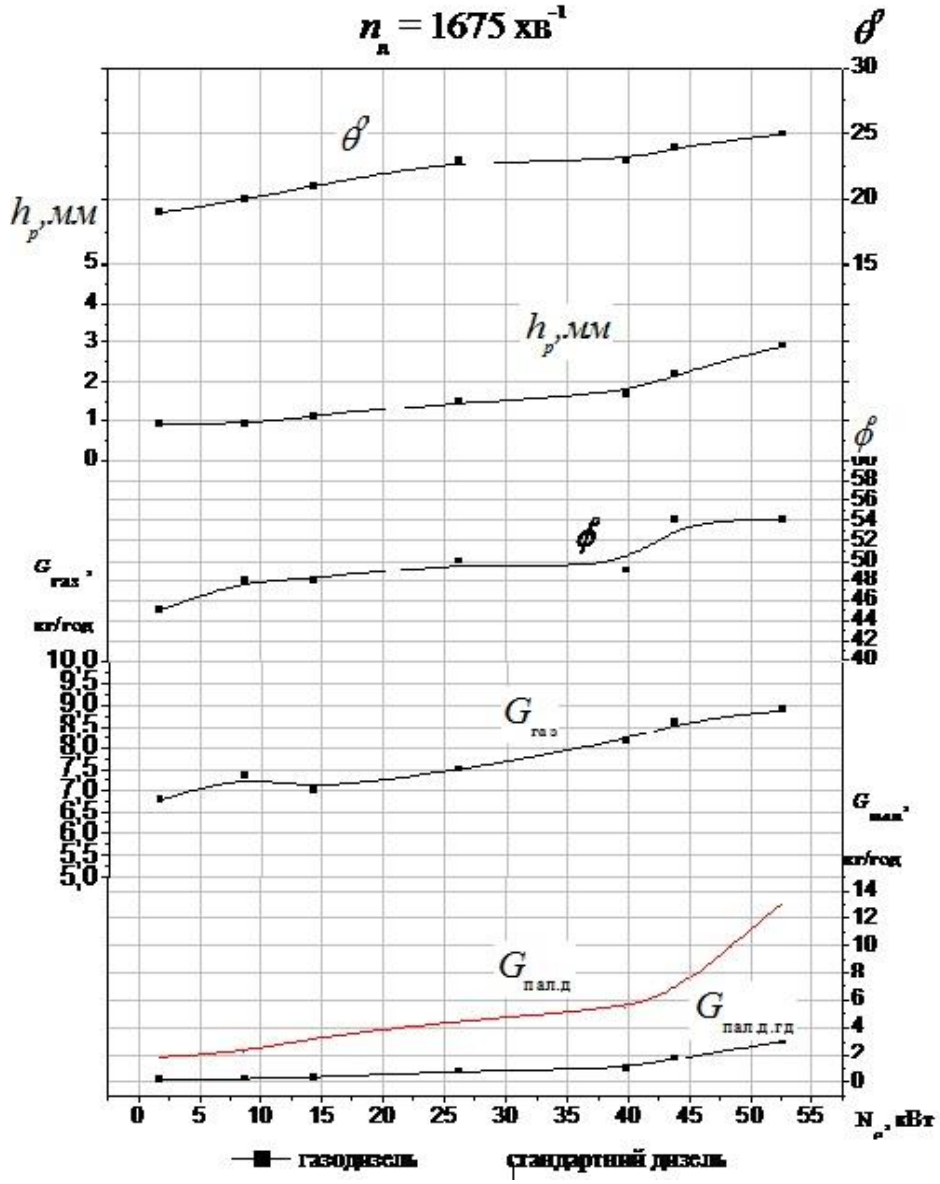

Рисунок 4.4 – Навантажувальна характеристика дизеля CY4102BZQ за дизельним та газодизельним циклами, отримана експериментально при $n_д$=1675 хв$^{-1}$

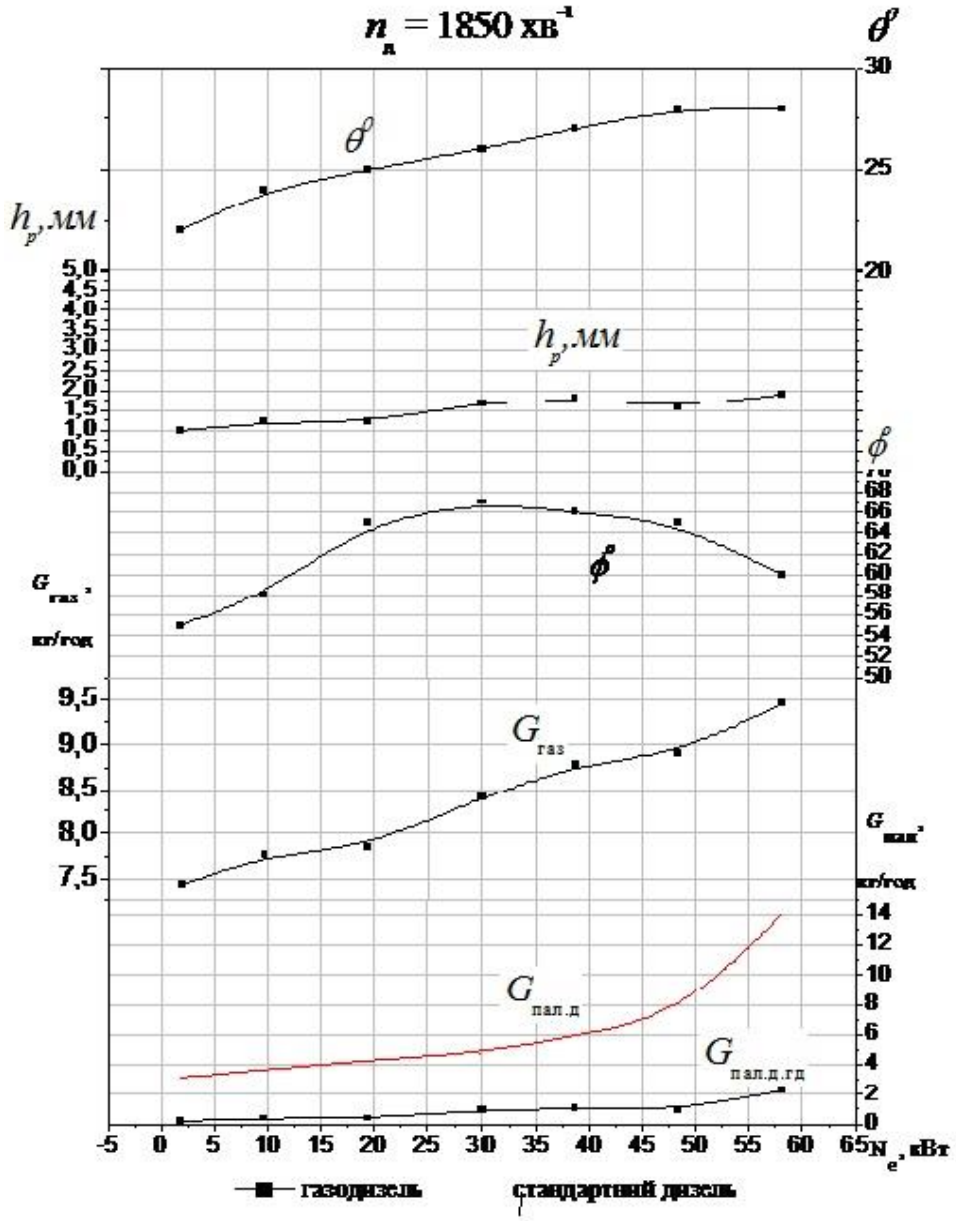

Рисунок 4.5 – Навантажувальна характеристика дизеля CY4102BZQ за дизельним та газодизельним циклами, отримана експериментально при $n_д$=1850 хв$^{-1}$

4.2 Математична обробка результатів стендових досліджень дизеля, що працює на біогазі

Планування повного факторного експерименту (ПФЕ). Повним факторним експериментом називається такий експеримент, при якому визначається

значення вихідного параметра або параметра оптимізації Y при всіх можливих поєднаннях рівнів варіювання факторів.

В експеримент включають x1, x3, ..., xk тобто k - факторів, для кожного з яких слід встановити q рівнів.

Для здійснення ПФЕ потрібно поставити N = qk дослідів. Найбільш поширені експерименти, у яких фактори варіюють на двох рівнях - верхньому і нижньому, тобто q = 2. Це експерименти типу 2k.

Планування, проведення та обробка результатів ПФЕ включають наступні етапи:

- кодування факторів;
- складання плану експерименту або плану-матриці;
- реалізацію плану експерименту;
- перевірку відтворюваності дослідів;
- обчислення і перевірку значущості коефіцієнтів регресії;
- перевірку адекватності регресійної моделі.

В даній роботі застосовується матриця повнофакторного експеременту за методом найменших квадратів.

Таблиця 4.4 – Загальний вигляд план-матриці експерименту.

№	X1	X2	*Y*
1	1,0	1,0	-
2	1,0	-1,0	-
3	-1,0	1,0	-
4	-1,0	-1,0	-
5	0,0	0,0	-
6	2,0	0,0	-
7	-2,0	0,0	-
8	0,0	2,0	-
9	0,0	-2,0	-
10	2,0	2,0	-
11	2,0	-2,0	-
12	-2,0	2,0	-
13	-2,0	-2,0	-

де, X1, X2 – фактори;

Y – критерій ефективності.

Є основні чотири властивості для повно-факторного експерименту. Вони є справедливими для ПФЕ з будь-якою кількістю факторів які варіюються на двох рівнях. Виділяють тільки ті властивості матриць, які безпосередньо впливають на якість математичної моделі.

Під якістю математичної моделі розуміють таку ММ, яка володіє конкретними оптимальними властивостями, а саме: оцінка коефіцієнтів математичної моделі повинна бути найкращою, а точність прогнозування параметра оптимізації не повинна залежати від напрямку у факторному просторі.

Перша властивість ПФЕ – симетричність відносно центру експерименту.

Формулювання: алгебрагічна сума елементів вектор-стовбчика кожного фактора дорівнює «0».

$$\sum_{i=1}^{N} X_{ji} = 0$$

де, j – номер фактора;

N – кількість дослідів;

i=1,2…к.

Друга властивість – умова нормування.

Формулювання: сума квадратів елементів кожного стовпчика дорівнює кількості дослідів.

$$\sum_{i=1}^{N} X_{ji}^2 = N;$$

Третя властивість – ортагональність матриці планування.

Формулювання: сума по членних добутків будь-яких двох вектор-стовбчиків матриці дорівнює «0».

$$\sum_{i=1}^{N} X_{ji} \cdot X_{ui} = 0;$$

Четверта властивість – ротатабельність матриці.

Метою математичної обробки ПФЕ є розрахунок коефіцієнтів регресії:

A0, A1, A2,A11,A22, A12. Для перевірки адекватності прийнятої математичної моделі проводять власне сам експеримент

Величина коефіцієнтів біля змінних вказує на силу впливу фактора, тобто чим більше числове значення коефіцієнта, тим більший вплив являє фактор на параметр оптимізації. Якщо коефіцієнт має знак «+», то зі збільшенням значення фактора параметр оптимізації збільшується, а якщо «-», то зменшується.

