

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ЖИТОМИРСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРОЕКОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

**БІОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ В АГРАРНОМУ
ВИРОБНИЦТВІ**

Навчальний посібник

За редакцією доктора технічних наук,
професора Голуба Г.А.

**Київ
НУБіП України
2016**

УДК 620.92:631.371
ББК 40.74Я73
Б63

Рекомендовано вченою радою Національного університету біоресурсів і природокористування України (протокол № 8 від 4 грудня 2016 р.) та вченою радою Житомирського національного агроекологічного університету (протокол № 7 від 30 березня 2016 р.) як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів зі спеціальностей 208 – агроінженерія та 133 – галузеве машинобудування

Рецензенти:

Мироненко В.Г. – доктор технічних наук, професор, заступник директора ННЦ "ІМЕСГ" НААН України;

Войтюк В. Д. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технічного сервісу та інженерного менеджменту ім. М.П. Момотенка;

Грабар І. Г. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри процесів, машин і обладнання ЖНАЕУ.

Б63 Голуб Г.А., Кухарець С.М. О.А. Марус, М.Ю. Павленко, К.М. Сєра, В.В. Чуба. Біоенергетичні системи в аграрному виробництві. – К.: НУБіП України, 2016. – 226 с.

ISBN 978-

Навчальний посібник розроблено на основі останніх досягнень та результатів науково-дослідних робіт. Він містить актуальні узагальнення щодо конструкції, розрахунку та експлуатації біоенергетичних систем в аграрному виробництві. Серед них основні поняття щодо біоенергетичних систем в аграрному виробництві, основи виробництва і використання дизельного біопалива, біоетанолу, виробництва біогазу, використання біогазу на теплові потреби та для отримання електроенергії, механізації заготівлі соломи для енергетичного використання та виробництва енергетичних культур.

**УДК 620.92:631.371
ББК 40.74Я73**

ISBN 978-

- © Г.А. Голуб, С.М. Кухарець, О.А. Марус, М.Ю. Павленко, К.М. Сєра, В.В. Чуба, 2016
- © Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2016
- © Житомирський національний агроекологічний університет, 2016

ЗМІСТ

1. БІОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ В АГРАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ, ТЕРМІНИ І ВИЗНАЧЕННЯ	7
1.1. Роль енергоресурсів у виробництві та житлово-комунальному господарстві	7
1.2. Споживання енергоресурсів у аграрному виробництві	8
1.3. Об'єкти біоенергетичних систем в АПК	10
1.4. Термінологія щодо базових об'єктів біоенергетичних систем в аграрному виробництві	11
1.5. Концепція диверсифікованого виробництва сільськогосподарської продукції та біопалива в агроекосистемах	12
1.6. Встановлення граничних обсягів сировини для виробництва біопалива в агроекосистемах	15
Лабораторна робота 1: Визначити економічну ефективність функціонування агроекосистеми з виробництва енергії на основі біологічних видів палива.	17
Практична робота 1: Визначити обсяг соломи, яку можна використати для теплових потреб.	21
2. ОСНОВИ ВИРОБНИЦТВА ДИЗЕЛЬНОГО БІОПАЛИВА	26
2.1. Технологія агропромислового виробництва олії та дизельного біопалива	26
2.2. Оцінка сировинної бази агропромислового виробництва дизельного біопалива при двохступінчатому віджиманні рослинної олії	28
2.3. Технічне забезпечення виробництва дизельного біопалива	31
2.4. Теоретичні основи виробництва дизельного біопалива	45
2.5. Економічна ефективність виробництва дизельного біопалива	47
Лабораторна робота 2: Ознайомитися з конструкцією гідромеханічної мішалки для виробництва дизельного біопалива та визначити її параметри.	49
Практична робота 2: Розрахувати вартість олії гарячого віджимання для використання при виробництві дизельного біопалива, а також необхідні обсяги метилату калію (метилового ефіру й гідроокислу калію) та вихід дизельного біопалива із однієї тони олії.	51
3. ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ДИЗЕЛЬНОГО БІОПАЛИВА	57

3.1. Основні властивості дизельного біопалива на основі рослинних олій як моторного палива	57
3.2. Експлуатаційні параметри роботи дизельного двигуна при застосуванні дизельного біопалива	60
3.3. Кінематична в'язкість дизельного біопалива	63
3.4. Підвищення ефективності використання дизельного біопалива	65
3.5. Виробнича перевірка роботи МТА із застосуванням системи двоступеневого підігріву дизельного біопалива	73
3.6. Організаційні аспекти використання дизельного біопалива	75
3.7. Економічна ефективність використання дизельного біопалива	77
Лабораторна робота 3: Визначити розхід палива при роботі дизельного двигуна на дизельному паливі та дизельному біопаливі.	79
Практична робота 3: Визначити річну потребу в дизельному біопаливі та розрахувати економічну ефективність застосування дизельного біопалива при роботі МТА.	82
4. ОСНОВИ ВИРОБНИЦТВА БІОЕТАНОЛУ	88
4.1. Загальні відомості про біоетанол	88
4.2. Сировина база та основи процесу виробництва біоетанолу	91
4.3. Основи біотехнологічного процесу отримання біоетанолу	93
4.4. Технологічні схеми виробництва біоетанолу	95
4.5. Отримання біоетанолу із целюлозовмістних матеріалів	98
4.6. Технічна реалізація виробництва біоетанолу	100
Лабораторна робота 4: Визначити вміст біоетанолу в складі сумішевого бензину А-95 біо.	102
Практична робота 4: Розрахувати техніко-економічні показники виробництва біоетанолу та визначити обсяги сировини й необхідну площу для повного заміщення бензину, що споживається в аграрному виробництві.	104
5. ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ БІОЕТАНОЛУ	108
5.1. Основні властивості біоетанолу як моторного палива	108
5.2. Світовий досвід використання біоетанолу	110
5.3. Перспективи використання біоетанолу в Україні	112

5.4. Використання біоетанолу, як палива для двигунів внутрішнього згоряння	113
5.5. Дослідження роботи двигуна MeM3-245 на паливних сумішах з біоетанолом	117
Лабораторна робота 5: Визначити розхід палива при роботі ДВЗ на суміші бензину із біоетанолом (E10).	120
Практична робота 5: Розрахувати економічну ефективність заміщення бензину біоетанолом.	123
6. ОСНОВИ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ	127
6.1. Сучасні тенденції розвитку технологій видалення та використання гною	127
6.2. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок	130
6.3. Аналіз метаноутворення в біогазових установках	137
6.4. Кінетика зброджування органічної маси в біогазових установках	141
6.5. Розрахунок питомого виходу біометану	143
Лабораторна робота 6: Визначення параметрів похилого транспортера для зневоднення біомаси при підготовці до аеробного та анаеробного зброджування	145
Практична робота 6: Розрахувати основні технологічні параметри біогазової установки для зброджування гною.	147
7. ВИРОБНИЦТВО ТА ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗУ НА ТЕПЛОВІ ПОТРЕБИ	152
7.1. Енергетичні параметри та конструкція біогазової установки з обертовим реактором	152
7.2. Технологічний процес отримання біогазу за допомогою біогазової установки з обертовим біореактором	155
7.3. Отримання теплової енергії на основі біогазу	158
7.4. Собівартість виробництва біометану в аграрному виробництві	163
Лабораторна робота 7: Визначення потужності обертового реактора біогазової установки в залежності від рівня занурення барабана у воду.	165
Практична робота 7: Визначити собівартість виробництва біометану при анаеробному зброджуванні гноївки скотарських та свинарських ферм.	166
8. ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗУ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	170

8.1. Виробництво біометану. Очищення та збагачення біогазу	170	
8.2. Когенераційні установки		176
8.3. Техніко-економічна оцінка виробництва електроенергії на основі біометану		178
Лабораторна робота 8: Визначення зміни температури біомаси упродовж встановленого проміжку часу та витрат енергії на її нагрів під час аеробного та анаеробного зброджування у біогазовій установці проточного типу.		182
Практична робота 8: Визначити собівартість виробництва електроенергії на основі біометану при анаеробному зброджуванні гноївки скотарських та свинарських ферм.		185
9. МЕХАНІЗАЦІЯ ЗАГОТІВЛІ СОЛОМИ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ	188	
9.1. Загальна структура енергетичного використання соломи зернових культур		188
9.2. Термінологія щодо заготівлі соломи для енергетичного використання		190
9.3. Технологія заготівлі соломи		190
9.4. Технології виробництва паливних гранул та брикетів		195
9.5. Використання котлів для спалювання соломи		200
Лабораторна робота 9: Визначення параметрів роботи твердопаливного котла при спалюванні рослинної біомаси.		205
Практична робота 9: Розрахувати теплоту згоряння соломи в залежності від хімічного складу і вологості.		207
10. ВИРОБНИЦТВО ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР	212	
10.1. Огляд основних енергетичних культур		212
10.2. Механізація вирощування та збирання енергетичних культур	216	
Лабораторна робота 10.		221
Практична робота 10. Визначення оптимального географічного розташування підприємства із виробництва паливних гранул.		222

1. БІОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ В АГРАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ, ТЕРМІНИ І ВИЗНАЧЕННЯ

1.1. Роль енергоресурсів у виробництві та житлово-комунальному господарстві

Енергетичні ресурси в сучасних умовах необхідні, як для організації самого процесу виробництва так і для забезпечення потреб людей, що займаються цим виробництвом (рис. 1.1). Аграрне виробництво також неможливе без ефективного забезпечення енергоресурсами.



Рис. 1.1. Схема використання енергоресурсів у виробництві та житлово-комунальному господарстві

Якщо проаналізувати на споживання енергоресурсів в Україні загалом та окремо в аграрному виробництві (табл. 1.1), то може зробити висновок, що сільськогосподарське виробництво споживає незначну частку цих ресурсів. Проте, споживання бензину знаходиться на рівні 5 % від його загального споживання, а споживання дизельного палива – на рівні 23,5 % від його загального споживання.

Необхідно зауважити, що за одиницю умовного палива (у.п.) приймалася теплотворна здатність 1 кг кам'яного вугілля, що становить 29,3 МДж або 7000 ккал.

Таблиця 1.1. Споживання енергетичних ресурсів у 2013 та 2014 рр.

Вид енергоресурсів	Спожито		Сільське, лісове та рибне господарство			
			від загальної кількості у %		в натуральних одиницях	
	2013 р.	2014 р.	2013 р.	2014 р.	2013 р.	2014 р.
Усього, млн. т умовного палива	165,7	127,4	1,9	2,2	3,15	2,80
Вугілля, млн. т	71,3	53,9	0,1	0,2	0,0713	0,1078
Газ природний, млрд. м ³	49,7	38,6	1,1	1,0	0,5467	0,3860
Бензин моторний, тис. т	4021,8	3106,1	4,6	4,9	185,0	152,2
Паливо дизельне, тис. т	6165,2	5437,3	22,1	23,5	1362,5	1277,8
Дрова для опалення, тис. м ³	2892,5	2916,6	6,4	6,4	185,12	186,66
Електроенергія, млн. кВт. год.	183732	171507	1,6	1,7	2906	2940

Міжнародне енергетичне агентство (ІЕА) за одиницю умовного палива приймає нафтовий еквівалент, звичайно позначуваний аббревіатурою ТОЕ (англ. Tonne of oil equivalent). Одна тонна нафтового еквівалента дорівнює 41,868 ГДж або 11,63 МВт год., або ж 10000 ккал.

1.2. Споживання енергоресурсів у аграрному виробництві

Якщо поглянути на динаміку споживання енергоресурсів у сільському господарстві (табл. 1.2) то останніми роками відбувається зростання споживання рідкого дизельного та твердого (дрова та вугілля) палива. Спостерігається зменшення використання природного газу та бензину. Споживання електроенергії залишається на стабільному рівні і залежить від сезонних чинників.

Серйозний вплив на ефективність сільськогосподарського виробництва мають наслідки подорожчання моторного палива (збільшення ціни палива на 1 грн./кг призводить до додаткових затрат в аграрному виробництві у розмірі

від 1,3 до 1,5 млрд. грн.). Дорожчає також газоподібне паливо. Так його ціна із 1390 грн/м³ на початок 2015 року зросте до прогнозованих 7670 грн/м³ на початок 2017 року.

Крім того, в зв'язку із ростом тарифів, значно зростають витрати на електроенергію спожиту в сільському господарстві (рис. 1.2).

Таблиця 1.2. Динаміка споживання енергоресурсів у сільському господарстві України

Ресурси	Роки														
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Дизельне паливо, тис. т	1821	1956	1834	1697	1687	1540	1154	1174	1233	1253	1201	1350	1319	1363	1278
Бензин, тис. т	506	1058	1077	971	976	888	317	299	289	216	232	224	204	185	152
Вугілля, млн. т	0,13	0,13	0,13	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,11
Газ природний, млрд. м ³	0,27	0,39	0,46	0,51	0,58	0,65	0,57	0,54	0,64	0,60	0,61	0,69	0,59	0,55	0,39
Дрова для опалення, тис. м ³	695	1050	1259	1171	1035	867	222	186	170	27	187	180	183	185	186
Електрична енергія, млн. кВт год.	–	–	–	–	–	2774	2814	3097	2916	2928	3054	2990	2829	2906	2940

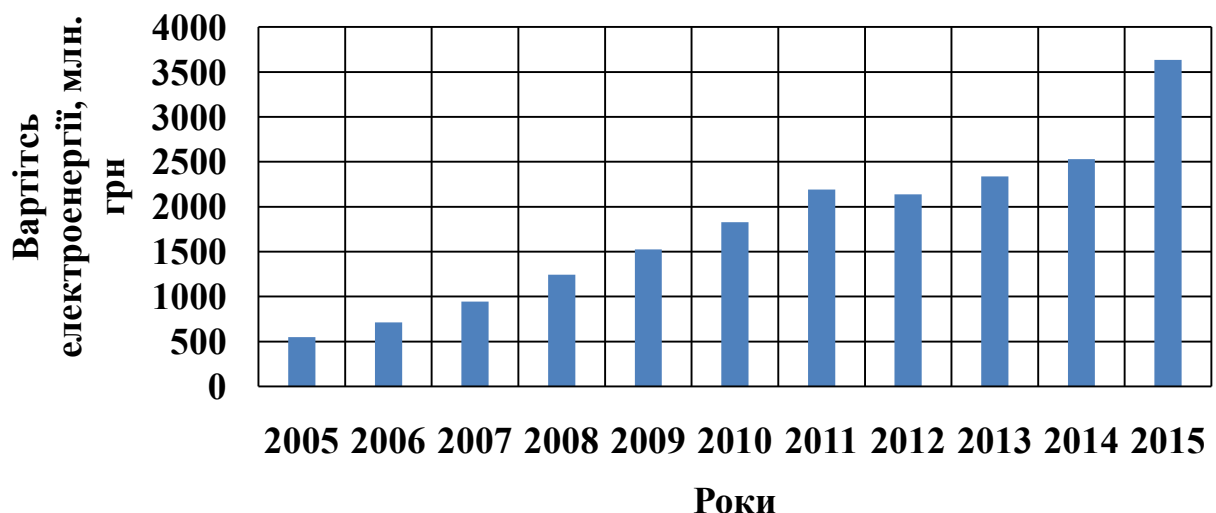


Рис. 1.2. Динаміка зміни вартості електроенергії спожитої у сільськогосподарському виробництві

Саме тому необхідно приділяти увагу розробці енергозберігаючих технологій та відповідної техніки, використанню відновлюваного рідкого,

твердого та газоподібного палива, впровадженню переробки сировини на місцевому рівні, оптимізації інфраструктури і транспортних послуг. Всі ці інноваційні зміни забезпечать додаткову прибутковість сільськогосподарського виробництва в умовах росту цін на енергетичні ресурси.

1.3. Об'єкти біоенергетичних систем в АПК

Зважаючи на те, що в країнах членах ЄС спостерігається особливо стрімкий розвиток біоенергетики, директивами Європейського Союзу заплановано в енергетичному балансі частку біомаси до 2020 року на рівні 20%.

В Україні також необхідний і доцільний розвиток виробництва і використання біопалива, що сприятиме підвищенню рівня енергетичної автономності та ефективності сільськогосподарського виробництва.

Розвиток виробництва і використання біопалива повинен здійснюватися в традиційних напрямках (рис. 1.3), а саме:

- виробництво і використання дизельного біопалива та біонафти;
- виробництво біоетанолу;
- виробництво і використання біогазу та піролізного газу (пірогазу);
- використання соломи та подрібненої деревини на теплові потреби, виробництво брикетів із незернових відходів та тирси.

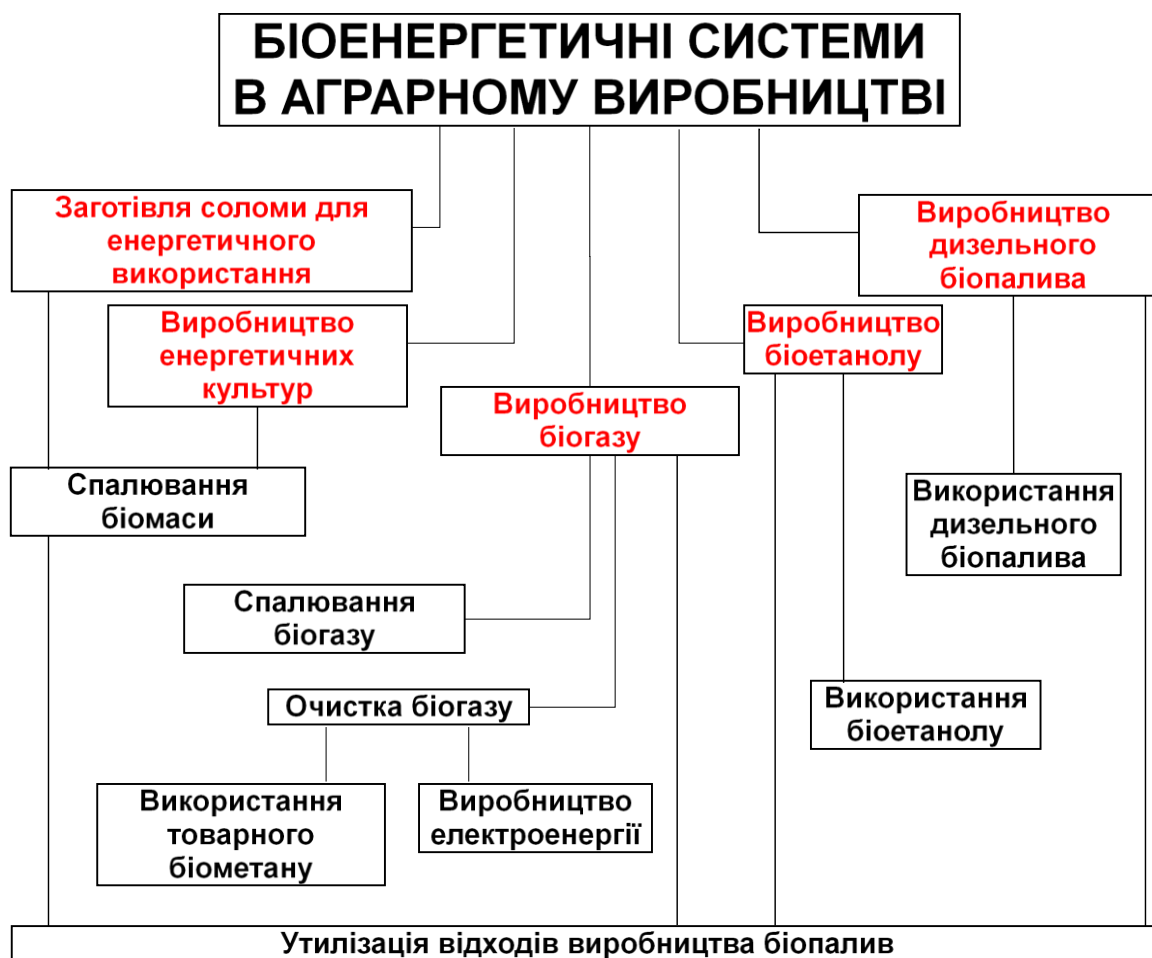


Рис. 1.3. Об'єкти біоенергетичних систем в аграрному виробництві

Очевидно, що на сучасному етапі перед людством постало декілька невідкладних проблем. Головні серед них – продовольча, енергетична та екологічна, розв’язання яких вимагає максимально ефективного збалансування харчових, сировинних та енергетичних потреб з можливостями агроєкосистем при одночасному акумулюванні сонячної енергії у вигляді гумусу та утриманні й розширенні біологічного різноманіття біоценозів. Комплексне вирішення цих проблем спрямоване на подолання протиріччя, коли збільшення виробництва продуктів харчування або виробництва та споживання енергії призводить до порушення екологічної рівноваги та погіршення стану навколишнього природного середовища.

1.4. Термінологія щодо базових об'єктів біоенергетичних систем в аграрному виробництві

Біоенергетика (bioenergy) – це наука про загальні закономірності перетворення енергії в живих системах (клітинах, організмах, екосистемах).

Технічна біоенергетика (technical bioenergy) – це наука про загальні закономірності виробництва та використання енергії (твердого, рідкого та газоподібного біопалива) із джерел біологічного походження. Технічна біоенергетика це один з напрямів природоохоронної біотехнології (environmental biotechnology), пов'язаний з ефективним використанням енергії фотосинтезу.

Біоенергетика аграрного виробництва (bioenergy agricultural production) – галузь енергетики, заснована на виробництві та використанні палива із біомаси сільськогосподарського походження.

Джерела енергії (power source) – матеріальні об'єкти, в яких зосереджена енергія, придатна для практичного використання. Енергетичні ресурси можна розподілити на *непоновлювані*: торф; вугілля; нафта; природний газ; радіоактивні елементи та *поновлювані*: тверда біомаса, біогаз; побутові та промислові відходи як паливо; енергія природних стихій.

Біомаса (biomass) – біологічно відновлювальна речовина органічного походження, що зазнає біологічного розкладу.

Енергетичні культури (energy crops) – це окремі види дерев та рослин, що спеціально вирощуються для виробництва твердого біопалива. Вони поділяються на три окремі групи: швидкоростучі дерева; багаторічні трави (міскантус та ін.); однорічні трави (сорго, тритикале). До енергетичних культур також належать традиційні сільськогосподарські культури, що вирощуються з метою виробництва дизельного біопалива (ріпак, соняшник), біоетанолу (кукурудза, пшениця) та біогазу (кукурудза).

Дизельне біопаливо (biodiesel) – метилові або етилові естери вищих органічних кислот, отриманих із рослинних олій або тваринних жирів.

Біоетанол (bioethanol) – спирт етиловий зневоднений, виготовлений з біомаси або спирту етилового-сирцю.

Біогаз (biogas) – газ, отриманий при анаеробному зброджуванні біомаси (гній, послід, силос, осад стічних вод, тверді побутові відходи). Основними компонентами біогазу є метан (40-60 %) та вуглекислий газ (30-45 %).

Безвідходне виробництво (cleaner production) – процес виробництва, який забезпечує комплекс операцій з повним використанням усіх компонентів сировини.

Біометан (biomethane) – газ отриманий в результаті видалення CO₂ і інших домішок із біогазу.

Когенерація (cogeneration) – це процес виробництва двох видів енергії одночасно, зокрема, електричної та теплової.

Когенераційна установка (cogeneration unit) – установка комбінованого виробітку теплової і електричної енергії.

Обертвий метантенк (rotary methane tank) – біореактор виконаний у вигляді горизонтального циліндра, який обертається в рідині навколо горизонтальної осі, опираючись на протилежно розміщені осьові цапфи.

1.5. Концепція диверсифікованого виробництва сільськогосподарської продукції та біопалива в агроекосистемах

Перспективною для України є концепція розвитку сільськогосподарського виробництва, яка виходить з того, що сільське господарство це екологічно безпечне, диверсифіковане (багатопрфільне) виробництво натуральних продуктів харчування із широким застосуванням органічних та помірним застосуванням мінеральних добрив, біологічних засобів захисту та сортів культур районуваних в Україні. Така концепція забезпечує: розвиток тваринництва, яке виконує роль переробної галузі для продуктів рослинництва, та є джерелом фінансових надходжень і робочих місць. При прийнятті такої концепції техніко-технологічне забезпечення аграрного виробництва повинно бути здійснено на базі вітчизняної техніки, яка має бути придбана за власні кошти фінансово стабільних сільськогосподарських підприємств при посильній участі держави.

Також буде забезпечено стабільний розвиток сільських територій, збільшення біологічного різноманіття в агроекосистемах, виробництво органічних продуктів харчування високої якості. У перспективі це призведе до фінансової стабілізації багатопрфільних сільськогосподарських підприємств, а відповідно і платежів у бюджет.

Відповідно до концепції екологічно безпечного, багатопрфільного сільськогосподарського виробництва, агроекосистема повинна мати такі структурні елементи, або напрямки виробництва: рослинництво, тваринництво та птахівництво, переробка та зберігання сільськогосподарської продукції, виробництво біопалива.

Як приклад вищезгаданої концепції розвитку на рис. 1.4. наведено структурну схему диверсифікованого виробництва продукції з біоенергоконверсією органічної сировини для 6-пільної сівозміни загальною площею 300 га.

Представлена схема передбачає:

- вирощування польових культур сівозміни з виробництвом зерна та цукрових буряків;
- збирання соломи зернових культур та стебел ріпаку;
- залишення подрібнених стебел кукурудзи на полі у вигляді мульчі;
- виробництво кормів для птахівництва, свинарства або скотарства;
- виробництво продуктів птахівництва, свинарства або скотарства;
- метанове (анаеробне) зброджування гною або посліду з виробництвом тепла та електроенергії з біогазу;
- підготовку і використання соломи зернових культур та стебел ріпаку на теплові потреби у вигляді брикетів, рулонів або січки;
- використання соломи зернових культур, стебел ріпаку та зброженого гною або посліду для виробництва компосту;
- виробництво субстрату для вирощування печериць або гливи та виробництво грибів;
- виробництво біодизельного палива з ріпакового насіння;
- використання гліцеринового осаду на теплові потреби або його анаеробне зброджування.

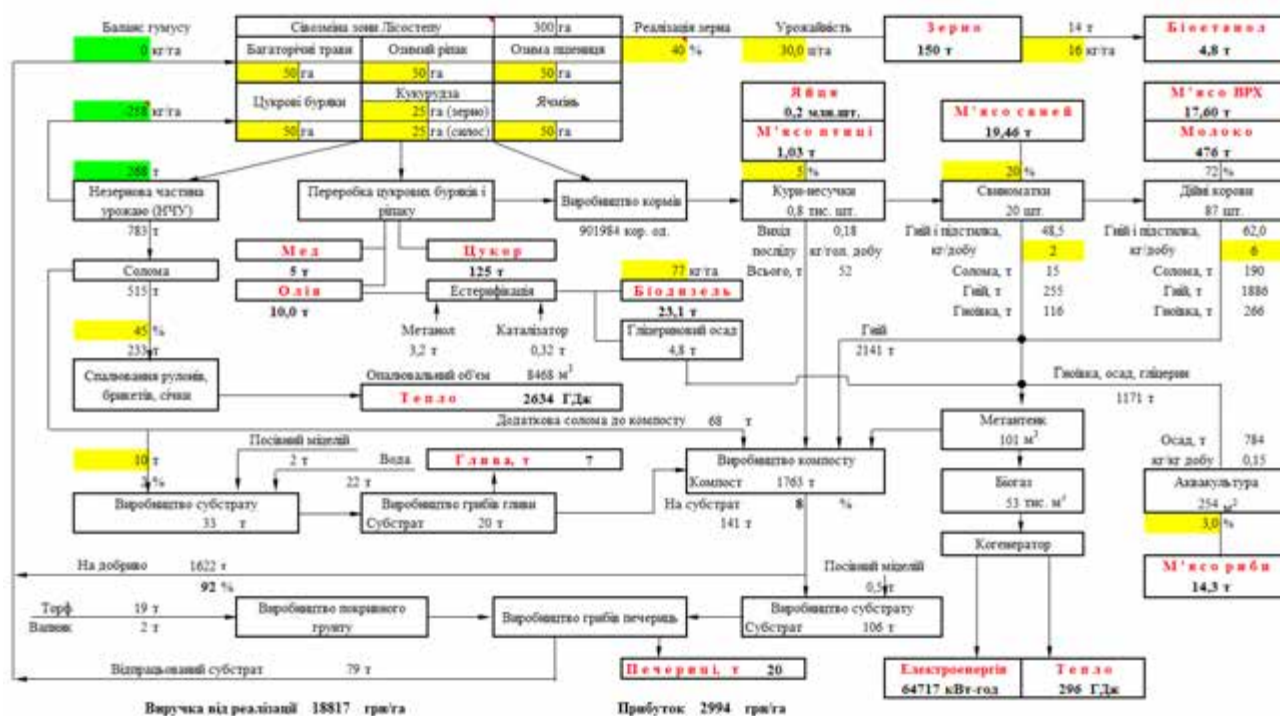


Рис. 1.4. Структурна схема диверсифікованого виробництва сільськогосподарської продукції та біопалива в агроекосистемах

Спалювання соломи забезпечує одержання енергії, яка може бути використана для обігріву птахівничих, тваринницьких та адміністративних приміщень, а також сушіння зерна. Зброджування гною та пташиного посліду потребує облаштування метантенків та забезпечує виробництво біогазу. Використання когенераційної установки, що працює на біогазі, дає змогу

отримати 26 % електроенергії та 66 % теплоенергії загальної енергетичної цінності біогазу. Одержана електроенергія може бути використана для роботи біогазової установки та інших потреб. Теплова енергія у вигляді нагрітої води може бути використана для опалення та гарячого водопостачання.