Величина коефіцієнта відповідає вкладу даного фактора у величину параметра оптимізації при переході фактора з нульового до верхнього або нижнього. Якщо оцінювати вклад фактора при переході від нижнього до верхнього рівня, то такий вклад називається ефектом фактора (головним ефектом). В числовому значенні він дорівнює подвійному коефіцієнту.

$$y = A_o + A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_2 + A_{11} \cdot x_{11}^2 + A_{22} \cdot x_{22}^2 + A_{12} \cdot x_1 \cdot x_2,$$

де A_o, A_1, A_2, A_{11}, A_{22}, A_{12} – поліноміальні коефіцієнти;

x_1, x_2, x_{11} , x_{22} – незалежні параметри.

Коефіцієнт А12 визначається аналогічно коефіцієнтам А1 та А2 .

4.3. Результати дослідження екологічних показників дизеля, що працює на біогазі

Значний вплив на ефективні та екологічні показники газового двигуна проявляє коефіцієнт надлишку повітря. На рис. 4.6 показана регулювальна характеристика за складом паливоповітряної суміші для режиму $n_д$ = 1400 хв$^{-1}$ і розрідження у впускному трубопроводі $\Delta p_к$ = 20 кПа. Найкращі ефективні показники забезпечуються на цьому режимі при α = 1,0…1,1. Максимальне значення ефективного крутного моменту складає M_e = 173 Н·м при α = 0,99, а мінімальна питома ефективна витрата газу становить g_e = 14,18 МДж/(кВт·год) при α = 1,16. Збіднення паливоповітряної суміші від α = 1,1 до α = 1,4 призводить до погіршення ефективних показників, при цьому M_e зменшується з

164 Н·м до 130 Н·м, а g_e незначно зростає з 14,18 МДж/(кВт·год) до 14,7 МДж/(кВт·год).

Екологічні показники газового двигуна покращуються при збідненні паливоповітряної суміші. При збільшенні α від 1,1 до 1,4 вміст оксидів азоту NO_x у ВГ зменшується з 960 млн$^{-1}$ до 785 млн$^{-1}$, а концентрація оксиду вуглецю CO знижується з 0,32 % до 0,04 %. Вміст вуглеводнів C_mH_n, при цьому, складає 186…118 млн$^{-1}$.

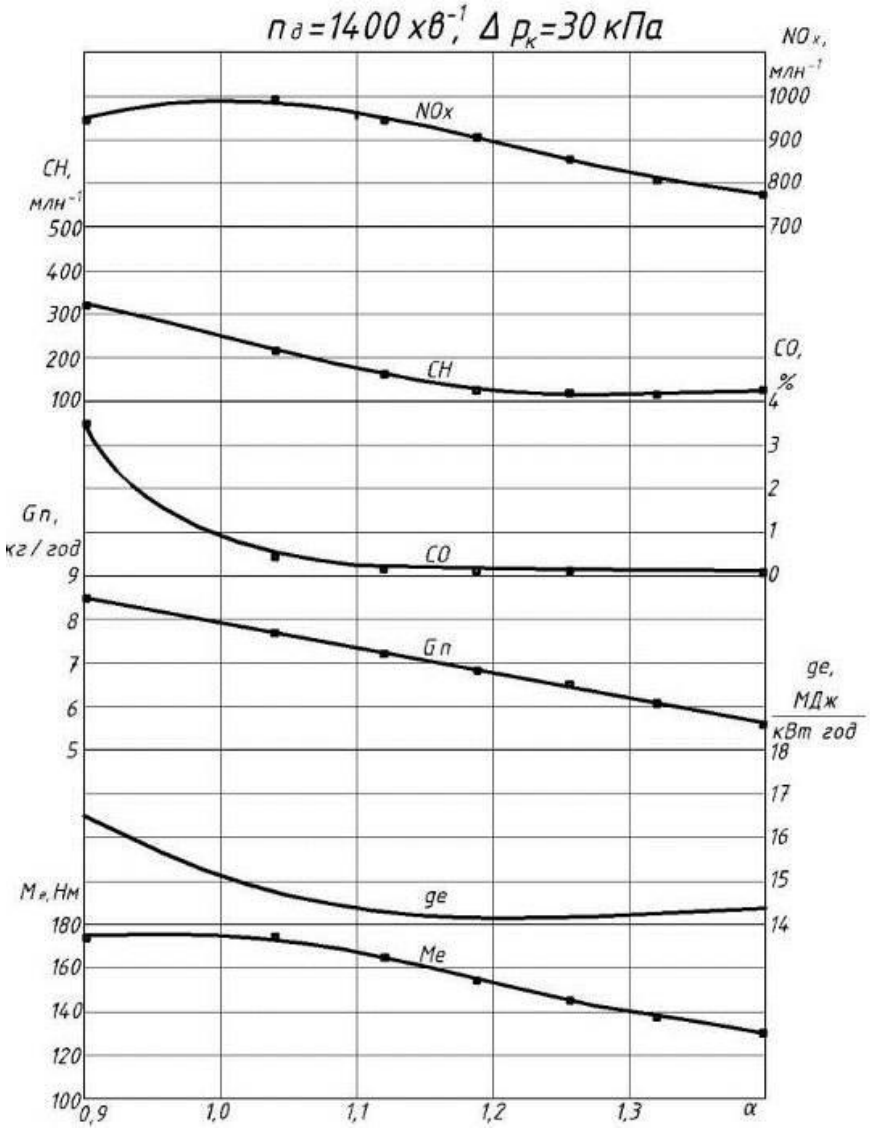

Рисунок 4.6 – Регулювальна характеристика дизеля, що працює на біогазі за складом суміші

Збагачення паливоповітряної суміші від α = 1 до 0,9 призводить до збільшення концентрацій шкідливих речовин у ВГ газового двигуна. Так вміст C_mH_n зростає з 251 млн$^{-1}$ до 317 млн$^{-1}$, а CO збільшується з 0,93 % до 3,5 %. Вміст NO_x, при цьому, складає 943…997 млн$^{-1}$.

Для оцінки потужнісних, економічних показників та шкідливих викидів дизеля DONG FENG на різних усталених швидкісних і навантажувальних режимах були отримані навантажувальні характеристики при різних частотах обертання: n_∂ = 1200, 1400, 1600, 1800, 2000 хв$^{-1}$. Для прикладу на рис. 3.20 показана навантажувальна характеристика газового двигуна при n_∂ = 1600 хв$^{-1}$. На цій частоті обертання колінчастого вала двигун розвиває максимальну потужність 44,8 кВт. Годинна витрата газу $G_{газ}$ становить 10,5 кг/год. Концентрації шкідливих речовин у ВГ змінюється в залежності від навантаження. Так при малих навантаженнях викиди CO і C_mH_n є максимальними і становлять відповідно 1,7 % та 352 млн$^{-1}$ при α = 1,01. При цьому вміст оксидів азоту NO_x становить 303 млн$^{-1}$ і є мінімальним. Найменші концентрації CO утворюються при збільшенні навантаження і збідненні паливоповітряної суміші до α = 1,19 та знаходяться в межах 0,037…0,05 %. Максимальний вміст NO_x 998 млн$^{-1}$ у ВГ має місце при повному навантаженні, а кількість C_mH_n = 99 млн$^{-1}$ при цьому є мінімальною.

Для порівняння показників двигуна за газодизель ним циклом з показниками дизеля зняті швидкісні та навантажувальні характеристики двигуна в усьому діапазоні режимів роботи. На рис. 4.8 наведені навантажувальні характеристики газодизеля та дизеля для частоти обертання n_∂ = 1400 хв$^{-1}$. Аналіз характеристики показує, що під час роботи на біогазі потужність двигуна підвищилась з 40 кВт до 41,4 кВт (на 3,4 %). Деяке підвищення потужності пояснюється роботою двигуна при значно менших значеннях коефіцієнта надлишку повітря α = 0,99…1,1. Еквівалентна питома ефективна витрата палива (в МДж/(кВт·год)) газового двигуна в порівнянні з дизелем збільшилась на 16,8…25,6 %.

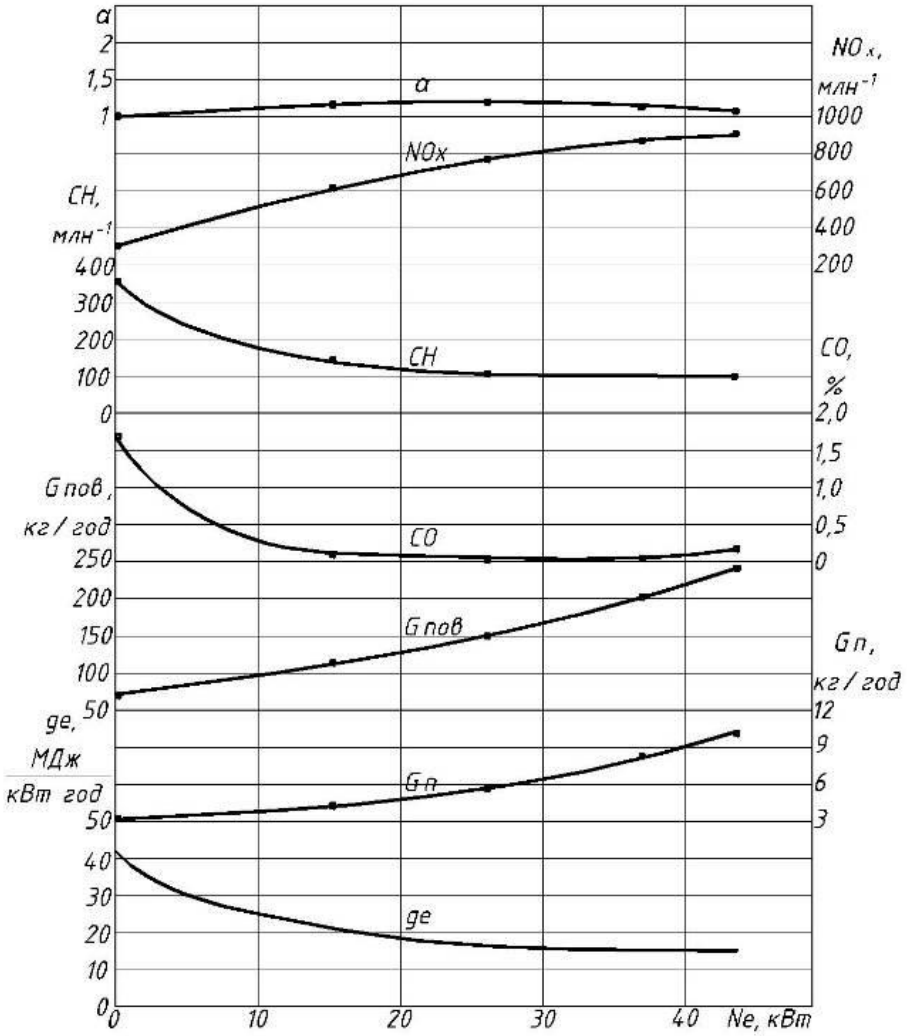

Рисунок 4.7 – Навантажувальна характеристика дизеля, що працює на біогазі $n_д$ = 1600 $хв^{-1}$.

Концентрації викидів *CO* у газодизеля більші ніж у дизеля на холостому ході та малих навантаженнях, і дещо менші при максимальному навантаженні. Така ж закономірність характерна і для викидів вуглеводнів C_mH_n, з яких переважну частину становить метан CH_4. Викиди NO_x у дизеля менші на

середніх навантаженнях, але більші на максимальних. Також у ВГ газодизеля відсутня сажа, викиди якої мають місце в дизеля.

Сумарна токсичність відпрацьованих газів, зведених до оксиду вуглецю *CO* газового двигуна та дизеля суттєво залежить від навантаження на двигун. Якщо при малих навантаженнях різниця в сумарній токсичності практично відсутня, то при збільшенні навантаження, до максимальних значень сумарна токсичність газодизеля зменшується до 55 % у порівнянні з дизелем.

На основі методики, описаної в ДСТУ UN/ECE R 49 і отриманих експериментальних результатів, було проведено розрахунок показників паливної економічності та токсичності дизеля CY4102BZLQ для їх порівняльної оцінки. Згідно з представленою в стандарті методикою проведено заміри ефективних і екологічних показників на 13-ти режимах циклу випробувань, наведених в табл. Б1 (додаток Б). Результати розрахунків питомих шкідливих викидів наведені в табл. Б2 (додаток Б).

Був проведений аналіз токсичних показників газодизеля та дизеля. Так питомі викиди оксиду вуглецю газодизеля на 16,31 % більші, ніж у дизеля. Це можна пояснити тим, що газодизель працює на паливоповітряній суміші з нижчими значеннями коефіцієнта надлишку повітря, ніж дизель. Питомі викиди вуглеводнів газодизеля менші в 2,61 рази, ніж у дизеля, а оксидів азоту – в 1,63 разів менші. Слід відмітити, що вуглеводневий викид газодизеля набагато безпечніший ніж бензинового, так як основу вуглеводневої частини його відпрацьованих газів складає метан CH_4, який з усіх граничних вуглеводнів має найбільшу стійкість до процесу окислення окислами азоту [49].

Отримані значення питомих витрат палива за цикл випробувань були зведені до єдиних енергетичних одиниць – МДж/(кВт·год).

Аналізуючи отримані значення показників енергетичних затрат, можна сказати, що під час роботи двигуна на біогазі середні сумарні значення еквівалентної питомої ефективної витрати палива, складають – 18,2 МДж/(кВт·год), а при роботі двигуна на ДП – 14,8 МДж/(кВт·год). Отже,

газодизель споживає на 18,7 % більше палива, приведеного до єдиних енергетичних одиниць, ніж дизель.

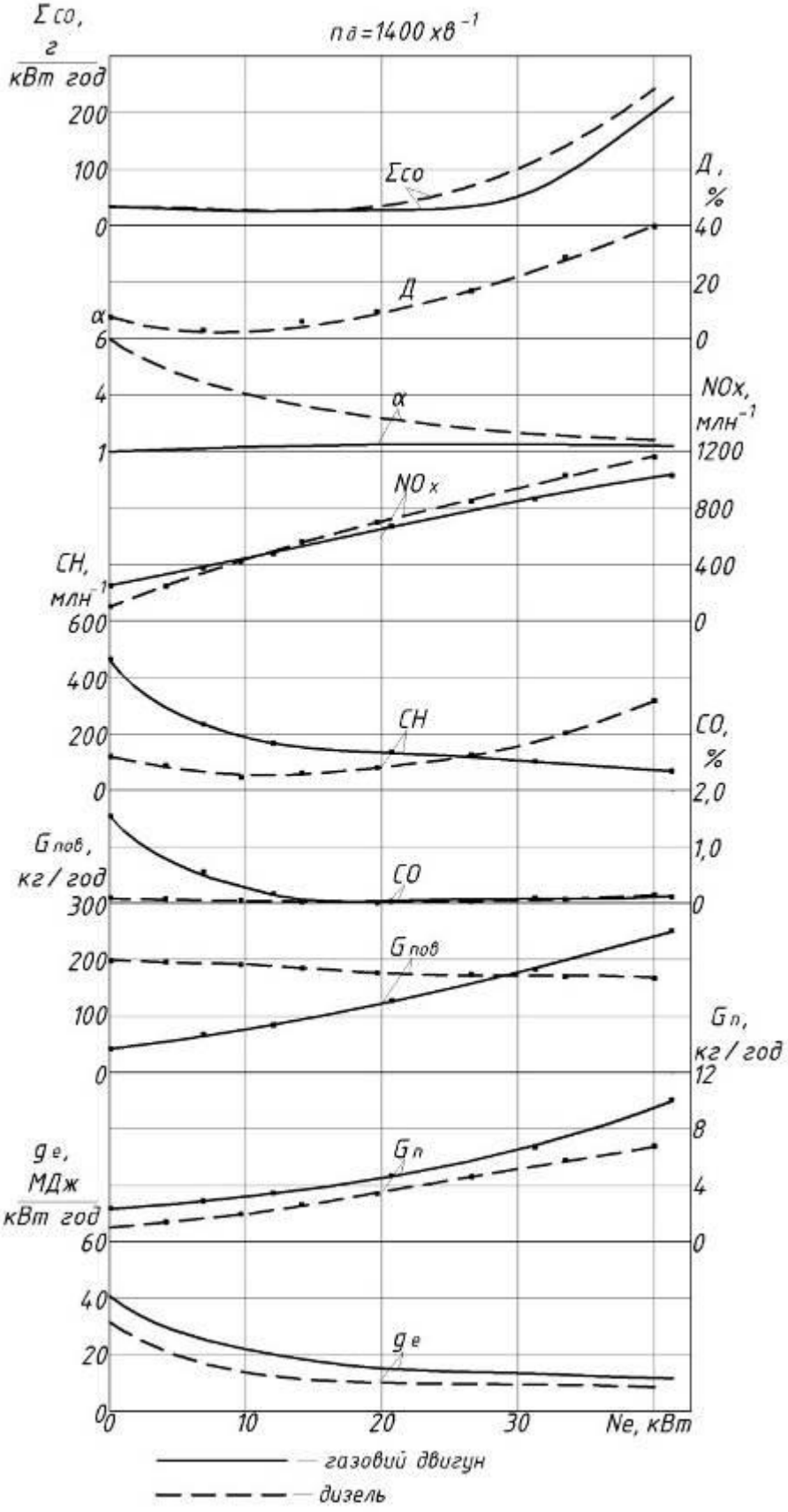

Рисунок 4.8 – Навантажувальна характеристика газового двигуна та дизеля при $n_д$ = 1400 хв$^{-1}$

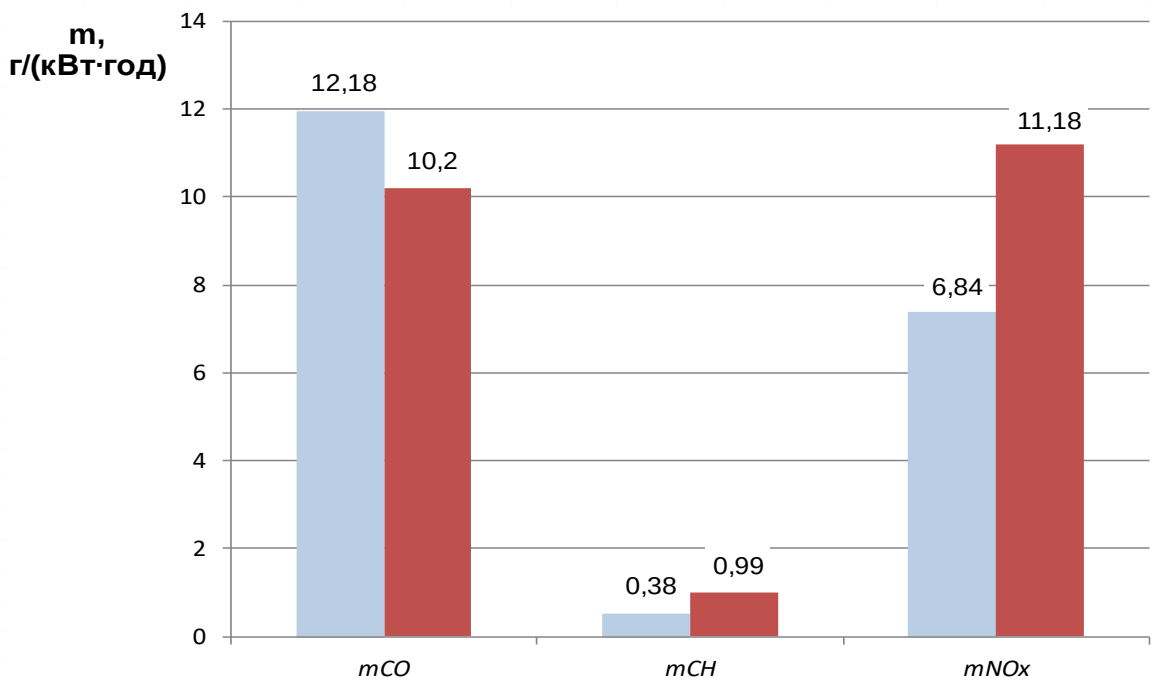

Рисунок 4.9 – Порівняльна діаграма питомих викидів токсичних компонентів ВГ газодизеля та дизеля

(зліва – газодизель; справа - дизель)

Для порівняння токсичності ВГ газодизеля та дизеля визначалися сумарні питомі викиди, приведені до *CO* за залежністю 4.1.

$$G_{CO} = A \cdot m_{CO} + B \cdot m_{C_m H_n} + C \cdot m_{NO_x} + D \cdot m_{TЧ}\,, \qquad (4.1)$$

де m_{CO}, $m_{C_m H_n}$, m_{NO_x}, $m_{TЧ}$ – питомі викиди відповідно оксиду вуглецю, вуглеводнів, оксидів азоту і твердих частинок, г/кВт·год;

A, B, C, D – коефіцієнти агресивності відповідних компонентів.

Для оцінки сумарної токсичності ВГ двигунів в сучасних дослідженнях приймаються такі значення коефіцієнтів агресивності: $A_{CO} = 1$, $B_{C_m H_n} = 3{,}16$, $C_{NO_x} = 41{,}1$, $D_{TЧ} = 200$.

Значення сумарної токсичності ВГ газодизеля складає 294,52 г/кВт·год, а для дизеля цей показник рівний 578,3 г/кВт·год. Таким чином екологічні показники газодизеля в 1,96 рази є кращі, ніж у дизеля.

5. ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВИПРОБУВАННЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА DONG FENG НА АВТОБУСІ «БОГДАН» МОДЕЛІ А-092

5.1 Математичні моделі, які описують двигун як споживач палива та джерело шкідливих речовин.