Споживання рідкого палива сільськогосподарським виробництвом становить від 50 до 110 л/га, в тому числі бензину від 10 до 30 л/га. Відведення одного з полів сівозміни під вирощування ріпаку дасть змогу в розрахунку на один гектар, виробити від 100 до 110 л біодизельного палива, а оскільки ріпак є прекрасним медоносом – ще й близько 5 тон меду. Залежно від ситуації на ринку ріпакового насіння та дизельного палива господарство може прийняти рішення як про реалізацію насіння ріпаку і закупку дизельного пального, так і виробництво біодизельного палива або ж прийняти інше компромісне рішення. Під час виробництва біодизельного палива утворюється гліцериновий осад, який доцільно використовувати як рідке паливо в теплових процесах, що забезпечить виробництво додаткової енергії.

Широка мережа спиртових заводів дає можливість забезпечувати виробництво біоетанолу в достатніх обсягах для роботи автомобільного транспорту у сільському господарстві. Потреба в зерні для виробництва біоетанолу не перевищує 10 % загального обсягу реалізованого або 4 % обсягу виробленого в агроценозі зерна.

Залучення в енергетичний баланс біологічних видів палива як поновлюваних ресурсів акумульованої сонячної енергії є одним із актуальних завдань сьогодення. Однак поширення використання біологічних енергоресурсів – доволі складний процес, що потребує додаткових витрат для надання їм споживчих якостей. Споживачі палива технологічно та технічно налаштовані впродовж останнього сторіччя на використання концентрованих неоновлюваних джерел енергії. Для переходу до використання поновлюваних біологічних енергоресурсів необхідні значні капітальні витрати, однак щорічний дефіцит палива для виконання основних польових робіт та необхідність збереження природного середовища потребують зосередження зусиль на розробці методів та технічних засобів для забезпечення енергоавтономності сільськогосподарського виробництва.

Проте, використання енергетичного потенціалу біомаси обмежено відсутністю агропромислових технологій отримання енергії та відповідної техніки і обладнання, які адаптовані до умов функціонування конкретних агроєкосистем (табл. 1.3). Причому, необхідно враховувати, що зменшення витрат енергії, збільшення продуктивності відповідних машин та обладнання, їх показників надійності й відповідності агротехнічним вимогам є основними напрямками удосконалення засобів механізації і обладнання в технологічних процесах сільськогосподарського виробництва.

Процеси, машини та обладнання для отримання енергії із сільськогосподарської сировини повинні базуватись на безвідходних циклах виробництва, що засновані на комплексному використанні природно-сировинних ресурсів.

Крім того, важливо формалізувати та оцінити, який вплив на

ефективність агроєкосистеми здійснюють обсяги сировини, що використовується в якості енергетичних ресурсів.

1.6. Встановлення граничних обсягів сировини для виробництва біопалива в агроєкосистемах

Для твердого біопалива потенціал сировини рослинного походження становитиме:

$$CE = \sum_{I=1}^n s_I u_I \left(k_{III}^I - (k_{III}^{IB} + k_K^I) - \sum_{J=1}^M N_J T_J m_{II}^J \right), \quad (1.1)$$

Таблиця 1.3. Механіко-технологічні особливості виробництва біопалива та отримання енергії в агроєкосистемах

Переваги	Проблеми
Виробництво біогазу	
<ul style="list-style-type: none"> – виробництво поновлюваної енергії; – виробництво екологічно чистих органічних добрив; – покращення санітарно-епідеміологічного стану довкілля; – широка різноманітність сировини, яка може застосовуватися для роботи біогазових установок. 	<ul style="list-style-type: none"> – розшарування маси субстрату, що значно знижує ефективність виділення метану; – високі енерговитрати на перемішування субстрату.
Отримання теплової енергії	
<ul style="list-style-type: none"> – виробництво поновлюваної енергії; – наявність великого ресурсного потенціалу сировини доступної для конверсії у теплову енергію. 	<ul style="list-style-type: none"> – відсутня структура технологічного процесу конверсії (спалювання чи переробки) незернової частини врожаю – соломи; – відсутні технічні засоби для дрібнотоварного спалювання соломи; – не вирішені проблеми рівномірності згоряння соломи в топці котла.
Виробництво дизельного біопалива	
<ul style="list-style-type: none"> – виробництво екологічно чистого палива для дизельних двигунів; – наявність великого ресурсного потенціалу для виробництва дизельного біопалива. 	<ul style="list-style-type: none"> – складність технологій отримання дизельного біопалива; – існуюче обладнання не забезпечує необхідну ефективність протікання реакції метанолізу; – високі енергозатрати на перемішування емульсії.

де CE – вихід із сівозміни біомаси (соломи) придатної для енергетичних потреб, т; n – кількість культур в сівозміні; s_I – площа виділена під вирощування i -ї культури, га; u_I – урожайність i -ї культури, т/га; k_K^I – коефіцієнт надходження побічної продукції на компостування; k_{III}^I – коефіцієнт

виходу побічної продукції i -ї культури; k_{III}^{IB} – коефіцієнти, що враховує обсяг побічної продукції, що залишається на полі після збирання i -ї культури; N_j – поголів'я тварин та птиці j -го виду; T_j – стійловий період поголів'я тварин та птиці j -го виду, дїб; m_{II}^j – кількість соломи для підстилки для j -го виду тварин та птиці, кг/голову за добу, т.

Потенціал для виробництва біогазу:

$$BE = k_{BF} k_{BY} \sum_{J=1}^M N_J T_J (m_E^J + m_B^J + m_{II}^J), \quad (1.2)$$

де BE – вихід біогазу, m^3 ; k_{BF} – коефіцієнт виходу газу в біогазових установках, m^3/t ; k_{BY} – коефіцієнт використання гною в біогазових установках; m_E^J – маса екскрементів j -го виду тварин та птиці, кг/голову за добу, т; m_B^J – маса вологи, що надходить в екскременти j -го виду тварин та птиці, кг/голову за добу, т.

Потенціал для виробництва генераторного газу:

$$GE = \sum_{I=1}^{\Pi} k_{BIT}^I s_I u_I \left(k_{III}^I - (k_{III}^{IB} + k_K^I) - \sum_{J=1}^M N_J T_J m_{II}^J \right), \quad (1.3)$$

де GE – вихід генераторного газу, m^3 ; k_{BIT}^I – коефіцієнт виходу генераторного газу i -ї культури.

Потреби агроєкосистеми в дизельному біопаливі та біоетанолі можна задати виходячи із питомих витрат відповідних видів палива на 1 га ріллі та встановити площу вирощування культур, для забезпечення сировиною для відповідного виду палива:

$$s_D = \frac{N_D \sum_{I=1}^{\Pi} s_I}{u_D k_{BKD} k_{BD}}, \quad (1.4)$$

де s_D – площа необхідна для вирощування культури, що забезпечить агроєкосистему сировиною для виробництва дизельного біопалива, га; N_D – норма витрат дизельного біопалива, т/га; u_D – урожайність культури придатної для виробництва дизельного біопалива, т/га; k_{BKD} – коефіцієнт використання культури для виробництва дизельного біопалива; k_{BD} – коефіцієнт виходу дизельного біопалива;

$$s_E = \frac{EE}{u_E k_{BKE} k_{BE}}, \quad (1.5)$$

де s_E – площа необхідна для вирощування культури що забезпечить агроєкосистему сировиною для виробництва біоетанолу, га; EE – потреба в біоетанолі, т; u_E – урожайність культури придатної для виробництва

біоетанолу; т/га; k_{BKE} – коефіцієнт використання культури для виробництва біоетанолу; k_{BE} – коефіцієнт виходу біоетанолу.

Так, наприклад на основі існуючих показників, що характеризують сільськогосподарське виробництво України загалом упродовж останніх років, встановлено, що середнє значення граничних обсягів соломи, яку можна використати на теплові потреби у відсотках до загальної кількості соломи, має наступний вигляд:

$$C^{\%} = -0,57D + 48,66 \quad (1.6)$$

де $C^{\%}$ – граничний обсяг соломи від загальної кількості, яку можна використати на теплові потреби, %; D – річний дефіцит гумусу, кг/га.

Слід зазначити, що при загальному дефіциті гумусу в межах від 80 до 90 кг/га, використовувати солому на теплові потреби уже неможливо із умови збереження родючості ґрунтів. Граничний обсяг соломи, яку можна використати на теплові потреби, при нульовому балансі гумусу, становить близько 50 %.

Таким чином, розвиток виробництва і використання біоенергетичних систем в АПК повинен бути направлений на виробництво і використання дизельного біопалива та біонафти, виробництво біоетанолу, виробництво і використання біогазу та піролізного газу (пірогазу), використання соломи та подрібненої деревини на теплові потреби, виробництво брикетів із незернових відходів та тирси.

Процеси, машини та обладнання для отримання енергії із сільськогосподарської сировини повинні базуватись на безвідходних циклах виробництва, що засновані на комплексному використанні природно-сировинних ресурсів.

Лабораторна робота 1: Визначити економічну ефективність функціонування агроєкосистеми з виробництва енергії на основі біологічних видів палива.

Мета роботи. Встановити величину фінансових надходжень в агроєкосистемі із виробництвом біопалив.

Лабораторне обладнання. Комп'ютерна імітаційна модель функціонування сільськогосподарського виробництва, що включає в себе, виробництво продукції рослинництва, тваринництва та грибовництва, виробництво олії, дизельного біопалива, біоетанолу, електроенергії й теплоенергії із біогазу та теплоенергії із соломи.

Вихідні данні. Площа сівозмінні – 300 га ріллі із вирощуванням озимої пшениці 50 га, кукурудзу на силос 25 га і зерно 25 га, озимий ріпак 50 га, ячмінь 50 га, цукрові буряки 50 га та багаторічні трави 50 га. Ціни реалізації виробленої продукції та енергії, а також їх собівартість виробництва наведені в табл. 1.4. Кількість виробленої продукції та біопалив, при урожайності базової культури – озимої пшениці 30 ц/га, наведена в табл. 1.5.

Таблиця. 1.4. Ціни реалізації та собівартість виробленої продукції

Вид продукції	Од. виміру	Собівартість виробництва	Ціна реалізації
Зерно пшениці	грн./т	1462	1872
Зерно кукурудзи	грн./т	1401	1768
Зерно ячменю	грн./т	1446	1711
Зерно ріпаку	грн./т	3242	4188
Цукрові буряки	грн./т	422	497
Яйця	грн./шт.	0,5	0,8
М'ясо птиці	грн./т	12815	10845
М'ясо свиней	грн./т	17477	18459
Молоко	грн./т	3283	3645
М'ясо ВРХ	грн./т	21284	13651
М'ясо риби	грн./т	10635	9295
Мед	грн./т	10500	15000
Гриби печериці	грн./кг	27	35
Гриби глива	грн./кг	22	39
Олія	грн./кг	9,5	20,0
Дизельне біопаливо	грн./т	15132	16640
Біоетанол	грн./т	14650	16700
Електроенергія	грн./кВт год.	0,56	0,86
Теплоенергія	грн./ГДж	30	90,0

На основі комп'ютерної моделі структурної схеми диверсифікованого виробництва сільськогосподарської продукції (м'яса ВРХ, свиней, курей та риби, молока, яєць, меду, грибів гливи та печериць) та біопалив (олії, дизельного біопалива, біоетанолу, електроенергії та теплоенергії на основі біогазу та теплоенергії із соломи), визначаємо валові грошові надходження та прибуток у розрахунку на один гектар сівозміни за наступними виразами:

$$B = \sum \frac{O_i \cdot C_i}{S}; \quad Pr = \sum \frac{O_i \cdot (C_i - C_i)}{S},$$

де B – валові грошові надходження в розрахунку на один гектар сівозміни, грн./га; O_i – обсяг виробництва i -го виду продукції, т або млн. шт. для яєць, i -го виду біопалив, т та i -го виду біоенергії, кВт год. або ГДж; C_i – ціна реалізації i -го виду продукції, грн./т або грн./млн. шт. для яєць, i -го виду біопалив, грн./т та i -го виду біоенергії, грн./кВт год. або грн./ГДж; Pr – прибуток у розрахунку на один гектар сівозміни, грн./га; C_i – собівартість виробництва i -го виду продукції, грн./т або грн./млн. шт. для яєць, i -го виду біопалив, грн./т та i -го виду біоенергії, грн./кВт год. або грн./ГДж; S – загальна площа сівозміни, га.

Економічний аналіз виробництва сільськогосподарської продукції та біопалив проводимо для трьох варіантів функціонування агроєкосистеми:

Таблиця. 1.5. Розрахунок вартості продукції та прибутку в залежності від структури виробництва продукції в агроєкосистемі

Вид продукції	Од. виміру	Кількість	Приведені показники, грн./га	
			Вартість продукції	Прибуток
Виробництво продукції рослинництва				
Зерно пшениці	т	149	927	202,95
Зерно кукурудзи	т	83	490	101,77
Зерно ячменю	т	143	813	125,88
Зерно ріпаку	т	104	1451	327,79
Цукрові буряки	т	1255	2079	313,73
Всього			5759,72	1072,11
Виробництво продукції рослинництва, тваринництва та грибівництва				
Зерно пшениці	т	89	556	121,77
Зерно кукурудзи	т	50	294	61,06
Зерно ячменю	т	86	488	75,53
Зерно ріпаку	т	104	1451	327,79
Цукрові буряки	т	1255	2079	313,73
Яйця	млн. шт.	0,2	541	200,17
М'ясо птиці	т	1,0	37	-6,78
М'ясо свиней	т	19,5	1198	63,71
Молоко	т	476	5783	574,36
М'ясо ВРХ	т	17,6	801	-447,75
М'ясо риби	т	14,3	444	-63,99
Мед	т	5	250	75,00
Гриби печериці	т	20	2303	526,41
Гриби глива	т	7	846	368,87
Всього			17070,60	2189,88
Виробництво продукції рослинництва, тваринництва, грибівництва, біопалив та біоенергії				
Зерно пшениці	т	89	556	121,77
Зерно кукурудзи	т	36	213	44,28
Зерно ячменю	т	86	488	75,53
Цукрові буряки	т	1255	2079	313,73
Яйця	млн. шт.	0,2	541	200,17
М'ясо птиці	т	1,0	37	-6,78
М'ясо свиней	т	19,5	1198	63,71
Молоко	т	476,0	5783	574,36
М'ясо ВРХ	т	17,6	801	-447,75
М'ясо риби	т	14,3	444	-63,99
Мед	т	5	250	75,00
Гриби печериці	т	20	2303	526,41
Гриби глива	т	7	846	368,87
Олія	т	10	666	348,90
Дизельне біопаливо	т	23,1	1281	116,12
Біоетанол	т	4,8	267	32,80
Електроенергія	кВт год.	64717	186	64,72
Теплоенергія	ГДж	2929	879	585,89
Всього			18817,32	2993,74

– із виробництвом лише продукції рослинництва;

- із виробництвом продукції рослинництва, тваринництва та грибівництва;
- із виробництвом продукції рослинництва, тваринництва, грибівництва, біопалив та біоенергії.