Паливна економічність двигунами в умовах експлуатації визначаються великою кількістю факторів, які є взаємозв'язаними та певною мірою впливають на кінцевий результат. Вихідними параметрами є витрата палива.

Для прогнозтичної оцінки витрати палива автобуса в усталеному русі, доцільно застосовувати математичну модель. В основі математичної моделі є рівняння руху автомробіля, отримане із тягового балансу [45]. Для усталеного руху складова dV/dt =0.

Тоді необхідна величина крутного моменту при даних характеристиках дороги (*f*) і автомобіля (*kF, M_o, $M_в$*) визначається з рівняння тягового балансу автомобіля, з урахуванням значення коефіцієнта опору коченню *f*:

$$M_к = \frac{\left[(M_o + M_в)\cdot(f\cdot\cos\alpha + f_o\cdot A\cdot\upsilon^2\cdot\cos\alpha \pm \sin\alpha) + kF\cdot\upsilon^2\right]\cdot r_д\cdot g}{U_i\cdot U_p\cdot\eta_т}. \quad (5.1)$$

де:

M_0 - споряджена маса автобуса, кг;

$M_в$ - маса пасажирів, кг;

f - коефіцієнт опору кочення;

$A = 65\cdot10^{-5}$ – сталий коефіцієнт;

v^2 - швидкість руху автобуса, км/год;

kF - коефіцієнт опору повітря;

$r_д$ - динамічний радіус колеса, м;

g - прискорення вільного падіння;

U_i - передаточне число і - тої передачі;

U_p - передаточне число головної передачі;

$\eta_т$ - ККД трансмісії.

Величина частоти обертання колінчастого вала дизеля, яка використовується при цьому, визначається за рівнянням:

$$n_д = \frac{30 \cdot \upsilon \cdot U_i \cdot U_p}{\pi \cdot r_к}. \qquad (5.2)$$

де: $r_к$ - радіус кочення колеса;

Для описання показників дизеля та газодизеля використовувались квадратичні поліноміальні залежності вигляду:

$$y = A_o + A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_2 + A_{11} \cdot x_{11}^2 + A_{22} \cdot x_{22}^2 + A_{12} \cdot x_1 \cdot x_2, \qquad (5.3)$$

де A_o, A_1, A_2, A_{11}, A_{22}, A_{12} – поліноміальні коефіцієнти;

x_1, x_2, x_{11} , x_{22} – незалежні параметри.

Таблиця 5.1 - Коефіцієнти поліноміальних залежностей для різних показників роботи двигуна при роботі за дизельним та газодизельним циклом

Параметр	Коефіцієнти					
	A_o	A_1	A_2	A_{11}	A_{22}	A_{12}
$G_{дп}$	18.441	-0.024729	-0.010981	$0.90520 \cdot 10^{-5}$	$0.73181 \cdot 10^{-5}$	$0.29962 \cdot 10^{-4}$
$G_{дп,гд}$	-17.608	0.027407	$-0.28515 \cdot 10^{-2}$	$-0.7565 \cdot 10^{-5}$	$0.1585 \cdot 10^{-4}$	$0.2920 \cdot 10^{-5}$
$G_{газ}$	1.6583	$-0.24251 \cdot 10^{-2}$	$0.19607 \cdot 10^{-2}$	$0.93499 \cdot 10^{-6}$	$0.30251 \cdot 10^{-4}$	$-0.2503 \cdot 10^{-5}$

По значенням крутного моменту і частоти обертання колінчастого вала двигуна визначається годинна витрата дизельного палива $G_{дп}$, $G_{дпгд}$, $G_{газ}$ (кг / год), в цьому періоді роботи двигуна, за поліноміальною залежністю другого степеня [4]:

$$G_{дп} = 18{,}441 + A_1 \cdot n_д + A_2 \cdot M_к + A_{11} \cdot n_д^2 + A_{22} \cdot M_к^2 + A_{21} \cdot n_д \cdot M_к. \qquad (5.4)$$

$$G_{дпгд} = -17{,}608 + A_1 \cdot n_д + A_2 \cdot M_к + A_{11} \cdot n_д^2 + A_{22} \cdot M_к^2 + A_{21} \cdot n_д \cdot M_к.$$

$$G_{газ} = 1{,}6583 + A_1 \cdot n_д + A_2 \cdot M_к + A_{11} \cdot n_д^2 + A_{22} \cdot M_к^2 + A_{21} \cdot n_д \cdot M_к.$$

Таблиця 5.2 - Результат розрахунку шляхової витрати дизельного палива при усталеному русі

Вид палива	Витрати дизельного палива в л/100км. газ в кг/год.			
	30км/год	40 км/год	50 км/год	60 км/год
$G_{ГАЗ}$	2,42	6,12	8,38	9,24
$G_{ДП\ ГД}$	5,79	4,45	4,31	3,75
$G_{ДП}$	19,7	19,4	22,5	25,1

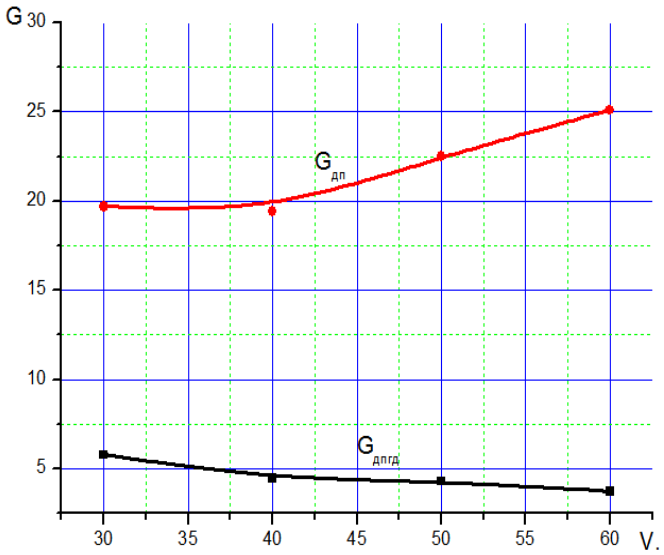

Рисунок 5.1 – Залежність годинних витрат палива від швидкості руху автобуса

де V - швидкість руху автобуса, км/год;

$G_{дп}$ - витрати дизельного пального за дизельним циклом;

$G_{дпгд}$ - витрати дизельного пального за газодизельним циклом.

5.2 Перевірка адекватності поліноміальних залежностей, які описують паливну економічність двигуна.

Адекватність поліноміальних залежностей, які отримані при обробці результатів експериментальних даних, визначались за допомогою

F – критерію Фішера.

Коефіцієнти поліноміальних моделей визначались на основі експеременту. З цією метою було визначено навантажувальні характеристики дизеля при різних швидкісних режимах.

За рівномірним варіантом плану повного факторного експерименту визначались значення параметрів у заданих точках плану. З використанням методу найменших квадратів, визначались коефіцієнти поліноміальних залежностей для навантажувальних режимів роботи двигуна. Показники дизеля визначались в залежності від частоти обертання колінчастого валу $n_д$ та ефективного крутного моменту $M_к$. Для режима активного холостого ходу показники визначались в залежності від $n_д$.

Адекватність поліноміальних залежностей, які отримані при обробці результатів експериментальних даних, визначались за допомогою

F – критерія Фішера [47]:

$$F = \frac{S^2_{ад}}{S^2_{(y)}}, \tag{5.5}$$

де $S^2_{ад}$ – дисперсія адекватності;

$S^2_{(y)}$ – дисперсія відтворюваності.

Якщо отримані розрахункові значення $F_р$ – критерія не перевищують табличних даних $F_т$, то з відповідною довірчою вірогідністю поліноміальну залежність можна вважати адекватною. При перевірці адекватності були використані таблиці F – критерія Фішера при 5% - му рівні значимості, тому довірча вірогідність складає 95%.

Дисперсія адекватності представляє остаточну суму квадратів

$(\sum_{i=1}^{n} \Delta Y^2_i = \sum_{i=1}^{n} (Y_о - Y_р))$ різниць між експериментально заміряними значеннями $Y_о$ та розрахованими за поліноміальними залежностями $Y_р$, поділену на число ступенів вільності f:

$$S^2_{\text{ад}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta Y^2_{\text{i}}}{f}. \qquad (5.6)$$

Число ступенів вільності f в плануванні експерименту дорівнює різниці між числом дослідів N і числом коефіцієнтів k, що визначаються:

$$f = N - k. \qquad (5.7)$$

Дисперсія відтворюваності $S^2_{(y)}$ може бути визначена шляхом постановки додаткових дослідів в одній з точок по залежності:

$$S^2_{(y)} = \frac{\sum_{i=1}^{m} \left(Y_{\text{i}} - \overline{Y}\right)^2}{n-1}, \qquad (5.8)$$

де n – число додаткових дослідів;

Y_{i} – значення параметра, яке отримується в і – му досліді;

$\overline{Y}$ – середнє значення заміряних параметрів.

Визначалась адекватність поліноміальних залежностей другої степені від двох факторів (частота обертання колінчастого вала $n_{\text{д}}$ = 1500 хв$^{-1}$ та ефективний крутний момент двигуна $M_{\text{к}}$ = 150 Н·м), які описують залежності:

- витрати дизельного палива (за газодизельним циклом роботи двигуна). Дисперсія відтворюваності визначалась за витратою дизельного палива (0,66, 0,68, 0,61 кг/год) в трьох повторних дослідах – $S^2_{(y)} = 1.3 \cdot 10^{-3}$. Дисперсія адекватності $S^2_{\text{ад}} = 2.889 \cdot 10^{-4}$. Значення F – критерію Фішера F = 0,222 є меншим за табличне ($F_{\text{т}}$ = 3,2).

- витрати біогазу. Дисперсія відтворюваності визначалась за витратою біогазу (7,5, 6,9, 7,2 кг/год) в трьох повторних дослідах – $S^2_{(у)}$ = 0,09. Дисперсія адекватності $S^2_{ад}$ = 0,02. Значення F – критерію Фішера F = 0,22 є меншим за табличне ($F_т$ =3,2).

Таблиця 5.3 – Результати перевірки адекватності поліноміальних залежностей на прикладі навантажувального режиму дизеля CY4102BZQ

Параметр	$S^2_{ад}$	$S^2_{(у)}$	$F_Р$	$F_Т$
$G_{пал.дп.гд}$	$2.889 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$.	0,222	3,2
$G_{газ.}$	0,02	0,09	0,22	3,2

Як видно з даних таблиці, умова $F_Р < F_т$ виконується, це свідчить про адекватність поліноміальних залежностей, які описують газодизельдизель в навантажувальних режимах.

Отже всі рівняння, які описують дизель CY4102BZQ, як споживача палива є адекватними.

5.3 Практичні рекомендації та техніко-економічний розрахунок ефективності переобладнання дизеля для роботи на біогазі

На користь переобладнання дизеля в газодизель свідчать наступні фактори:

- збільшення терміну роботи моторної оливи та фільтрів;
- порівняно невелика вартість біогазу у порівнянні з дизельним паливом, і як наслідок, зниження паливної складової експлуатаційних витрат;
- збільшення міжремонтного пробігу двигуна в наслідок більш м’якої роботи;
- зменшення виплат за забруднення навколишнього середовища;
- економія дизельного палива за рахунок заміни його біогазом;

- збереження енергетичних параметрів на рівні базового двигуна.

Але при цьому не слід забувати і такі недоліки переобладнання як:

- зниження продуктивності КТЗ внаслідок зниження вантажопідйомності і збільшення холостих пробігів пов'язаних з необхідністю заправки біогазом;
- збільшення вартості автомобіля, за рахунок встановлення газобалонного обладнання, і відповідно збільшення витрат на технічне обслуговування та амортизаційні відрахування (при використанні автомобіля на підприємстві);
- необхідність періодичних перевірок газових балонів;

Як видно з вище наведеного, дати чіткі рекомендації стосовно доцільності переобладнання дизеля в газодизель є дуже непростим завданням. Відповідь повинна враховувати велику кількість позитивних і негативних моментів, кожен з яких сам по собі є вельми специфічним і залежить від багатьох факторів.

Головний чинник, який спонукає до конвертації дизеля в газодизель – це очікування економічного ефекту. Він досягається за рахунок заміни ДП на більш дешеве паливо – біогаз. На сьогоднішній день вартість ДП становить близько 22 грн/л, при вартості біогаз - 11,30 грн/м^3.

Найбільш універсальним показником ефективності переобладнання двигуна DONG FENG моделі CY 4102 BZLQ для роботи за газодизельним циклом є економічний ефект, розрахований на 100 км пробігу. В табл. 5.4, 5.5 наведені результати розрахунків, які дають можливість оцінити економічну доцільність переобладнання, враховуючи ціну на ДП та біогаз.

Використовуючи поліноміальні залежності були побудовані по навантажувальним характеристикам графіки, що показують залежність витрат: дизельного палива, біогазу в залежності від швидкості руху на найвищій передачі за міським циклом руху рис. 5.2 – 5.3.

Таблиця 5.4 – Витрати грн/добу в залежності від швидкості руху на найвищій передачі при роботі двигуна за дизельним циклом

Пробіг км.				
	30км/год	40 км/год	50 км/год	60 км/год
1	3,34	3,29	3,82	4,26
50	167,4	164,9	191,2	213,3
100	334,9	329,8	382,5	426,6
150	502,3	494,7	573,6	639,9
200	669,8	659,6	765	853,2
250	837,2	824,5	956,2	1066,5
300	1004,6	989,4	1147,2	1279,8
350	1172	1154	1338,4	1493,1

Таблиця 5.5 –Витрати грн/добу в залежності від швидкості руху на найвищій передачі при роботі двигуна за газодизельним циклом

Пробіг км.				
	30км/год	40 км/год	50 км/год	60 км/год
1	1,3	1,56	1,84	1,87
50	65	78,19	92,22	93,45
100	130,18	156,39	184,45	186,59
150	195,18	234,57	276,66	280,35
200	260,36	312,79	368,9	373,78
250	325,36	390,95	461,1	467,23
300	390,37	469,19	553,32	560,7
350	455,54	547,34	645,54	654,15

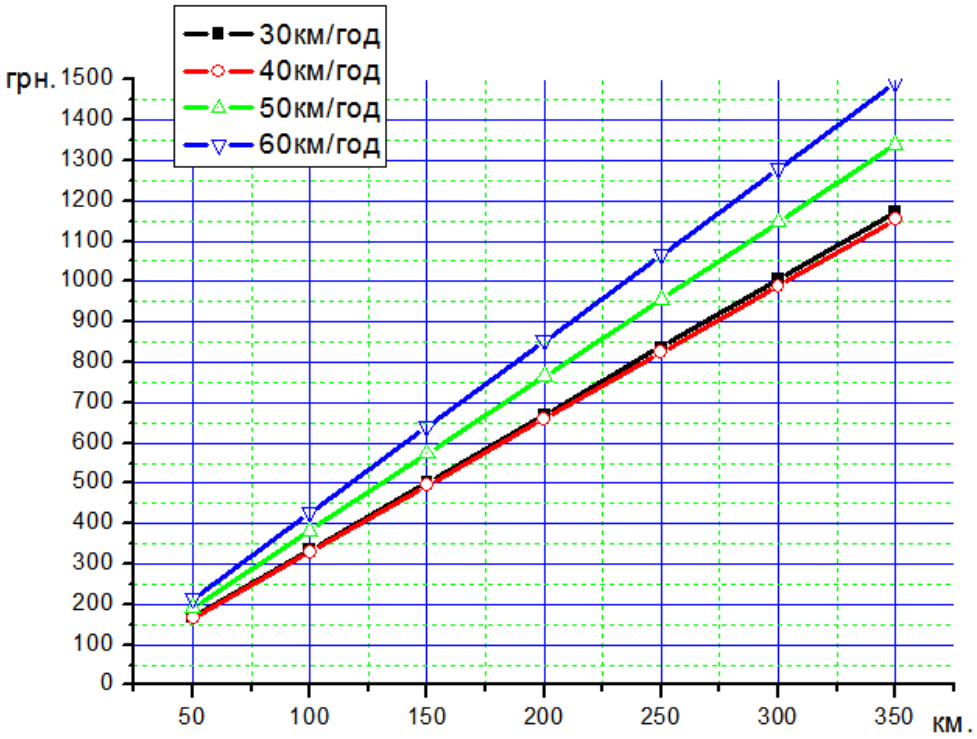

Рисунок 5.2- Залежність добової витрати палива від пробігу за дизельним циклом роботи двигуна.

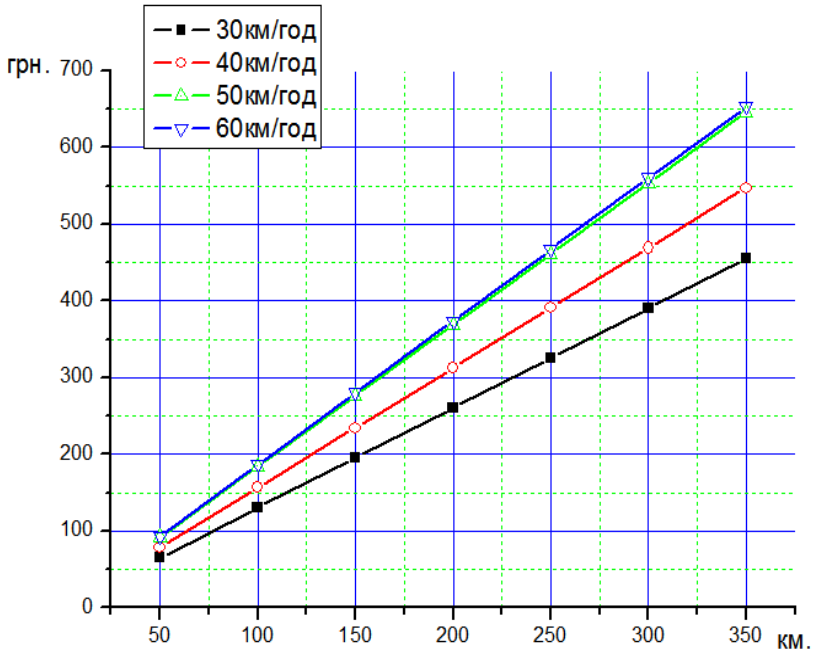

Рисунок 5.3- Добова витрата коштів гривень на добу, в залежності від добового пробігу автобуса за газодизельним циклом роботи двигуна.

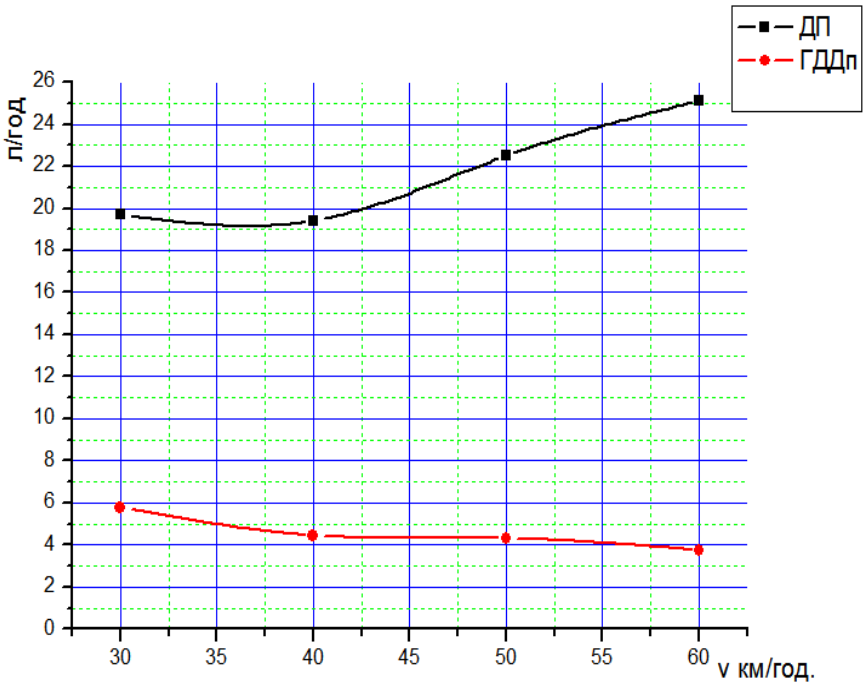

Рисунок 5.4 – Графік порівняння витрати дизельного палива за дизельним та газодизельним процесами роботи двигуна в залежності від швидкості руху на 5й передачі.

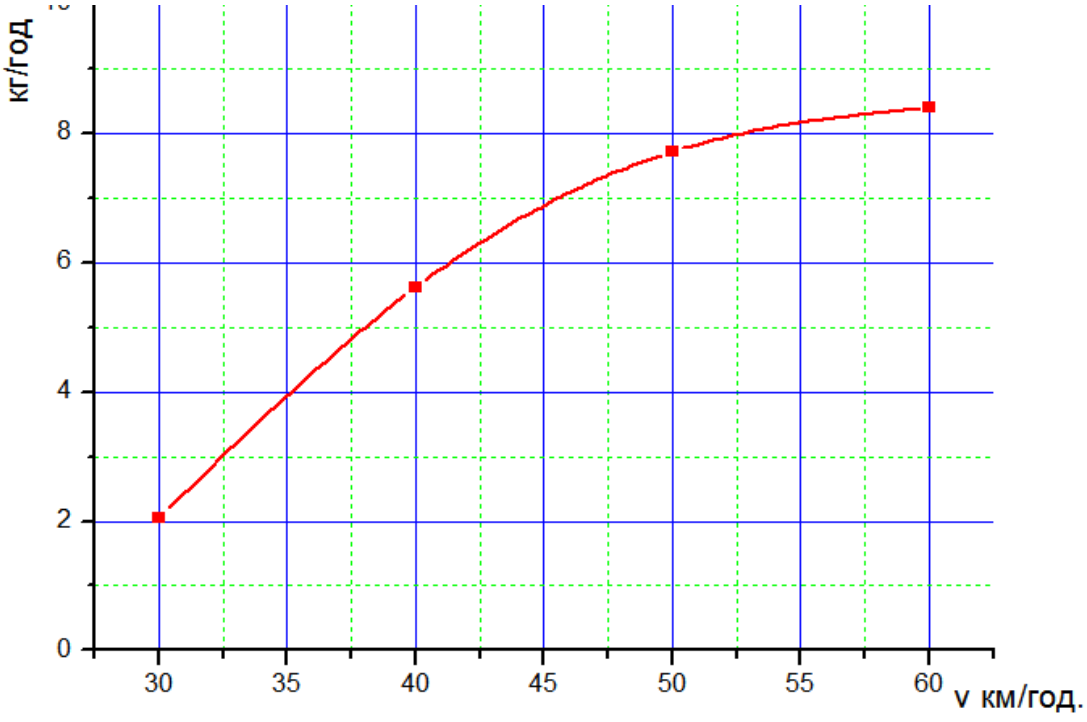

Рисунок 5.5 – Витрата біогазу в залежності від швидкості руху автобуса на 5й передачі.