Отриманні значення валових грошових надходжень та прибутку в розрахунку на один гектар сівозміни заносимо в табл. 1.5.

Після цього визначаємо питому вагу валових грошових надходжень та прибутку в розрахунку на один гектар сівозміни в агроєкосистемі із виробництвом біопалив та біоенергії шляхом побудови кругових діаграм на основі даних таблиці 1.6 (рис. 1.5 та 1.6).

Таблиця. 1.6. Розрахунок надходжень коштів та прибутків в залежності від структури виробництва продукції в агроєкосистемі

Галузь виробництва, вид біопалива та біоенергії	Вартість продукції, грн./га	Прибуток, грн./га
Рослинництво	3335,91	555,30
Тваринництво	9053,45	394,73
Грибівництво	3149,28	895,28
Олія	666	348,90
Дизельне біопаливо	1281	116,12
Біоетанол	267	32,80
Електроенергія	186	64,72
Теплоенергія	879	585,89

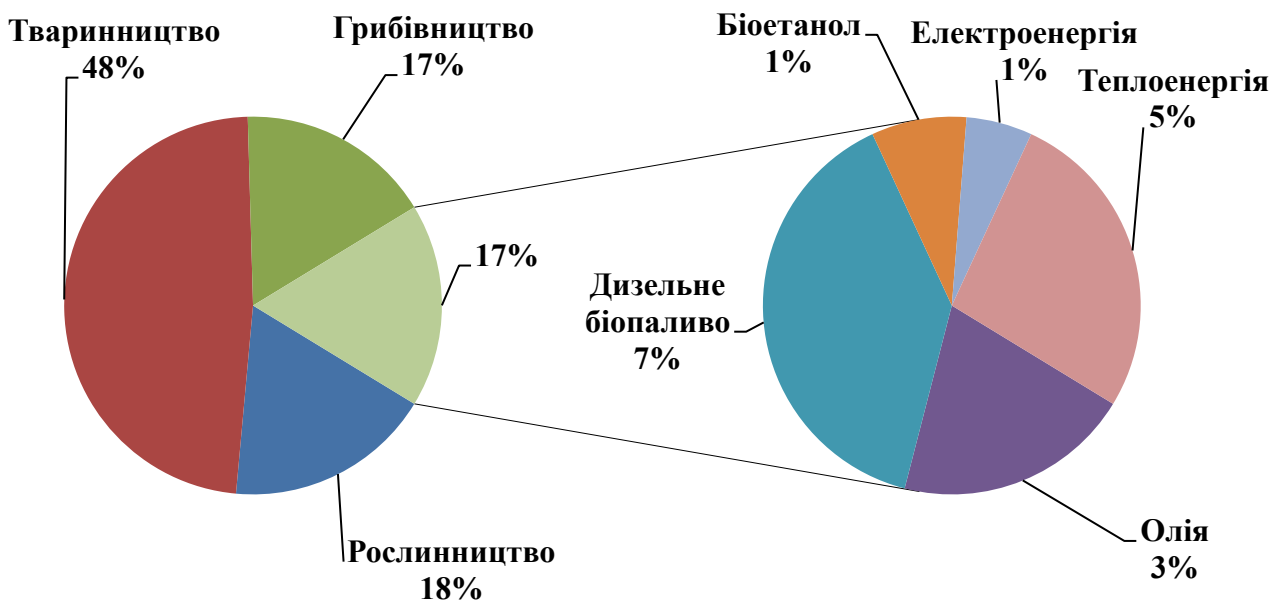


Рис. 1.5. Структура надходжень коштів від виробництва сільськогосподарської продукції та біопалив

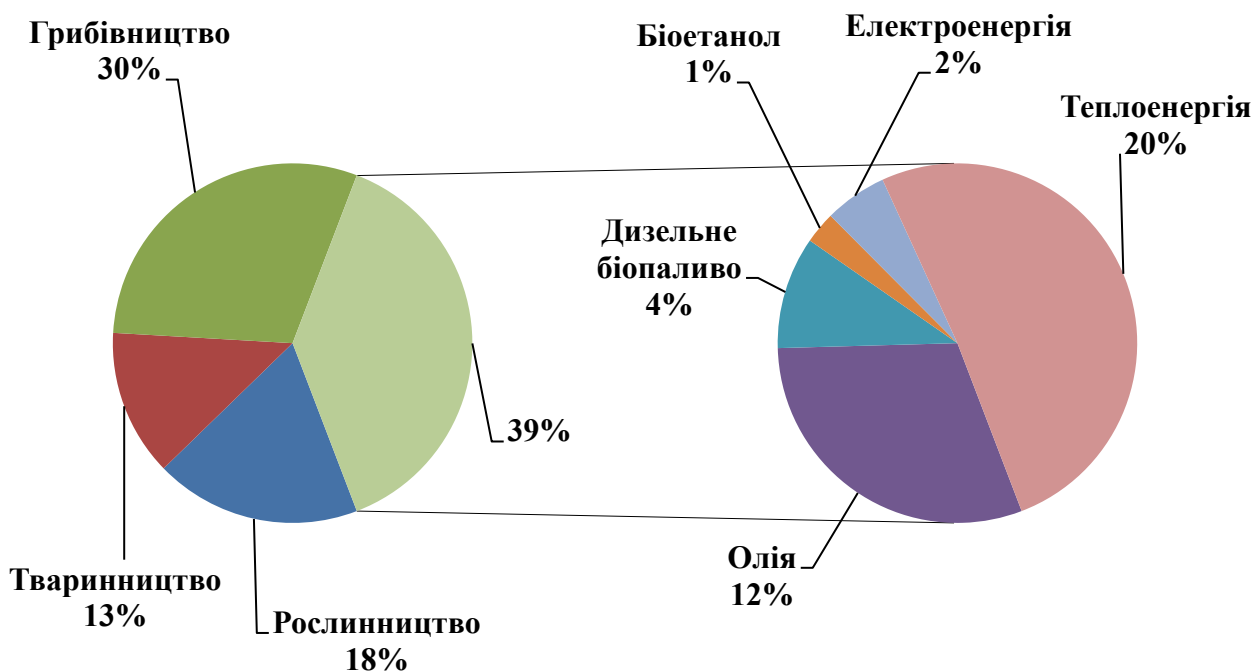


Рис. 1.6. Структура прибутків від виробництва сільськогосподарської продукції та біопалив

Комп'ютерна модель структурної схеми диверсифікованого аграрного виробництва продукції та біопалив дозволяє розрахувати виробничі, технологічні та економічні показники агроєкосистеми при різних рівнях реалізації зерна та різних співвідношеннях розподілу наявної кормової бази для утримання поголів'я тварин та птиці.

Таким чином, агроєкосистема із виробництвом біопалив у порівнянні із системою без виробництва біопалива забезпечує збільшення валових грошових надходжень на 17 % та прибутку 39 % у розрахунку на один гектар сівозміни.

Практична робота 1: Визначити обсяг соломи, яку можна використати для теплових потреб.

Вихідні дані: Середнє значення величини мінералізації гумусу в сівозміні, $M=1200$ кг/га, середнє значення величини надходження гумусу в сівозміну за рахунок рослинних решток, $H_1=454$ кг/га, середнє значення величини надходження гумусу в сівозміну за рахунок біомаси сидератів, $H_2=225$ кг/га. Обсяг біомаси бур'янів, втрат соломи під час збирання, незернової частини кукурудзи, що залишається на полі їх вологості та коефіцієнти гуміфікації згідно табл. 1.7.

Баланс гумусу в сівозміні при використанні рослинних решток та біомаси сидератів, B_1 (кг/га):

$$B_1 = -M + H_1 + H_2 = -1200 + 454 + 225 = -521 \text{ кг/га.}$$

Надходження гумусу в сівозміну за рахунок біомаси бур'янів, втрат соломи та незернової частини кукурудзи, гною та посліду, H_3 (кг/га):

$$H_3 = \frac{1}{S} \sum_j^m OB_j \left(1 - \frac{W_j}{100}\right) k_{Гj} = \frac{1000}{300} \left[900 \cdot \left(1 - \frac{85}{100}\right) \cdot 0,2 + \right. \\ \left. + 438 \cdot \left(1 - \frac{20}{100}\right) \cdot 0,2 + 2302 \cdot \left(1 - \frac{90}{100}\right) \cdot 0,2 \right] = \\ = 90 + 234 + 154 = 478 \text{ кг/га.}$$

Таблиця 1.7. Баланс гумусу в сівозміні при використанні біомаси бур'янів, біомаси незібраної та втраченої соломи, а також посліду та гною

Обсяг біомаси бур'янів (із розрахунку 3 т/га), т	OB_B	900
Вологість біомаси, бур'янів, %	W_B	85
Коефіцієнт гуміфікації біомаси, бур'янів, відн. од.	$k_{ГB}$	0,2
Дефіцит гумусу при використанні біомаси бур'янів, кг/га	H_B	-431
Обсяг втрат соломи під час збирання (25%), т	OB_C	158
Обсяг незернової частини кукурудзи, що залишається на полі, т	OB_K	280
Загальний вихід рослинної біомаси, що залишається на полі, т	OB_{PB}	438
Вологість рослинної біомаси, %	W_{PB}	20
Коефіцієнт гуміфікації рослинної біомаси, в т.ч. соломи, відн. од.	$k_{ГPB}$	0,2
Дефіцит гумусу при використанні біомаси бур'янів та рослинної біомаси, кг/га	H_{PB}	-197
Внесення збродженого посліду або гною, т	$OB_{П}$	2302
Вологість збродженого посліду, %	$W_{П}$	90
Коефіцієнт гуміфікації збродженого посліду, відн. од.	$k_{ГП}$	0,2
Баланс гумусу при використанні рослинної біомаси та посліду та гною, кг/га	$H_{П}$	-43

Баланс гумусу в сівозміні при використанні біомаси бур'янів, соломи, гною та посліду, B_2 (кг/га):

$$B_2 = -M + H_1 + H_2 + H_3 = -1200 + 454 + 225 + 478 = -43 \text{ кг/га.}$$

Після розрахунку компенсації втрат гумусу за рахунок рослинних решток та біомаси сидератів, біомаси бур'янів, незібраної та втраченої соломи, а також посліду та гною, визначається додаткова кількість соломи, яку необхідно використати для компенсації балансу гумусу (досягнення його нульового значення), C (т) за виразом:

$$C = \frac{B_2 S}{1000 \left(1 - \frac{W_C}{100}\right) k_{ГC}} = \frac{43 \cdot 300}{1000 \left(1 - \frac{20}{100}\right) \cdot 0,2} = 81 \text{ т.}$$

Додатковий обсяг соломи для компенсації втрат гумусу може бути використаний шляхом залишення її на полі, використанням соломи на підстилку тваринам та шляхом виробництва на її основі компосту або субстрату для вирощування грибів. У подальшому підстилковий гній, компост або відпрацьований субстрат вноситься на поля в якості органічного добрива (табл. 1.8).

Таблиця 1.8. Баланс соломи

Біологічний урожай соломи, т	910
Обсяг незернової частини кукурудзи, що залишається на полі, т	280
Обсяг втрат соломи під час збирання (25%), т	158
Обсяг соломи для потреб годівлі тварин (ячмінна солома), т	158
Додатковий обсяг соломи для компенсації втрат гумусу, т	81
Солома на теплові потреби, т	233
Солома на теплові потреби від біологічного урожаю, %	25,6

Кількість компосту K (т) або кількість субстрату CB (т), яка може бути отримана при використанні додаткової кількості соломи для компенсації балансу гумусу становить:

$$K = 4 C_{KT} = 4 \cdot 81 = 324 \text{ т};$$

$$CB = 3 C_{KT} = 3 \cdot 81 = 243 \text{ т}.$$

Таким чином, обсяг соломи, яку можна використати для теплових потреб визначається в залежності від дефіциту гумусу в ґрунтах. При інтенсивному використанні сидератів, обсяг соломи на теплові потреби може становити біля 25 % від біологічного її урожаю.

Запитання для самоконтролю:

1. Дайте визначення терміну біоенергетика.
2. Вкажіть основні особливості технічної біоенергетики.
3. Які особливості біоенергетики в аграрному виробництві?
4. Які джерела енергії в природі?
5. Які види біомаси в аграрному виробництві?
6. Дайте визначення терміну біогаз.
7. Назвіть види твердого біопалива.
8. Які види рідких біопалива можливо отримати в аграрному виробництві?
9. Який вид виробництва є безвідходним?
10. Яку роль енергоресурси відіграють у виробництві?
11. Яку роль енергоресурси відіграють у житлово-комунальному господарстві?
12. Який рівень споживання енергоресурсів у сільськогосподарському виробництві України?
13. Які об'єкти біоенергетичних систем в аграрному виробництві?
14. У яких напрямках повинен здійснюватися розвиток виробництва біопалива?
15. У яких напрямках повинен здійснюватися розвиток використання біопалива?
16. В чому сутність концепції диверсифікованого виробництва сільськогосподарської продукції та біопалива в агроєкосистемах?
17. Які основні завдання сільськогосподарського виробництва?

18. Чому важливим є збільшення біологічного різноманіття в агроекосистемах?

19. Які блоки входять в структурну схему агроекосистеми із виробництвом біопалива?

20. Назвіть напрямки диверсифікованого виробництва сільськогосподарської продукції та біопалива в агроекосистемах.

21. Чим обмежено використання енергетичного потенціалу біомаси в агарному виробництві?

22. Які основні механіко-технологічні особливості виробництва біопалива та отримання енергії в межах агроекосистеми?

23. Які основні переваги і недоліки виробництва і використання біогазу в АПК?

24. Які основні переваги виробництва теплової енергії із сировини сільськогосподарського походження?

25. В чому полягають складнощі та переваги виробництва рідкого біопалива в АПК?

26. Від чого залежать граничні значення обсягів сировини для виробництва біопалива?