Як видно з графічних залежностей (5.1 - 5.5), витрати при роботі двигуна за газодизельним циклом менші ніж при роботі за дизельним циклом .

При переобладнанні двигуна велику роль відіграє вартість переобладнання. На даний момент (10.09.2016р.) вартість комплекту газодизельної апаратури, чотирьох газових балонів та роботи по переобладнанню становить близько 30 000 грн.

На рис. 5.6 показані результати розрахунків терміну окупності в місяцях в залежності від добового пробігу, при швидкості 40 км/год. та 25 робочих днів на місяць.

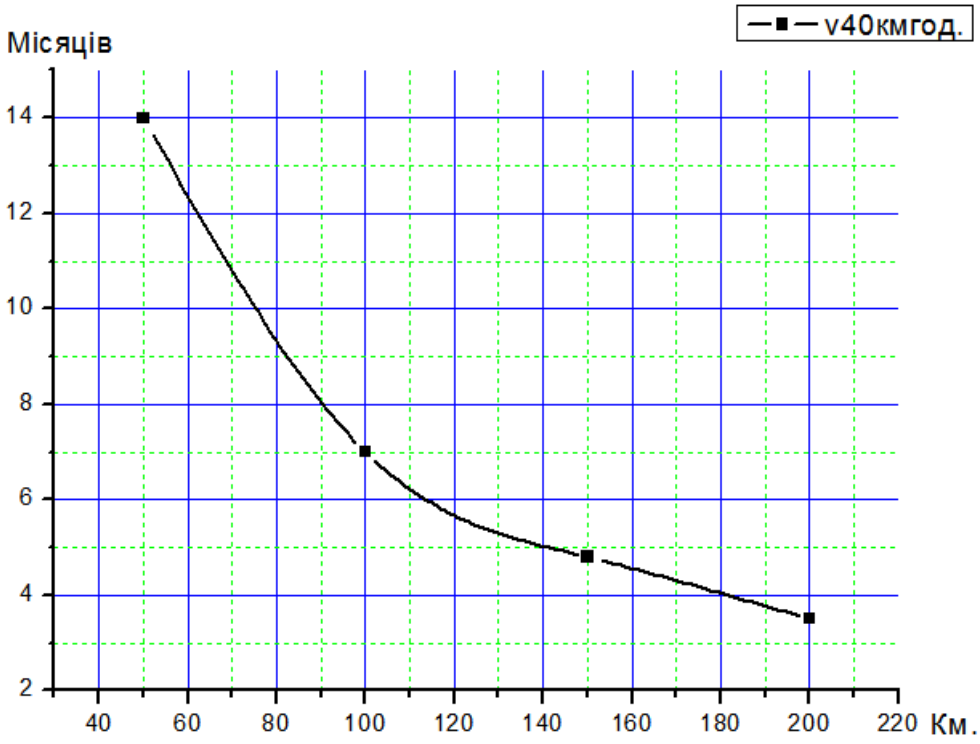

Рисунок 5.6 – Термін окупності в місяцях в залежності від добового пробігу автобуса при рівномірному русі автобуса V = 40 км/год

Як видно з рисунку, при середньому добовому пробігу 150 км період окупності переобладнання складає 4 місяців.

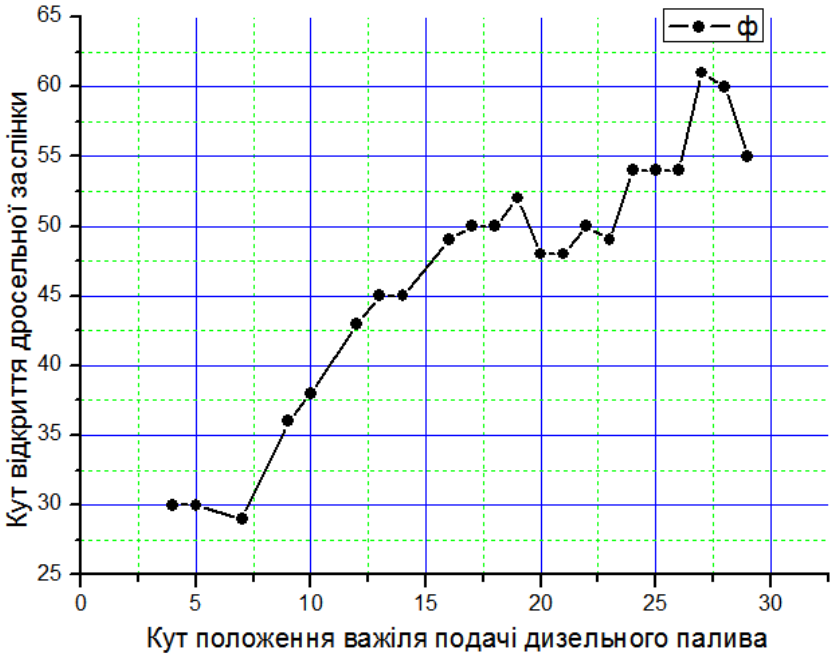

Рисунок 5.7 – Алгоритм управління паливоподачею газодизеля, залежність кута відкриття ϕ^0 дросельної заслінки від кута повороту θ^0 подачі дизельного палива

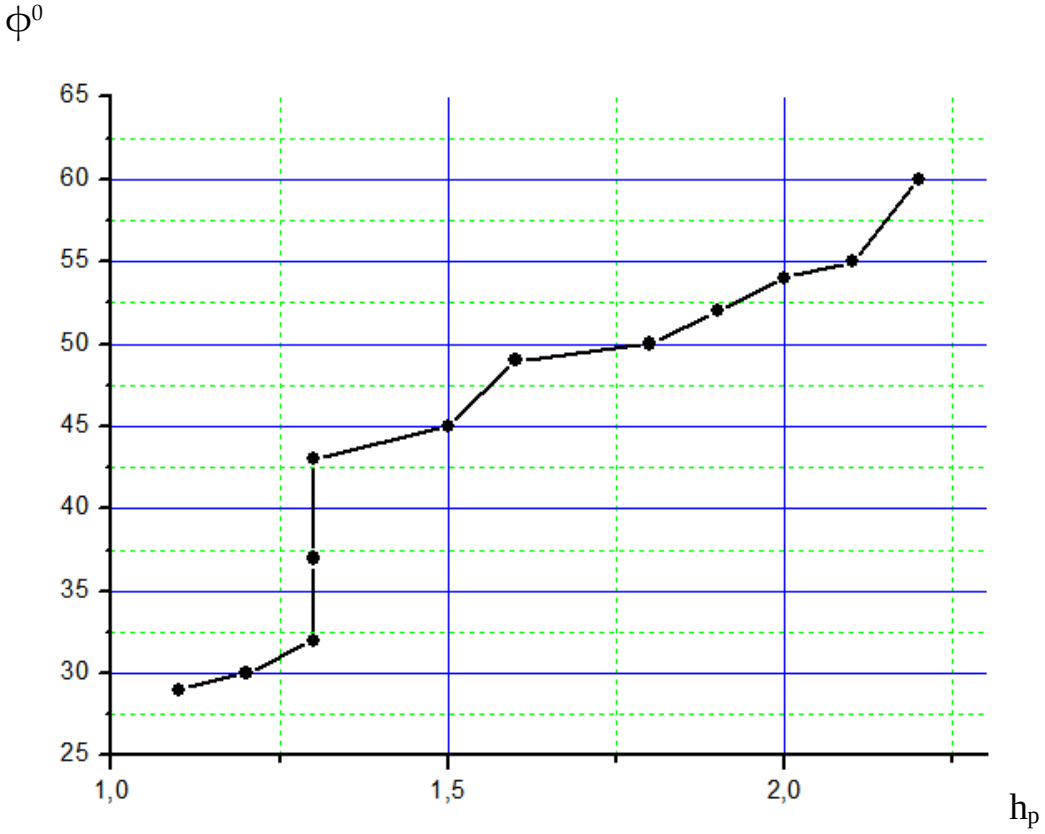

Рисунок 5.8 – Алгоритм управління паливоподачею газодизеля, залежність кута відкриття ϕ^0 дросельної заслінки від ходу рейки ПНВТ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бацанов И.Н., Лукъяненко И.И. Уборка и утилизация навоза на свиноводческих комплексах. - М.: Россельхозиздат, 1977. - 160 с.
2. Пилипенко О.М. Обґрунтування раціональної експлуатації та оновлення автобусного парку м. Черкаси / О.М. Пилипенко, // Вісник ЧДТУ. – Черкаси, 2016. – № 1. С. 35 – 40.
3. Современное состояние и перспективы развития биоэнергетики в Украине / Гелетуха Г. Г., Железна Т. А., Жовмир Н. М., Матвеев Ю. Б. // Промышленная теплотехніка. - 2005. - №1. - С. 78-85.
4. Шльончак І.А. Дослідження фізико-хімічних методів активації дизельного палива / Шльончак Ігор Анатолійович // Вісник ЧДТУ – 2015. - №1 – с. 135-140.
5. Биоконверсия органических отходов в биодинамическом хозяйстве / Н.М. Городний, И.А. Мельник, М.Ф. Повхан и др.. -К.: Урожай,1990. - 256 с.
6. Буряк Ю.Н., Рязанцев В.П. Системы удаления и хранения безподстилочного навоза // Обзорная информация. - М.: ВНРШТЭИагропром, 1986. - 48 с.
7. Экологическая биотехнология: Пер. с англ. /Под ред. К.Ф. Фостера, Д.А. Дж. Вейза. - Л.: Химия, 1990. - Пер. изд.: Великобритания, 1987. - 384 с.
8. Сербін В. А. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії в системах ТГВ: навч. посібник / Сербін В. А. - Макіївка : ДонДАБА, 2003. - 153 с.
9. Устименко В. Питання енергозабезпечення автотранспорту України в умовах світової енергетичної кризи / В. Устименко // Перевізник UA. – 2008. – №15. – С. 28–30.
10. Куршев М.А. Каталитические нейтрализаторы для автомобилей, работающих на природном газе / М.А. Куршев // Реферативный журнал «Автомобильный и городской транспорт». – 1995. – № 9. – С. 12.
11. Макаров Н. Правительство давит на газ / Н. Макаров // Автомобильный транспорт. – 1995. – № 9. – С. 5–7.

12. Хромов Б.В. Сжиженный газ в автомобильных двигателях / Б.В. Хромов – Реферативный журнал, Автомобильный и городской транспорт, 1995.- №11.-с. 16.

13. Diesel alcohol injection studies / Y. Chen, D. Gussert, X. Gao, C. Gupta, D. Foster. – Automot. Eng, 1981, 89, №4, 50-53.

14. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. // Підручник. – М.: Наука, 1976. – 274.

15. Расширение использования газовых моторных топлив для автотранспорта Украины. Особенности переоборудования АТС разных типов для работы на газовых допливах : материали 50-й конференции ААИ “Автомобиль и окружающая среда” (Дмитров, Россия, 15 - 16 июня 2005 г).

16. Альтернативные топлива для двигателей с искровым зажиганием. / Э.И. Поршневые и газотурбинные двигатели. – 1985. – №8, с.17-21.

17. Кириллова Л.А. Применение синтетического бензина для автомобильных двигателей. / Л.А.Кириллова, П.М.Щербаков. –К.: Техника, – 1992, – №29, с. 62-64. – Автомобильный транспорт.

18. Брук Л. Автомобильное топливо в перспективе / Л. Брук – Автомобильная промышленность США, 1991, № 11.

19. Gregory D. Hydrogen-transportable storage energy module / D. Gregory. – Astronautics and Aeronautics, 1973.- 11, № 8.- p. 38-43.

20. Звонов В.А. Экология: альтернативные топлива с учетом их полного жизненого цикла / В.А. Звонов, А.В. Козлов, А.С. Теренченко. –Автомобильная промышленость, 2001. – №4. с. 10-12.

21. Етиловий спирт як моторне паливо / Ю.Ф. Гутаревич, А.Т. Говорун, А.О. Корпач, О.А. Собро – Автошляховик України, 1999. – №1, с. 7-10.

22. Diesel alcohol injection studies / Y. Chen, D. Gussert, X. Gao, C. Gupta, D. Foster. – Automot. Eng, 1981, 89, №4, 50-53.

23. Цирлин Ю.А. Этиловый спирт - добавка к моторному топливу / Ю.А. Цирлин. – Обзорная информация – М. - 1984 г

24. Терентьев Г.А. Моторные топлива из альтернативных сырьевых ресурсов / Г.А. Терентьєв. – М: Химия. - 1989 г. – Обзорная информация.

25. Редзюк А.М. Проблеми та перспективи використання рослинної олії як моторного палива / А.М. Редзюк, В.О. Рубцов, Ю.Ф. Гутаревич – Автошляховик України, 1999. – №1, с. 4-6.

26. Широкомасштабные эксперименты по введению рапсового масла в дизельное топливо. / Автомобильная промышленность США, 1997. – №3, с. 5-9.

27. Применение растительного масла в качестве топлива для ДВС. / Э.И. Поршневые и газотурбинные двигатели, 1990. – №3, с. 14-15.

28. Хромов Б.В. Сжиженный газ в автомобильных двигателях / Б.В. Хромов – Реферативный журнал, Автомобильный и городской транспорт, 1995.- №11.-с. 16.

29. Створення експериментальної установки для проведення досліджень з визначення ефективності впливу газових, нових товарних та альтернативних моторних палив на показники ДВЗ / С.О. Ковальов, О.А. Клименко, М.Б. Назаренко, А.М. Сафронов – Автошляховик України, 2004., окремий випуск, с.15.

30. Великанов Д. Перспективность автомобилей, работающих на природном газе / Д. Великанов, В. Петров, О. Ставров. – Автомобильный транспорт, 1982, №9, с. 44 - 47.

31. Колубаев Б.Д. Природный газ как автомобильное топливо / Б.Д. Колубаев – Автомобильная промышленность, 1981. - №8.– с. 37 –39.

32. Грузовые автомобили с газовыми двигателями в США / – Автомобильная промышленность США, 1996. - № 4-5. - с. 7-8.

33. Гайнуллин Ф. Г. Природный газ как моторное топливо на транспорте / Ф. Г. Гайнуллин, А. И. Гриценко, Ю. Н, Васильев и др. – М. : Недра, 1986.— 255 с.

34. Академия наук Украины. Институт Газа. «Концепция использования сжатого природного газа в качестве моторного топлива на автотранспорте Украины» – Киев, 1993

35. Про затвердження Київської міської програми "Екологія транспорту" / – Газета Хрещатик, 2002. – 15 січня. – с. 9-12.

36. Козачук І.С. Покращення індикаторних, ефективних та екологічних показників газових двигунів, переобладнаних з дизелів: дис. ... кандидата тех. наук: / І.С. Козачук. – К., 2008 р.

37. Мамедова М.Д. Транспортные двигатели на газе. / М.Д. Мамедова, Ю.Н. Васильєв. – М.: Машиностроение, 1994. - 224 с.

38. Hamling P. "Down Under" success with natural gas buses / P. Hamling. – NGV Worldwide. - 2002. - February. - p. 11.

39. Карницкий В. В. Газодизельные модификации / В.В. Карницкий, Т.Р. Филипосянц – Автомобильная промышленность, 1988, – № Ц.—с. 26-28.

40. Васильев Ю.Н. Транспорт на газе / Ю.Н. Васильев, А.И. Гриценко, Л.С. Золотаревский. – Москва. «НЕДРА», 1992.

41. Microprocessor Duel-Fuel Diesel Engine Control System / L.E. Gettel, G.C. Perry, J. Boisvert, P.J. O'Sullivan – SAE Techn. Paper Ser, 1986. –№861577. –p. 1-10.

42. Васильев Ю.Н. Транспорт на газе / Ю.Н. Васильев, А.И. Гриценко, Л.С. Золотаревский. – Москва. «НЕДРА», 1992.

43. Пилипенко О.М. Система безпеки при виробництві та використанні біогазу в дизелях / Пилипенко О.М., Підгорний М.В., Шльончак І.А.// Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк - 2016 - № 55 – с. 281-286.

44. Пилипенко О.М. Розробка системи живлення перспективного дизеля для роботи на біогазі / О.М. Пилипенко, І.А. Шльончак // Вестник ХНАДУ. – Выпуск № 74, Харків, 2016. – С. 88-93

45. Скирков Н.Д. Оптимизация регулирования двигателя по топливной экономичности с учётом токсичности: автореф. дис. на здобуття наук. ступення канд. техн. наук: – М., 1980, 16 с.

46. Терехов Е.М. Методика и программа определения расхода топлива и выбросов токсичных компонентов в отработавших газах бензинового двигателя движении автомобиля по ездовому циклу.

47. Хомич А.З. Эффективность и вспомогательные режимы тепловозных дизелей / А.З. Хомич. – М: Транспорт, 1979. - 144.

48. Watson H.C. A simplified method for quantifying fuel consumption of vehicles in urban traffic / H.C. Watson, E.E. Milkins, G.A. Marshall. –SAAR Austrelasia, 1980. -№1, p.p. 6-13.

49. Васильев Ю.Н. Опыт эксплуатации автомобилей, работающих на газе / Ю.Н. Васильев, А.И. Гриценко, Л.С. Золотаревский, С.И. Ксенофонтов, Р.О. Самсонов. – М.: ВНИИЭгазпром, 1990. – 59 с.

50. Пенкин, А. Л. Газовый аккумулятор в системе подачи природного газа в двигатель внутреннего сгорания / А. Л. Пенкин // Двигателестроение. – 2012 – № 1. – С. 23-26.

51. Рубан Д. П. Поліпшення показників техніко-експлуатаційних властивостей автобусів малого класу: дис. ... канд.. техн. наук: 05.22.02 / Д. П. Рубан; Нац. транспорт. ун-т. – К., 2012. – 145 с.

52. Мороз В.В. Математична модель дизеля для використання в системі водій–автомобіль–дорога // Системні методи керування, технологія, та організація виробництва, ремонту та експлуатації автомобілів: Науковий журнал НТУ, ТАУ. – 2003. – № 16 – С.147–151.

Двигун: **CY4102BZQ** Атмосферний тиск: 100791,432 кПа

Температура: 23^0 С

Паливо: Дл + газ (метан)

спов = 1.2
lo = 14.45
Vl = 3.8

Rпов= 287

n = 1150

№	n, хв-1	$M_к$, Н*м	$ДG_{пал}$, $см^3$	$ф_{пал}$, с.		$ДG_{пал}$, г.	$t_{вод}$, єС	$ДG_{газ}$, м3	$Ф_{газ}$, с	hp, Ом	Кут заслонки, град	Кут ПНВТ, град		hp, мм	N_e, кВт	$G_{пал}$, кг/ год	$G_{газ}$, кг/год	$g_{егаз}$, г/кВт*год
1	***1150***	***10***	5	3хв.45,53	***13***	4,3	70	0,01	5,86	10,56	30	4			1,2	0,069	4,11	
2	1150	50	5	1хв.24,91		4,3	69	0,01	5,42	10,5	30	5			6,02	0,182	4,44	
3	1150	100	5	1хв.03,21		4,3	70	0,01	5,14	10,54	29	7			12,04	0,245	4,69	
4	***1150***	***155***	10	43,26	7	8,6	70	0,01	5,15	10,52	36	9			18,66	0,716	4,68	
5	1150	200	10	42,17		8,6	70	0,1	53,04	10,92	38	10			24,08	0,734	4,55	
6	1150	250	20	42,16		17,2	75	0,1	50,20	10,86	42	9			31,1	1,468	4,8	
7	***1150***	***300***	40	23,66	12	17,2	84	0,1	46,48	11,63	40	25			36,12	2,617	5,18	

n = 1325

№	n, хв-1	$M_к$, Н*м	$ДG_{пал}$, $см^3$	$ф_{пал}$, с		$ДG_{пал}$, г.	$t_{вод}$, єС	$ДG_{газ}$, м3	$Ф_{газ}$, с	hp, Ом	Кут заслонки, град	Кут ПНВТ, град		hp, мм	N_e, кВт	$G_{пал}$, кг/ год	$G_{газ}$, кг/год	$g_{егаз}$, г/кВт*год
1	1325	10	5	1хв.39,52		4,3	65	0,01	4,68	10,55	32	9			1,38	0,155	5,07	
2	1325	50	5	1хв.10,54		4,3	65	0,01	4,31	10,57	32	10			6,93	0,219	5,51	
3	***1325***	***82***	5	1хв.1,63	4	4,3	66	0,01	4,27	10,56	38	10			11,37	0,251	5,56	
4	1325	150	5	42,79		4,3	67	0,01	4,16	10,55	43	12			20,8,	0,361	5,71	
5	***1325***	***227***	10	29,04	3	8,6	68	0,01	4,11	10,54	45	13			31,49	1,066	5,78	
6	1325	250	10	27,21		8,6	68	0,01	4,0	10,51	45	14			34,68	1,137	5,94	
7	1326	300	20	22,12		17,2	70	0,01	3,94	10,54	50	17			41,62	2,799	6	