Література:

1. Біопалива: Технології, машини, обладнання / [В.О. Дубровін, М.О. Корчемний, І.П. Масло та ін.]. – К.: ЦТІ «Енергетика і електрифікація», 2004. – 256 с.

2. Биомасса как источник энергии : пер с. англ. / под ред. С. Соуфера, О. Забарски. – М. : Мир, 1985. – 368 с.

3. Голуб Г.А. Агропромислове виробництво їстівних грибів. Механіко-технологічні основи / Г.А. Голуб. – К. : Аграрна наука, 2007. – 332 с.

4. Голуб Г.А. Біоенергоконверсія органічної сировини агроценозів із забезпеченням енергетичної автономності виробництва / Г.А. Голуб// Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві. – Запоріжжя. – 2008. – Вип. 3(3). – С. 3-7.

5. Голуб Г.А. Проблеми техніко-технологічного забезпечення енергетичної автономності агроекосистем / Голуб Г.А., Дубровін В.О., Марус О.А.// Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України / ДНУ УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. – 2012. – Вип. 16(30), кн.2 – С. 339-345.

6. Голуб Г.А. Технічне забезпечення органічного виробництва сільськогосподарської продукції та біопалив. / Голуб Г.А., Таргоня В.С.// Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві. – Запоріжжя: ІМТ НААН України. – 2011. – Вип. 2(8). – 239 с. – с. 66-73.

7. Голуб Г.А. Техніко-технологічне забезпечення енергетичної автономності агроекосистеми / Г.А. Голуб// Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2010. – Вип. 144, ч. 4. – С. 303–312.

8. Енергетична оцінка агроєкосистем : навч. посіб. [О.Ф. Смаглій, А.С. Малиновський, А.Т. Кардашов та ін.]; за ред. О.Ф. Смаглія. – Житомир : ДАУ, 2002. – 160 с.
9. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії : підручник /С.О. Кудря// – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 492 с.
10. Кухарець С.М. Забезпечення енергетичної автономності агроєкосистем на основі виробництва біопалива /С.М. Кухарець, Г.А. Голуб// Вісн. Житомир. нац. агроєколог. ун-ту. – 2012. – № 1, т. 1. – С. 345–352.
11. Кухарець С.М. Механіко-технологічний підхід до конструювання агроєкосистеми /С.М. Кухарець// Вісн. Житомирського нац. агроєкол. ун-ту. – 2014. – № 1, т. 1(39). – С.187–197.
12. Кухарець С.М. Обеспечение рационального использования сырья для получения биотоплив в агропромышленном комплексе /С.М. Кухарець, Г.А. Голуб, С.В. Драгнев// Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2013. – Vol. 15, № 4. – P. 69–76.
13. Особливості виробництва біопалива та отримання енергії в умовах агропромислового виробництва [Голуб Г., Кухарець С., Шубенко В., Бовсунівська Н.] Техніка і технології АПК (Науково-виробничий журнал). – 2015. – № 2 (65). – С. 31-34.
14. Перспективи розвитку альтернативної енергетики на Поліссі України. [В.О. Дубровін, Л.Д. Романчук, С.М. Кухарець та ін.; відп. ред. Скидан О.В.]. – К.: Центр учбової л-ри, 2014. – 335 с.
15. Шелудченко Б.А. Вступ до конструювання природно-техногенних геоекосистем /Б.А. Шелудченко// – Кам'янець-Подільський: ПДАТУ, 2014. – 170 с.
16. Scientific bases of production and use of biofuel in agroecosystems [Електронний ресурс] / [G. Golub, V. Dubrovin, S. Kukharets et al.] // Біоресурси планети і якість життя: міжнар. електрон. журн. – 2013. – Вип. 4. – Режим доступу: <http://gchera-ejournal.nubip.edu.ua/index.php/ebql/article/view/146/112>.
17. Голуб Г.А. Проблеми використання соломи в якості палива. – Вісник аграрної науки. – 2010. – № 8. – С. 49-52.
18. Голуб Г.А., Таргоня В.С. Технічне забезпечення органічного виробництва сільськогосподарської продукції та біопалив. – Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві. – Запоріжжя: ІМТ НААН України, 2011. – Вип. 2(8). – 239 с. – с. 66-73.
19. Кухарець С.М., Голуб Г.А. Регулювання використання органічних ресурсів для виробництва біопалива. – Сільськогосподарські машини: Збірник наукових статей – Луцьк, Редакційно-видавничий відділ ЛНТУ, 2013. – Вип. 24. – 525 с. – С. 187-194.
20. Голуб Г.А., Кухарець С.М. Моделювання гумусного стану ґрунтового середовища агроєкосистем. – Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК / Редколегія: Д.О. Мельничук (відповідальний редактор) та інші – К.: 2014. – Вип. 196, ч. 2. – 336 с. – С. 20-27.

2. ОСНОВИ ВИРОБНИЦТВА ДИЗЕЛЬНОГО БІОПАЛИВА

2.1. Технології виробництва олії та дизельного біопалива

На сьогоднішній час існує широке різноманіття технологій виробництва рослинної олії та дизельного біопалива, однак не всі вони набули широкого поширення через проблеми із створенням обладнанням та їх малою ефективністю. Умовно всі технології можна розбити на дві групи (рис. 2.1 та 2.2): промислові та агропромислові (скорочений варіант промислових технологій, спеціально адаптованих для задоволення потреб аграрного виробництва у олії та дизельному біопаливі).



Рис. 2.1. Схема виробництва рослинної олії

Технологія виробництва рослинної олії включає наступні основні етапи: підготовка зерна до отримання олії; отримання та очистки олійної маси, а виробництва дизельного біопалива, крім того – естерифікацію та очистку метилового ефіру (дизельного біопалива).

Промислова технологія виробництва рослинної олії традиційно використовується на олійно-жирових комбінатах, які переробляють олійну сировину. Вона складається із наступних етапів: приймання та очистки зерна від домішок, сушіння зерна, отримання та очистки олійної маси, рафінації; вінтеризації та повторної очистки олії.

Переваги промислової технології: висока якість виробленої продукції, більший термін придатності олії та вироблених з неї продуктів, більший вихід неочищеної олійної маси за рахунок використання методу екстракції.

До недоліків промислової технології можна віднести: значні витрати електроенергії, складність обладнання, втрата корисних поживних речовин під час рафінації.

Переваги агропромислової технології: менша кількість етапів виробництва (відсутні операції екстракції та волого-теплової обробки в отриманні сирової олії), простота та доступність обладнання, отримана олія має природний смак, запах та забарвлення, собівартість виробленої продукції нижча за рахунок менших витрат електроенергії.

Недоліками агропромислової технології наступні: отримана рослинна олія має нижчу якість, містить вільні жирні кислоти, фосфоліпиди, а також має менший термін придатності.

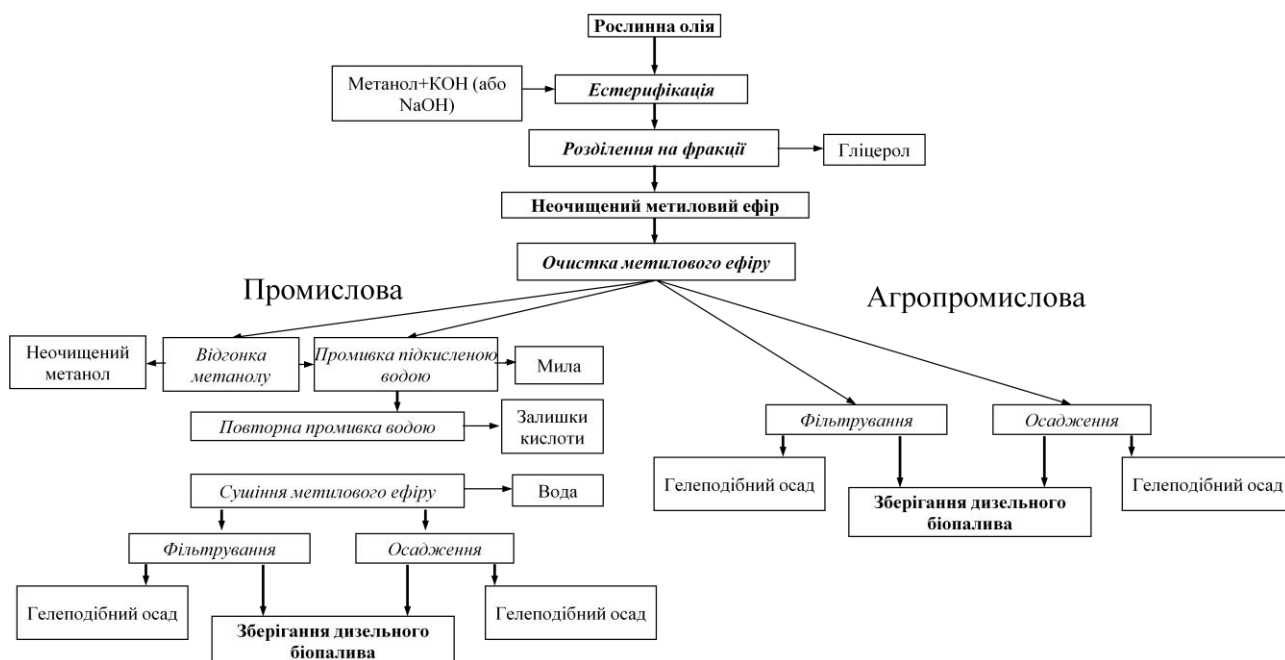
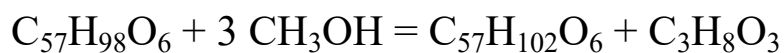


Рис. 2.2. Схема виробництва дизельного біопалива

Промислова технологія виробництва дизельного біопалива складається з таких основних процесів: естерифікації; розділення на фракції (дизельне біопаливо – легка фракція та гліцериновий осад – важка фракція), відгонки метилового спирту; промивки дизельного біопалива підкисленою водою та його зневоднення.

Естерифікація – це процес взаємодії суміші жирних кислот (тваринного або рослинного походження) зі спиртом (метиловим, етиловим та ін.) з використанням лужного каталізатора (KOH, NaOH) для прискорення проходження реакції, в результаті якого отримують дизельне біопаливо та гліцериновий осад (гліцерин, залишки спирту та ін.).

Реакція естерифікації проходить за таким наближеним виразом:



де $C_{57}H_{98}O_6$ – рослинна олія; CH_3OH – метиловий спирт; $C_{57}H_{102}O_6$ – метиловий ефір (дизельне біопаливо); $C_3H_8O_3$ – гліцеринний осад.

Враховуючи молярну масу вхідних і вихідних компонентів, вихід дизельного біопалива із рослинної олії приблизно дорівнює кількості рослинної олії. Однак на практиці він дещо менший і знаходиться в межах від 85 до 95 %.

Необхідність відгонки метилового спирту обумовлена тим, що його присутність в дизельному біопаливі призводить до руйнації гумових деталей двигуна та пошкодження лакофарбових поверхонь.

Промивка підкисленою водою необхідна для видалення каталізатора, який призводить до появи осаду. Повторну промивку дизельного біопалива водою здійснюють для видалення кислоти, яка потрапляє в нього під час першої промивки. Зневоднення дизельного біопалива необхідне для видалення вологи, яка потрапляє в нього під час промивок, адже присутність води в паливі призводить до неповного згорання, зниження потужності двигуна, корозії та утворення нагару у циліндрах двигуна.

Промислова технологія виробництва традиційно використовується на великих та промислових підприємствах, з річним виходом дизельного біопалива від 20000 до 100000 т/рік.

До переваг промислової технології виробництва дизельного біопалива можна віднести його високу якість, що дає можливість використовувати дизельне біопаливо як в сумішах, так і без додавання традиційного дизельного палива. Основні недоліки такого виробництва: складність обладнання, значні витрати електроенергії, висока собівартість виробленої продукції.

Агропромислова технологія виробництва дизельного біопалива широко використовується для виробництва дизельного біопалива з річним обсягом від 100 до 5000 т/рік. Вона складається з етерифікації, розділення на фракції (дизельне біопаливо – легка фракція та гліцеринний осад або гліцерол – важка фракція, яка є побічним продуктом при виробництві дизельного біопалива) та очистки дизельного біопалива (відгонки метанолу та очистки від гелеподібного осаду шляхом фільтрації або осадження).

До переваг агропромислової технології у порівнянні з промисловою можна віднести: менші енерговитрати, простота та доступність обладнання, нижча собівартість отриманої продукції.

2.2. Оцінка сировинної бази агропромислового виробництва дизельного біопалива при двохступінчатому віджиманні рослинної олії

Агропромислова технологія виробництва дизельного біопалива – це технологічно спрощена промислова технологія, яка адаптована під фермерські господарства з виробництвом дизельного біопалива для власного використання. У той же час, питання збільшення економічної ефективності виробництва дизельного біопалива з рослинних олій в таких умовах залишається відкритим.

Технологія виробництва дизельного біопалива при двохступінчатому віджиманні рослинної олії шляхом пресування включає перше (холодне) віджимання та друге (гаряче віджимання (рис. 2.3).

Агропромислове виробництво дизельного біопалива включає наступні операції: очистку зерна від домішок, сушіння до заданої норми вмісту вологи, пресування, під час якого отримують неочищену олію першого (холодного) віджимання та макуху з високим вмістом олії, яку піддають повторному (гарячому) віджиманню.

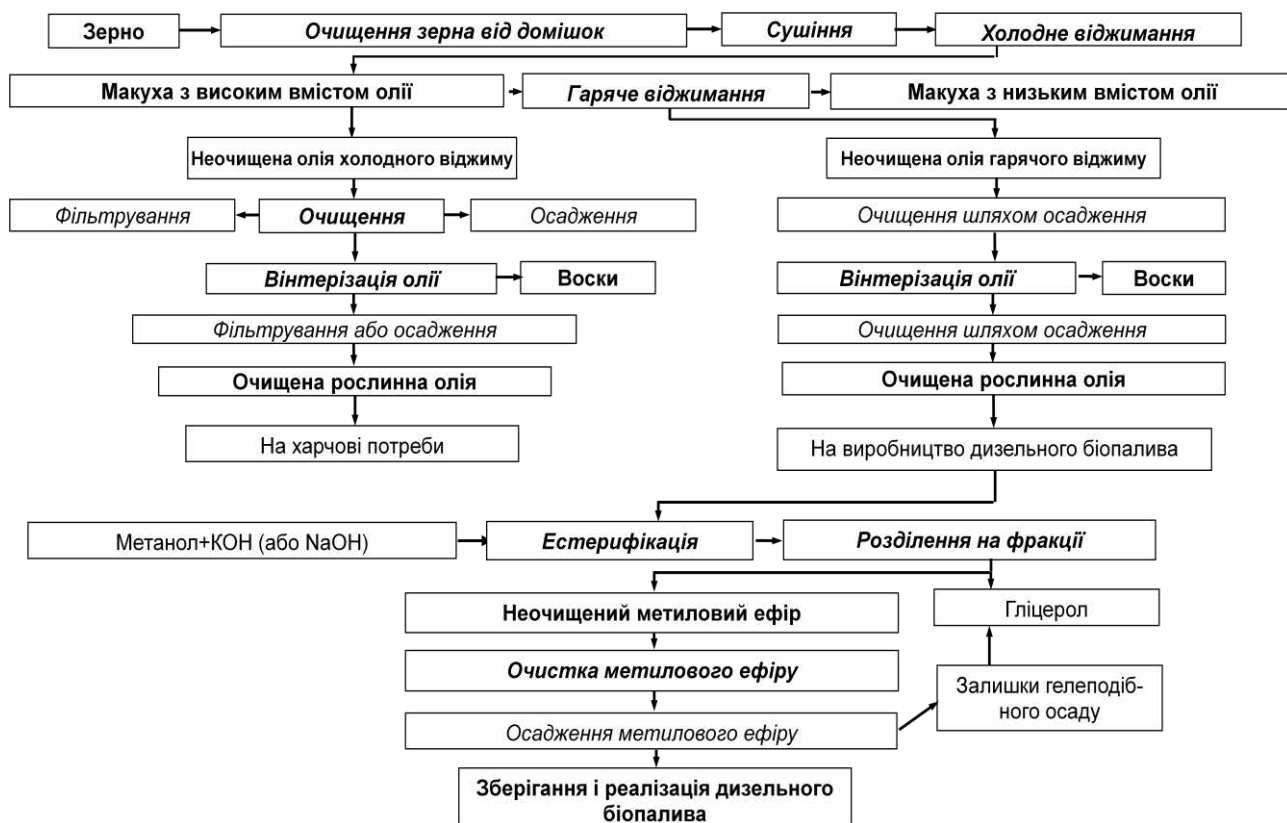


Рис. 2.3. Схема агропромислового виробництва олії холодного віджимання та дизельного біопалива із олії гарячого віджимання

Олію холодного віджимання очищують шляхом фільтрації або осадження, піддають вінтеризації, повторно фільтрують або осаджують та використовують для харчових потреб. Олію гарячого віджимання очищують шляхом осадження, піддають вінтеризації для видалення восків, повторно очищують шляхом осадження та використовують як сировину для виробництва дизельного біопалива, а саме: при додаванні метилату калію проводять процес естерифікації, розділяють на фракції, отриманий метиловий ефір очищують шляхом осадження та відкачують у резервуар для зберігання дизельного біопалива.

При пресуванні маємо рівняння балансу маси олії:

$$M_o = M_{ox} + M_{og} \quad (2.1)$$

де M_o – загальна маса олії, яку можна одержати при пресуванні зерна олійної культури, кг; M_{ox} – маса олії першого (холодного) віджимання, кг; $M_{ог}$ – маса олії другого (гарячого) віджимання, кг.

Помноживши рівняння балансу маси олії на ціну кожного компоненту отримаємо:

$$M_o C_o = M_{ox} C_{ox} + M_{ог} C_{ог} \quad (2.2)$$

де C_o – ціна олії, грн/л; C_{ox} – ціна олії першого (холодного) віджимання, грн/л; $C_{ог}$ – ціна олії другого (гарячого) віджимання, грн/л.

Розділивши на масу зерна олійної культури одержимо:

$$\frac{M_o}{M} C_o = \frac{M_{ox}}{M} C_{ox} + \frac{M_{ог}}{M} C_{ог} \quad \text{або} \quad k_o C_o = k_{ox} C_{ox} + k_{ог} C_{ог} \quad (2.3)$$

де k_o – загальний коефіцієнт виходу олії, %; k_{ox} – коефіцієнт виходу олії першого (холодного) віджимання, %; $k_{ог}$ – коефіцієнт виходу олії другого (гарячого) віджимання, %.

Врахувавши, що $k_{ог} = k_o - k_{ox}$, можна записати:

$$k_o C_o - k_{ox} C_{ox} = (k_o - k_{ox}) C_{ог} \quad (2.4)$$

Звідки гранична ціна олії другого (гарячого) віджимання при якій не будуть зменшуватися грошові надходження від продажу олії становитиме:

$$C_{ог} = \frac{k_o C_o - k_{ox} C_{ox}}{k_o - k_{ox}} \quad (2.5)$$

Аналіз показує, що гранична ціна олії другого (гарячого) віджимання зменшується при збільшенні ціни першого (холодного) віджимання та при збільшенні коефіцієнта виходу олії холодного віджимання. Принципово можливо отримати нульові значення граничної ціни олії другого (гарячого) віджимання при високій ціні олії холодного віджимання та при коефіцієнтах виходу олії першого (холодного) віджимання вище 20 % (рис. 2.4).

Встановлено, що із збільшенням ціни олії першого (холодного) віджимання, нульова гранична ціна олії другого (гарячого) віджимання може бути досягнута при менших значеннях коефіцієнта виходу олії першого (холодного) віджимання та при більших значеннях коефіцієнта виходу олії другого (гарячого) віджимання. Так, наприклад, при ціні олії першого (холодного) віджимання 18 грн/кг, гранична ціна олії другого (гарячого) віджимання матиме нульове значення при коефіцієнті виходу олії першого (холодного) віджимання 29 % та коефіцієнті виходу олії другого (гарячого) віджимання 4 %. При ціні олії першого (холодного) віджимання 26 грн/кг аналогічна ситуація буде мати місце при коефіцієнті виходу олії першого (холодного) віджимання 20 % та коефіцієнті виходу олії другого (гарячого) віджимання 13 %.

У випадку, коли коефіцієнти виходу олії першого (холодного) та другого (гарячого) віджимання однакові і становлять $k_{ox} = k_{ог} = \frac{k_o}{2}$, ціна олії другого

(гарячого) віджимання в залежності від ціни олії першого (холодного) віджимання становитиме:

$$C_{ог} = 2C_o - C_{ох} \quad (2.6)$$

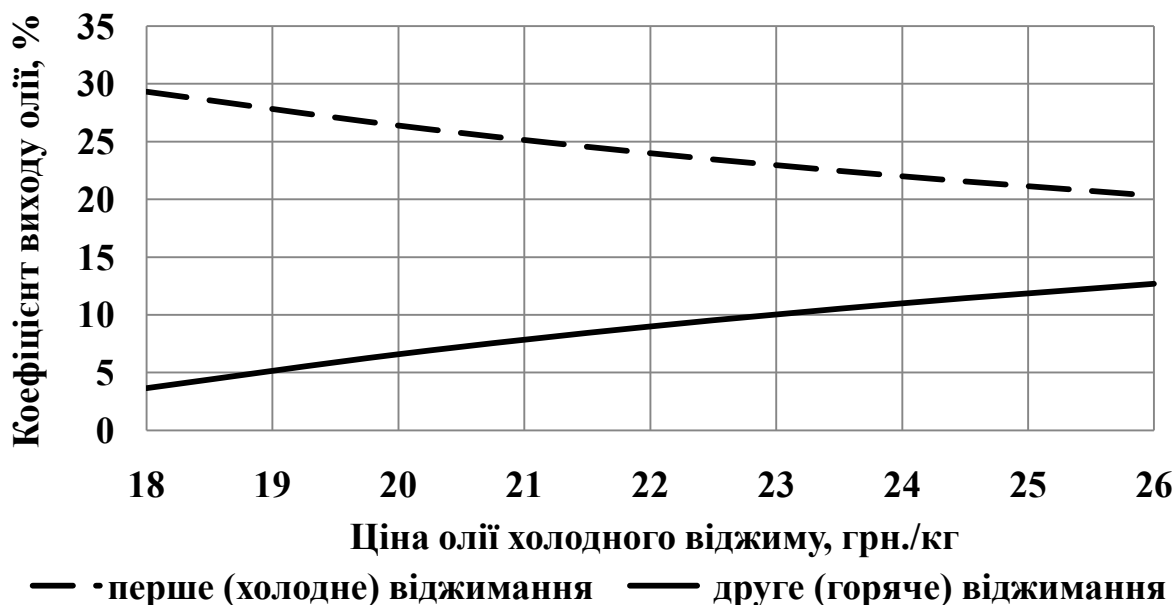


Рис. 2.4. Залежність коефіцієнтів виходу олії першого (холодного) та другого (гарячого) віджимання від ціни олії першого (холодного) віджимання при нульовому значенні ціни олії другого (гарячого) віджимання

Таким чином, для отримання рослинної олії необхідно застосовувати двохступінчате віджимання, причому високоякісну олію першого (холодного) віджимання доцільно використовувати для харчових потреб, а недорого, порівняно з олією першого (холодного) віджимання, олію другого (гарячого) віджимання – для потреб виробництва дизельного біопалива.

2.3. Технічне забезпечення виробництва дизельного біопалива

Упродовж останнього часу розробкою обладнання для виробництва дизельного біопалива займалися науковці ННЦ «Інститут механізації та електрифікації сільськогосподарського господарства», Національний університет біоресурсів і природокористування України, Білоцерківський державний аграрний університет, Одеський державний аграрний університет та інші, які намагалися вдосконалити обладнання, використовуючи різні методи перемішування в процесі естерифікації, адже чим краще відбудеться перемішування, тим якіснішим буде вироблене дизельне біопаливо. У процесі естерифікації використовуються такі види перемішування: механічне перемішування, гідродинамічне та гідромеханічне перемішування.

Для агропромислового виробництва дизельного біопалива в ННЦ «Інститут механізації та електрифікації сільськогосподарського господарства» було розроблено установку періодичної дії УВМЕ-1000 (рис. 2.5)

продуктивністю 1000 л/год., в якій перемішування відбувається за допомогою рамкової мішалки. Недоліком даної установки є те, що під кожен технологічний етап застосовується окрема ємність з насосом.

Крім установки періодичної дії УВМЕ-1000 була розроблена установка безперервної дії УБ-ТР-20 (рис. 2.6) продуктивністю від 5 до 20 л/год., у якій перемішування відбувається за допомогою проходження рослинної олії та лужного каталізатора через трубчастий естерифікатор. Однак дана установка призначена для використання у промисловому виробництві дизельного біопалива.



Рис. 2.5. Установка для одержання дизельного біопалива з рослинних олій продуктивністю 1000 т/рік УВМЕ-100

Паралельно з цим в НУБіП України під керівництвом професора Дубровіна В.О. була розроблена експериментальна установка для виробництва дизельного біопалива продуктивністю 100 л/год. (рис. 2.7), на базі якої була реалізована промислова установка продуктивністю 300 т/рік (рис. 2.8). У цих установках перемішування здійснюється за допомогою механічної лопатевої мішалки.

Недоліком даного обладнання, так як і в попередніх варіантах є використання під кожний етап виробництва дизельного біопалива окремої ємності з допоміжним устаткуванням, крім того перемішування відбувається за допомогою лопатевої мішалки, що погіршує процес естерифікації у порівнянні з рамковою мішалкою.



**Рис. 2.6. Обладнання для виробництва дизельного біопалива
УБ-ТР-20 продуктивність 5 л/год.**



**Рис. 2.7. Обладнання для виробництва дизельного біопалива
продуктивністю 100 л/год.**

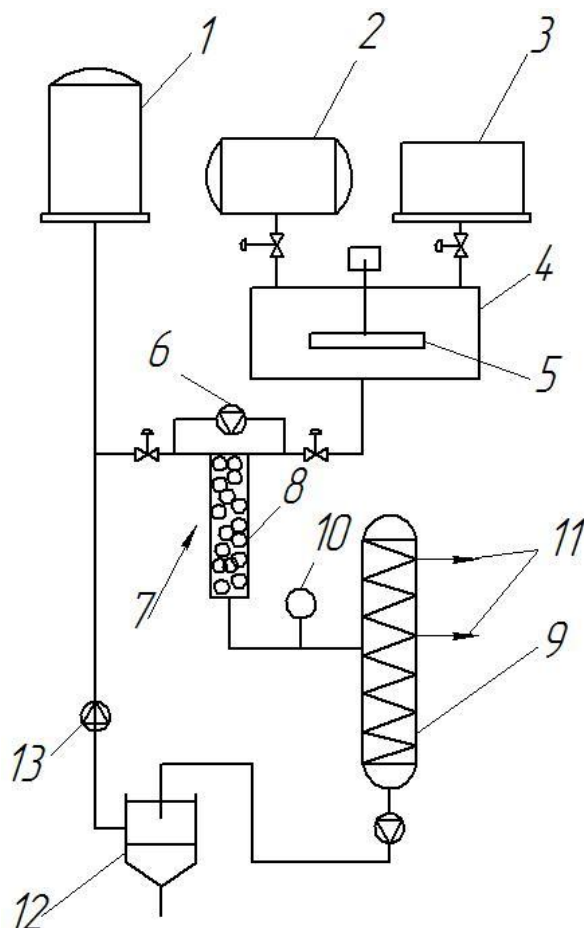
В Україні існують підприємства, які виробляють обладнання для виробництва дизельного біопалива або продають імпортоване обладнання різної продуктивності із застосуванням автоматизації та без неї, а також використовують конструкційні матеріали різної якості, що впливає на вартість обладнання.



Рис 2.8. Обладнання для виробництва дизельного біопалива продуктивністю 300 т/рік

Відомий спосіб виробництва метилового ефіру жирної кислоти та обладнання для його здійснення (рис. 2.9), де до місткості 4 для змішування із контейнера 3 подається метиловий спирт, а із контейнера 2 подається каталізатор. У місткості 4 за допомогою механічної мішалки 5 відбувається змішування метилового спирту з каталізатором. Жир, який знаходиться в контейнері 1 та суміш метилату калію з ємності 4 за допомогою насоса 6 потрапляють до реакційної зони 7, де відбувається процес естерифікації в змішувальному пристрої 8. Отримана емульсія надходить до дистилятора 9, де

піддається випаровуванню, в результаті якого метиловий спирт вивільняється через відвідник метилового спирту 10, а отриманий метиловий ефір через відповідні зони дистилятора 11. Неестерифіковані речовини відокремлюються і збираються у пристрій відокремлення фаз 12. При необхідності, частина неестерифікованих речовин по трубопроводу насосом 13 повертається у ділянку перебування жирів 1.