n = 1500

№	n, хв-1	$M_к$, Н*м	$ДG_{пал}$, $см^3$	$ф_{пал}$, с		$ДG_{пал}$, г.	$t_{вод}$, єС	$ДG_{газ}$, м3	$Ф_{газ}$, с	hp, Ом	Кут заслонки, град	Кут ПНВТ, град		hp, мм	N_e, кВт	$G_{пал}$, кг/ год	$G_{газ}$, кг/год	$g_{егаз}$, г/кВт*год
1	***1500***	***10***	5	1хв.41,2	9	4,3	74	0,01	3,93	10,50	49	16			1,57	0,153	6,14	
2	1500	50	5	1хв.41,12		4,3	71	0,01	3,92	10,47	49	16			7,85	0,153	6,15	
3	1500	100	5	1хв.17,48		4,3	72	0,01	3,69	10,48	49	16			15,7	0,199	653	
4	***1500***	***155***	10	47,27	5	8,6	73	0,01	3,25	10,47	40	18			24,34	0,654	7,33	
5	1500	200	20	59,9		17,2	75	0,01	3,27	10,46	42	19			31,41	1,033	7,37	
6	1500	250	20	49,72		17,2	75	0,01	3,26	10,42	48	20			39,26	1,245	7,4	
7	***1500***	***310***	20	24,26	8	17,2	80	0,01	2,71	10,44	50	22			47,12	2,552	8,89	

n = 1675

№	n, хв-1	$M_к$, Н*м	$ДG_{пал}$, $см^3$	$ф_{пал}$, с		$ДG_{пал}$, г.	$t_{вод}$, єС	$ДG_{газ}$, м3	$Ф_{газ}$, с	hp, Ом	Кут заслонки, град	Кут ПНВТ, град		hp, мм	N_e, кВт	$G_{пал}$, кг/ год	$G_{газ}$, кг/год	$g_{егаз}$, г/кВт*год
1	1675	10	5	1хв.29,25		4,3	83	0,01	3,54	10,38	45	19			1,75	0,173	6,8	
2	1675	50	5	1хв.08,3		4,3	77	0,01	3,27	10,35	48	20			8,76	0,226	7,37	
3	***1675***	***82***	5	48,52	2	4,3	75	0,01	3,44	10,36	48	21			14,38	0,319	7,01	
4	1675	150	10	40,15		8,6	75	0,01	3,21	10,36	50	23			26,3	0,771	7,51	
5	***1675***	***227***	10	32,95	1	8,6	76	0,01	2,96	10,39	49	23			39,8	0,939	8,15	
6	1675	250	20	35,34		17,2	77	0,01	2,8	10,45	54	24			43,8	1,752	8,6	
7	1675	300	20	20,23		17,2	80	0,01	2,73	10,83	54	26			52,61	3,06	8,83	

n = 1850

№	n, хв-1	$M_к$, Н*м	$ДG_{пал}$, $см^3$	$ф_{пал}$, с		$ДG_{пал}$, г.	$t_{вод}$, єС	$ДG_{газ}$, м3	$Ф_{газ}$, с	hp, Ом	Кут заслонки, град	Кут ПНВТ, град		hp, мм	N_e, кВт	$G_{пал}$, кг/ год	$G_{газ}$, кг/год	$g_{егаз}$, г/кВт*год
1	***1850***	***10***	5	1хв.15,15	11	4,3	80	0,01	3,2	10,14	52	22			1,9	0,205	7,42	
2	1850	50	5	41,21		4,3	74	0,01	3,06	10,15	53	24			9,68	0,375	7,76	
3	1850	100	5	40,74		4,3	75	0,01	3,03	10,16	62	25			19,37	0,379	7,84	
4	***1850***	***155***	10	32,66	6	8,6	74	0,01	2,82	10,17	62	26			30,02	0,947	8,4	

5	1850	200	10	30,25		8,6	71	0,1	27,05	10,17	61	27			38,7	1,023	8,78	
6	1850	250	10	33		8,6	74	0,1	26,69	10,15	60	28			48,4	0,938	8,9	
7	***1850***	***300***	20	32	10	17,2	75	0,1	25,1	10,15	55	29			58,12	2250	9,46	

Атмосферний тиск: 756мм.рт.ст. =

Двигун: **CY4102BZQ** 100791,432 кПа

спов = 1.15

Температура: +23^0 С Io = 14.45

Vl = 3.8

Паливо: Дл + газ(метан) Rпов= 287

№	n, хв-1	$M_к$, Н*м	ДG$_{пал}$, см^3	ф$_{пал}$, хв.	ДG$_{пал}$, кг/год.	ДG$_{пал}$, г.	t$_{вод}$, єС	ДG$_{газ}$, м3	Ф$_{газ}$, с	hp, Ом	Кут заслонки, град	Кут ПНВТ, град		hp, мм	N_e, кВт	G$_{пал}$, кг/ год	G$_{газ}$, кг/год	g$_{епал}$, г/кВт *год
1	900	0	20	0хв57,55	1,075	17,2	62	0,01	22,82	11,25	0	0						
2	1000	0																
3	1125	0	10	1хв.24,39	0,367	8,6	65	0,01	8,47	10,98	10	0						
4	1300	0	10	2хв.11,51	0,235	8,6	64	0,1	60,96	10,72	18	8						
5	1500	0	5	1хв.18,99	0,196	4,3	65	0,1	42,53	10,72	12	12						
6	1750	0	10	1хв.26,12	0,360	8,6	66	0,1	32,26	10,40	10	20						
7	2000	0	5	1хв.44,55	0,148	4,3	67	0,01	7,12	10,32	44	22						

Додаток Б

Значення показників паливної економічності та токсичності дизеля CY4102BZLQ при порівнянні за правилами R 49 ЄЕК ООН

Таблиця Б1 – Показники оцінки роботи дизеля CY4102BZLQ за правилами R 49 ЄЕК ООН

№ п/п	$n_д$, хв$^{-1}$	N_e, кВт		CO, %		C_mH_n, млн$^{-1}$		NO_x, млн$^{-1}$		D, %	$G_{пал}$, кг/год		$G_{пов}$, кг/год		k
		Біогаз	ДП	Біогаз	ДП	Біогаз	ДП	Біогаз	ДП	ДП	Біогаз	ДП	Біогаз	ДП	
1	750	0	0	1,5	0,1	850	103	10	105	8	1,7	1,6	29,24	229,3	0,083
2	1400	4,2	4,02	1,1	0,039	455	70,5	300	313,6	2,09	3,27	2,4	56,9	229,1	0,08
3	1400	10,45	10,15	0,4	0,022	200	50,7	525	532	2,8	3,6	3,7	81,5	228,9	0,08
4	1400	20,9	20,1	0,05	0,036	154	84	770	848	9,9	4,7	5,9	124,5	228,6	0,08
5	1400	31,35	30,15	0,045	0,103	110	199	950	1105	24,6	7,62	8,3	164,9	228,3	0,08
6	1400	41,48	40,2	0,3	0,223	95	397	920	1302	46,9	10,42	10,7	192,7	228,0	0,25
7	750	0	0	1,5	0,1	850	103	10	105	8	1,7	1,6	29,24	229,3	0,083
8	2200	57	55,1	0,038	0,15	90	295	1150	1280	21	14,03	12,3	253,8	283,6	0,10
9	2200	42,75	41,33	0,043	0,07	130	159	850	1064	8,8	10,77	9,8	202,5	283,9	0,02
10	2200	28,5	27,05	0,05	0,028	150	83	760	805	1,49	7,96	7,3	162,5	284,1	0,02
11	2200	14,25	13,8	0,45	0,025	170	67,6	570	502	0,6	5,66	4,8	111,6	284,4	0,02
12	2200	5,7	5,51	1,2	0,042	190	87,2	300	298,3	1,19	4,53	3,4	79,42	284,5	0,02
13	750	0	0	1,5	0,1	850	103	10	105	8	1,7	1,6	29,24	229,3	0,083

Таблиця Б2 – Результати розрахунку витрат палива та питомих викидів шкідливих речовин дизеля за правилами R 49 ЄЕК ООН (г/кВт·год)

№ п/п	$k \cdot N_e$, кВт		mCO		$k \cdot mCO$		$m\ C_mH_n$		$k \cdot m\ C_mH_n$		mNO_x		$k \cdot mNO_x$		mD	$k \cdot mD$	g_n, МДж/ кВт год	
	Біогаз	ДП	Біогаз	ДП	Біогаз	ДП	Біогаз	ДП	Біогаз	ДП	Біогаз	ДП	Біогаз	ДП	ДП	ДП	Біогаз	ДП
1	0	0	400,49	132,04	33,24	10,96	13,01	7,83	1,08	0,65	0,438	22,77	0,036	1,89	0,77	0,064	-	-
2	0,336	0,322	571,91	85,62	45,75	6,85	13,56	8,87	1,08	0,71	25,61	113	2,049	9,04	0,087	0,007	37,9	25,3
3	0,836	0,812	301,97	48	24,15	3,84	8,65	6,37	0,69	0,51	65,08	190,62	5,2	15,25	0,15	0,012	16,7	15,4
4	1,672	1,608	58,04	77,62	4,64	6,21	10,25	10,37	0,82	0,83	146,78	300,37	11,74	24,03	1,937	0,155	10,9	12,4
5	2,508	2,412	68,59	219,62	5,48	17,57	9,61	24,37	0,76	1,95	237,8	387	19,02	30,96	11,83	0,947	11,8	11,7
6	10,45	10,05	530,1	469,72	132,5	117,4	9,62	47,96	2,4	11,99	333,69	450,4	83,42	112,6	42,52	10,63	12,1	11,3
7	0	0	400,49	132,04	33,24	10,96	13,01	7,83	1,08	0,65	0,43	22,77	0,036	1,89	0,77	0,064	-	-
8	5,7	5,51	88,32	3,94	8,83	39,44	11,99	44,5	1,19	4,45	458,04	552,2	45,8	55,22	10,64	1,064	11,9	9,4
9	3,42	3,306	79,91	743,5	1,59	14,87	13,85	98	0,27	1,94	706	1852,5	14,12	37,05	7,55	0,151	9,1	10,1
10	2,28	2,164	74,89	300,5	1,49	6,01	12,88	51	0,25	1,02	447	1413	8,984	28,26	0,2	0,004	13,6	11,4
11	1,14	1,104	462,1	270,5	9,24	5,41	10	41,5	0,2	0,83	250,5	885,5	5,01	17,71	0,05	0,001	19,3	14,7
12	0,456	0,441	871,22	457,5	17,42	9,15	7,91	54,5	0,15	1,09	85,5	528	1,71	10,56	0,15	0,003	38,7	26,2
13	0	0	400,49	132,04	33,24	10,96	13,01	7,83	1,08	0,65	0,438	22,77	0,036	1,89	0,77	0,064	-	-