1 – контейнер для жиру; 2 – контейнер для каталізатора; 3 – ємність для метилового спирту; 4 – ємність для змішування; 5 – механічний змішувач; 6 – насос високого тиску; 7 – реакційна зона; 8 – змішувальний пристрій; 9 – дистилятор; 10 – відвідник метилового спирту; 11 – зони відведення дизельного біопалива; 12 – пристрій відокремлення; 13 – насос для відкачування неестерифікованих речовин

Рис. 2.9. Схема обладнання для виробництва дизельного біопалива із застосуванням статичного змішувального пристрою (патент України на винахід 44931)

Перевагами даного обладнання є використання високоефективної турбулентності для проведення процесу естерифікації. Недоліком є те, що дане обладнання має складність у використанні та низький вихід дизельного біопалива, адже при випаровуванні будуть відбуватися втрати дизельного біопалива.

Розроблено також обладнання для одержання біопалива для дизелів (рис. 2.10), яке працює наступним чином: із ємності 2 каталізатор КОН дозують за допомогою дозатора 3 на сітку ємності 4 куди також подають спирт з ємності 1 для приготування спиртового розчину каталізатора. У відношенні 2:1 подають олію і спиртовий розчин на стадію синтезу, а саме у кавітаційний пристрій 8, де змішують, нагрівають і синтезують радикали ефірів та подають кислоту з ємності 7 для нейтралізації каталізатора, а потім – на стадію розподілення одержаних продуктів, а саме через фільтр для відділення твердої фракції 14 (мило) в два розподільника 15, де подають воду з ємності 16 для відмивання одержаних продуктів і просушування гарячим повітрям за допомогою вентилятора 17 з підігрівачем повітря 18. Одержаний ефір через фільтр для відділення відходів 19 збирають у ємності 20, а гліцерол – у ємності 21. Непрореаговані пари спирту відкачують за допомогою вакуум-насосу 11, а компресором 12 подають в конденсатор спирту 10, а потім спирт повертають в ємність для спирту 1.

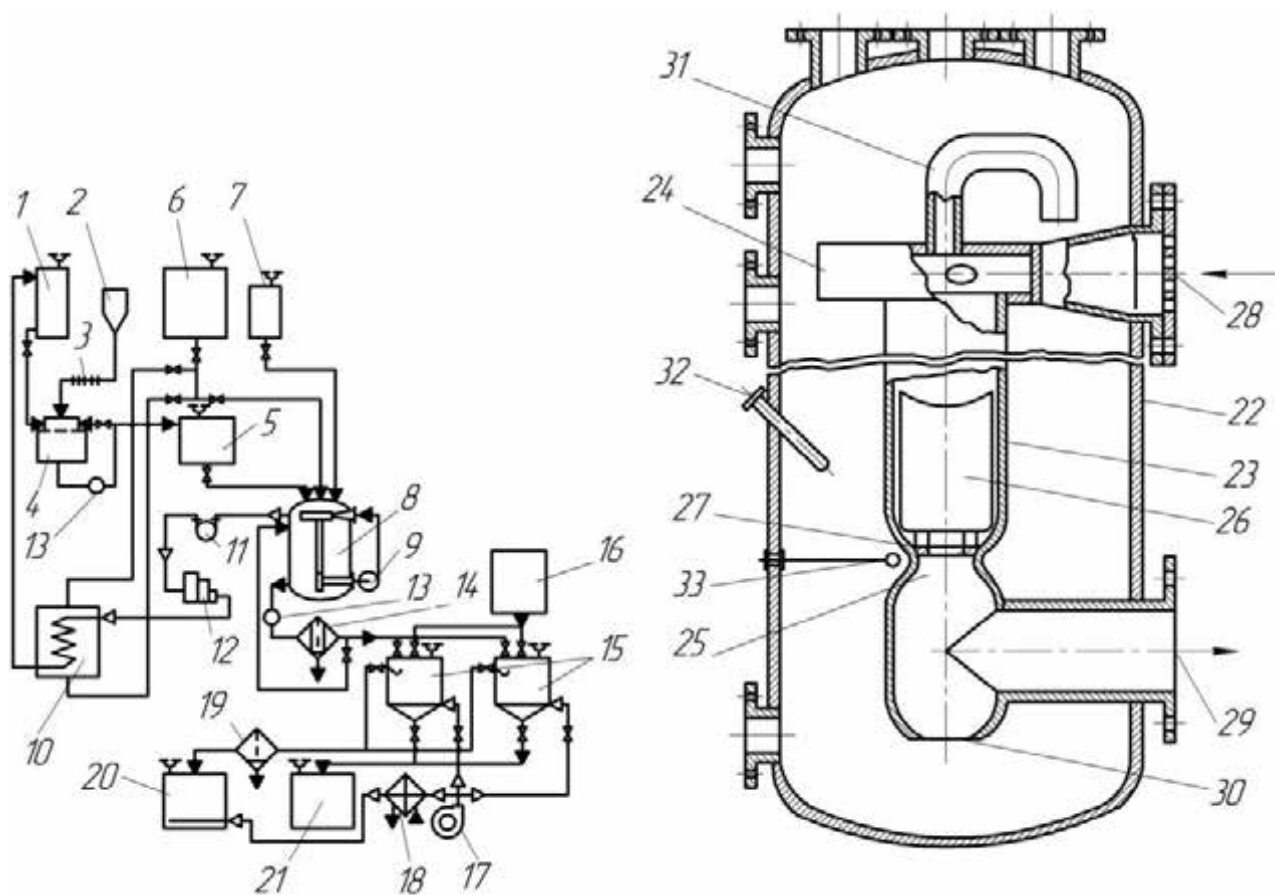


Рис. 2.10. Установа для одержання біопалива для дизелів згідно патенту України на корисну модель 19495 (позначення в тексті)

В кавітаційному пристрої 8 рідини, потрапляючи у вхідний патрубок 28 за допомогою циркуляційного насосу 9 під тиском 0,5 МПа, а потім в прискорюючому завитку 24, швидко прискорюються та закручуються в вихровому русі і потрапляють в трубу 23. Закручений потік у трубі 23

переміщується по гвинтовій спіралі у стінках труби до протилежного кінця, що закінчується звуженою ділянкою 25 з отвором 27. Перед отвором симетрично осі труби вмонтована вібраційна пластина 26, що виконує роль камертона, з метою вібрування і швидкого гальмування вихрового потоку. Резервуар 22 слугує для нагрівання рідини з швидкістю 0,5-3 °С за хв. Розміри зони кавітації розширюються в разі збільшення тиску на вхідному патрубку 28 від 0,5 до 0,7 МПа.

Недоліками даної установки є складність конструкції, великі габарити, висока вартість.

Відома гідродинамічна установка для отримання дизельного біопалива (рис. 2.11), в якій електродвигун 1 приводить в дію гідронасос 2, який в свою чергу всмоктує олію із зовнішнього джерела в магістраль (а) до відкритого крану 3. При цьому кран 4 повинен бути відкритим, а крани 6, 9, 11 – закриті. Після регулювання краном 11 подачі олії з ємності 14 та в змішувач-ежектор 12, відкривають кран 13 і краном 4 регулюють спочатку робочий тиск у нагнітальній магістралі 13, який контролюється манометром 8.

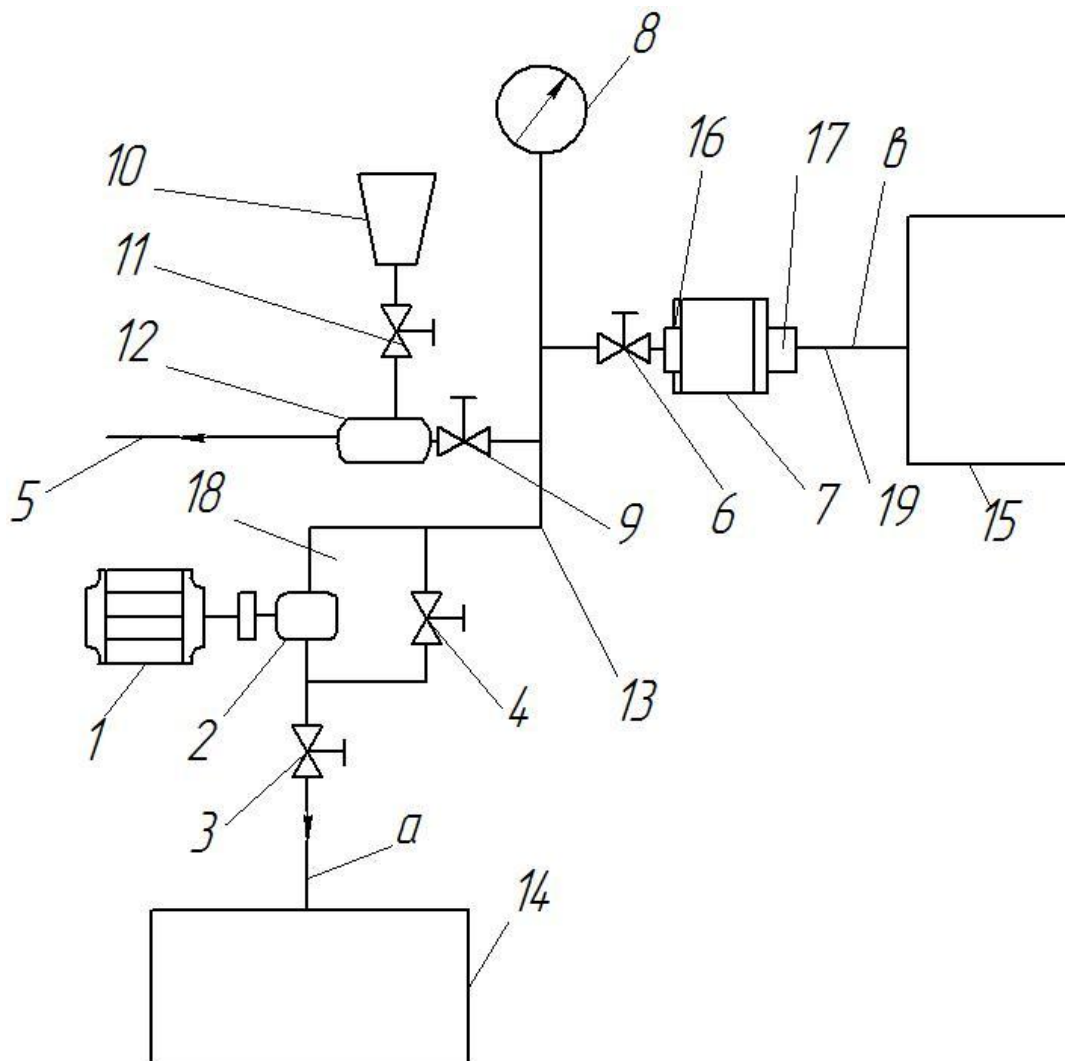
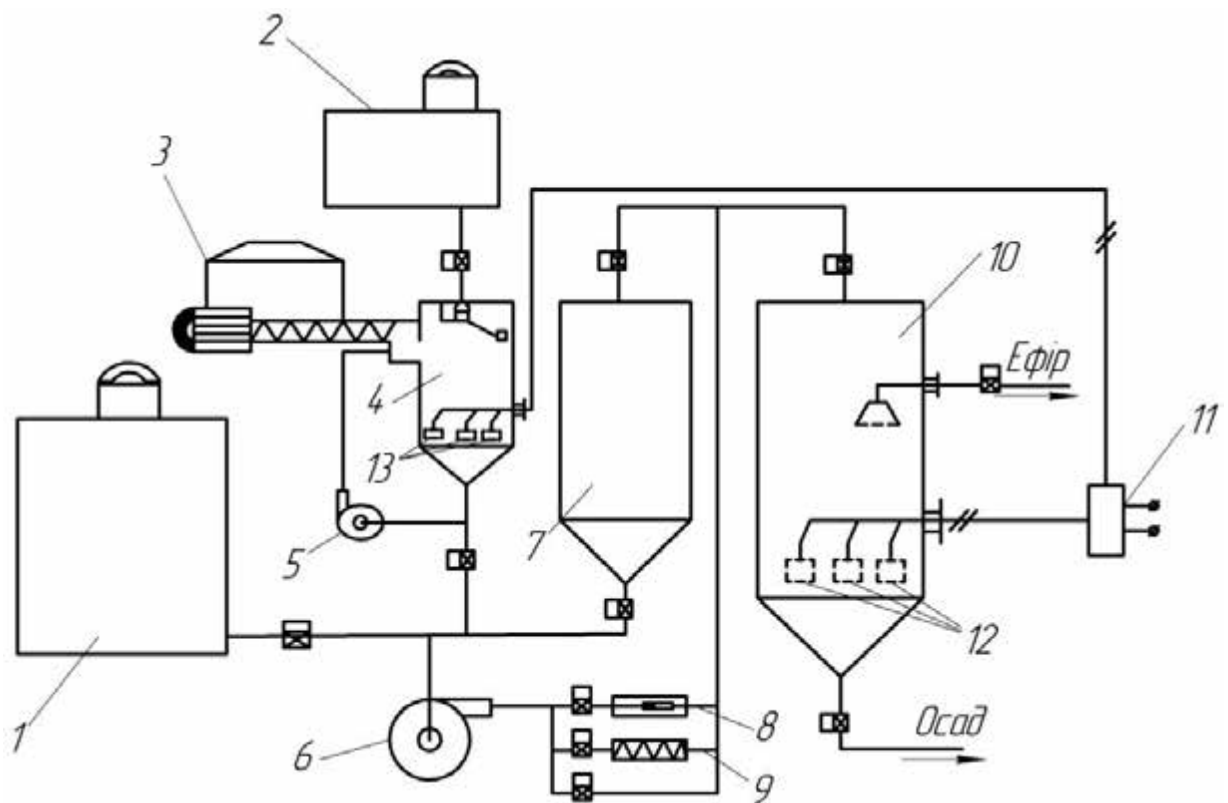


Рис. 2.11. Гідродинамічна установка для отримання дизельного біопалива згідно патенту України на корисну модель 31463 (позначення в тексті)

Дизельне паливо під тиском проходить по нагнітальній магістралі 3 та потрапляє у кавітатор 7, де відбувається інтенсивне насичення дизельного палива рапсовою олією. Із виходу 17, кавітатора гідродинамічна суміш по магістралі подається у технологічний бак 15. Після насичення дизельного палива олією, крани 9, 11 закривають, а установку відключають. Змішане дизельне паливо з ріпаковою олією потрапляє у магістраль (в), а потім в бак готової продукції 15.

Перевагами обладнання є простота конструкції та відповідно її доступність. Недоліками даної установки є те, що вона призначена для гідродинамічного змішування ріпакової олії з дизельним паливом, а під роботу на суміші ріпакової олії з метилатом калію вона не розрахована.

Запропонована також удосконалена модульна установка для виробництва дизельного біопалива (рис. 2.12), що працює наступним чином: в ємності 1 повинна бути олія, в закритому резервуарі 4 метанол, в бункері-дозаторі 3 лужний каталізатор.



1 – ємність олії; 2 – ємність метилового спирту; 3 – дозатор каталізатора; 4 – реактор змішування метилового спирту та каталізатора; 5 – додатковий циркуляційний насос; 6 – основний циркуляційний насос; 7 – реактор; 8 – кавітаційна камера; 9 – теплообмінник; 10 – відстійник; 11 – генератор ультразвуку; 12 – ультразвукові випромінювачі відстійника; 13 – ультразвукові випромінювачі реактора

Рис. 2.12. Модульна установка для виробництва дизельного біопалива (патент України на корисну модель 36284)

Ємність 4 наповнюється необхідним об'ємом метанолу. Далі одночасно включаються змішувальний насос 5, дозатор лужного каталізатора 3 та ультразвукові випромінювачі 13. Циркуляція метанолу та активаційна ультразвукова обробка реагентного розчину продовжуються після припинення подачі лужного каталізатора дозатором 3 ще впродовж певного встановленого терміну. Далі включається циркуляційний насос 6, який заповнює сумішшю метилового спирту та рослинної олії до заданого об'єму реактор 7. Після цього циркуляція продовжується через кавітаційну камеру 8, а при необхідності й через теплообмінник 9, після чого весь об'єм перекачується у відстійник 10, де включаються ультразвукові випромінювачі 12 для утворення осаду.

Перевагами даної установки є можливість використання її у агропромисловому виробництві, наявність ультразвукових випромінювачів у відстійнику, реакторі змішування метилового спирту та лужного каталізатора забезпечує швидке утворення осаду, встановлення додаткового циркуляційного насоса дозволяє якісно змішати хімічні реагенти.

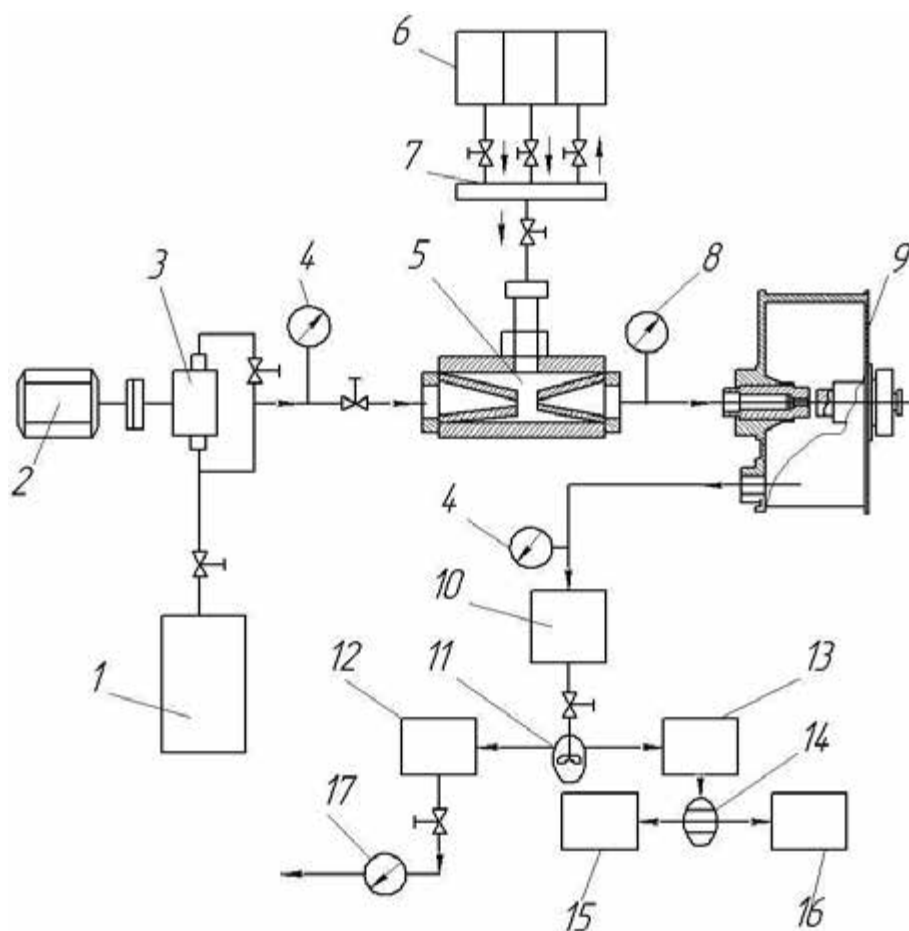
Недоліком названої установки є висока вартість за рахунок додаткових ємностей, ультразвукових випромінювачів та додаткового циркуляційного насоса, що заважає конкурувати на ринку з більш простим обладнанням розробленим під агропромислове виробництво.

Розроблена також модульна установка для виробництва дизельного біопалива (рис. 2.13), котра працює наступним чином: при включенні приводного електродвигуна 2 приводиться в рух гідронасос 3, який всмоктує ріпакову олію з ємності 1. Робочий тиск регулюється в магістралі манометром 4. Ріпакова олія під тиском проходить по напірній магістралі і попадає в дозатор-змішувач 5. Одночасно при відкритих кранах із секцій бака 6 в колектор 7 потрапляють дизельне паливо, метиловий спирт і каталізатор, які попередньо в ньому змішуються, всмоктуються в порожнину розрідження дозатора 5. Попередньо насичена суміш попадає в гідродинамічний кавітатор 9, в якому виконується глибоке диспергування суміші компонентів з ріпаковою олією на молекулярному рівні. Отримана суміш надходить по трубопроводу в технологічну ємність 10, а потім в сепаратор 11, де розділяється на фракції дизельного біопалива та водно-гліцеринової суміші, потім кожна фракція надходить до ємностей 12 і 13. Далі водно-гліцеринова суміш подається з ємності 13 в фільтр-вологоочисник 14, де розділяється на гліцерин і воду. Гліцерин зливається в ємність 15, а вода в ємність 16. У результаті дизельне біопаливо з ємності 12 по трубопроводу через витратомір 17 надходить для подальшого використання.

Перевагами даної установки є високоякісне перемішування за рахунок гідродинамічного диспергатора, можливість використання у сезонній роботі. Недоліками є складність конструкції, високі виробничі витрати та її габаритність.

Запропоновано до використання також обладнання для виробництва дизельного біопалива, яке працює наступним чином: до місткості 3 для змішування із контейнера 1 подається метиловий спирт, а із контейнера 2 на сітку 4 подається каталізатор (рис. 2.14). В місткості 3 за допомогою насосу 5

відбувається змішування метилового спирту з каталізатором. Після завершення перемішування утворений метилат калію за допомогою насосу 5 потрапляє до місткості 6 накопичення метилату калію з якої потім самопливом подається до насоса 8. Рослинний жир також подається самопливом із контейнера 7 до насоса 8. Суміш метилату калію з жиром насосом 8 подають до трубчатого змішувача 9 для естерифікації жиру, де за допомогою вставок-турбулізаторів 10 відбувається її перемішування. Після проходження естерифікації жиру отримана емульсія надходить у гравітаційний розділювач 11, в якому відбувається розділення на дизельне біопаливо та гліцериновий осад. Дизельне біопаливо відводиться із гравітаційного розділювача 11 через лійку 12.



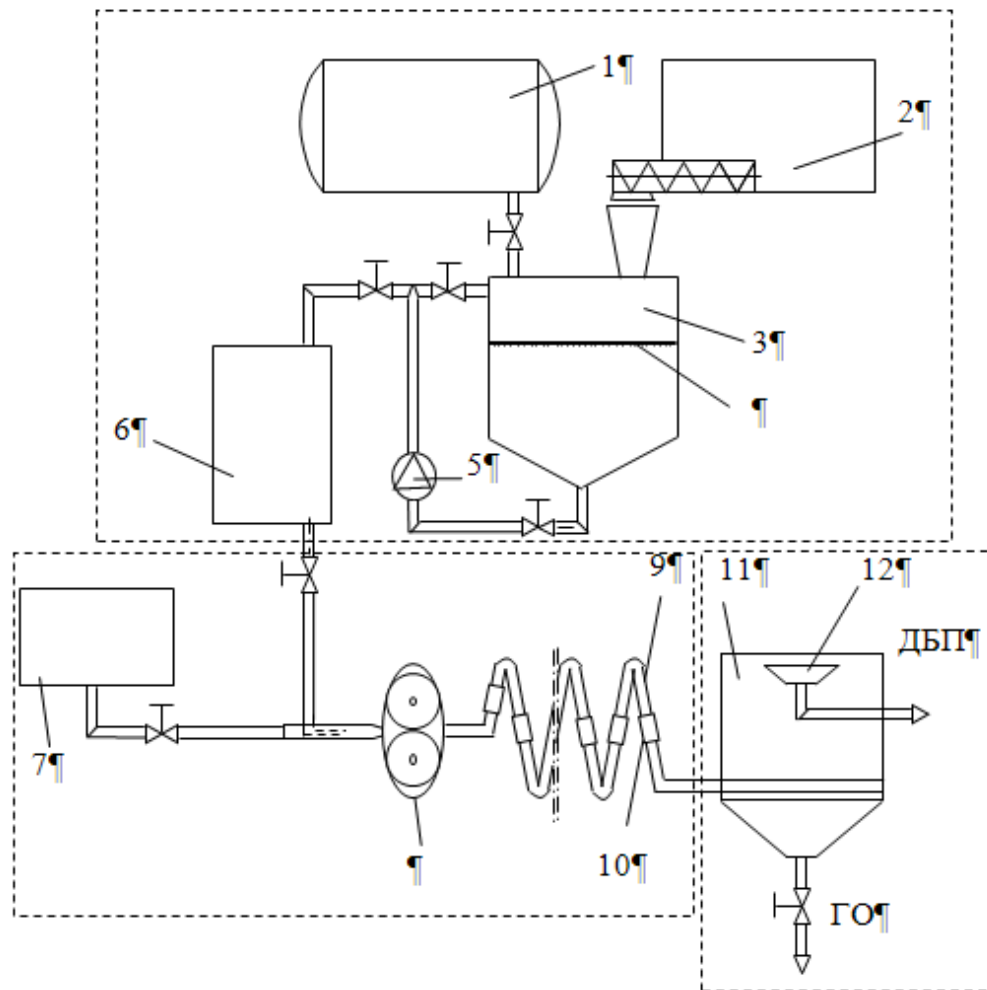
1 – технологічна ємність (для ріпакової олії); 2 – електродвигун; 3 – гідронасос; 4 – манометр; 5 – дозатор змішувач; 6 – бак; 7 – колектор; 8 – датчик температури; 9 – гідродинамічний диспергатор; 10 – ємність; 11 – сепаратор; 12 – ємність для дизельного біопалива; 13 – ємність для водно-гліцеринової суміші; 14 – фільтр-очисник; 15 – ємність для гліцерину; 16 – ємність для вологи; 17 – витратомір дизельного біопалива

Рис. 2.13. Модульна установка для виробництва дизельного біопалива (патент України на корисну модель 37619)

Перевагами цього обладнання є те, що воно дозволяє зменшити питому енергомідкість виробництва біодизельного палива за рахунок інтенсифікації процесу перемішування при естерифікації жиру. Воно також має незначну

матеріаломісткість за рахунок використання гідрозмішування метилового спирту з каталізатором.

Недоліками є те, що не використовується тепло, яке виділяється при розчиненні каталізатора метиловим спиртом на підігрів жиру перед виготовленням біодизельного палива, трубчатий змійовик має зависокий гідравлічний опір, що підвищує енергомісткість процесу естерифікації жиру та складний у виготовленні і монтажу, крім того обладнання не забезпечує належні показники якості біодизельного палива за короткий час відстоювання у потоці без фільтрування.



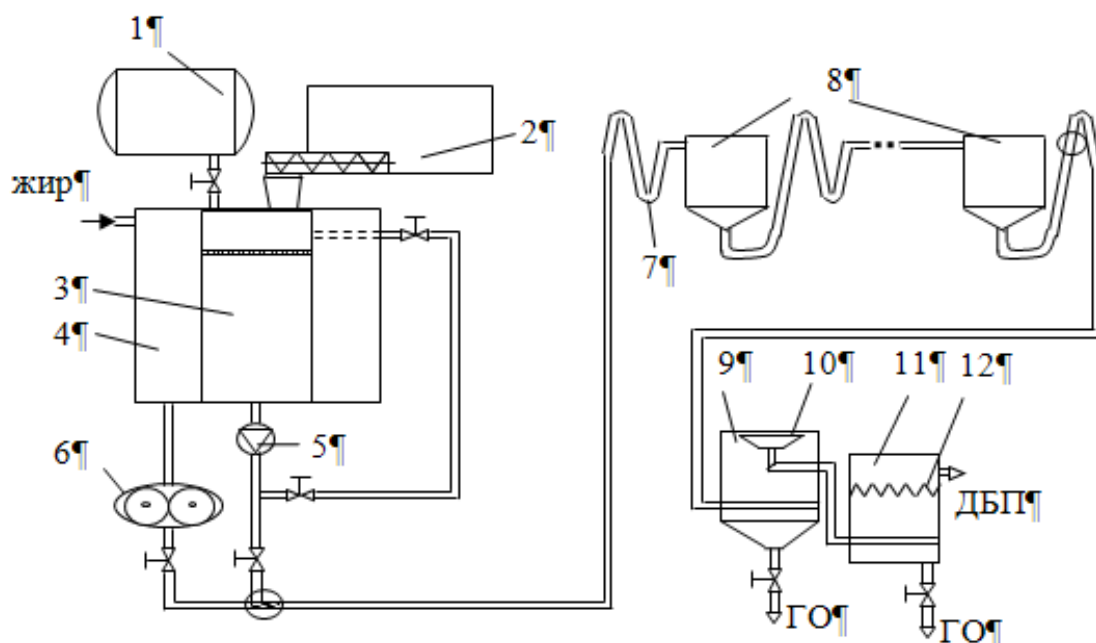
1 – ємність з метиловим спиртом; 2 – ємність з каталізатором; 3 – бак для змішування метилового спирту та каталізатора; 4 – сітка для каталізатора; 5 – насос для перекачування метилату калію; 6 – накопичувальна ємність метилату калію; 7 – бак для жиру; 8 – насос для перекачування жиру та метилату калію; 9 – трубчатий змійовик; 10 – вставка-турбулізатор; 11 – гравітаційний розділювач; 12 – лійка

Рис. 2.14. Обладнання для виробництва дизельного біопалива (патент України на винахід 89320)

Вище описане обладнання було удосконалено шляхом заміни трубчастих турбулізаторів на циліндрично-конічні компенсатори (рис. 2.15).

Перевагами цього обладнання є те, що відбувається якісне перемішування за рахунок проходження жиру та метилату калію через трубчатий змійовик з циліндрично-конічними компенсаторами, де відбувається основне змішування.

Недоліками є те, що дане обладнання потрібно використовувати при постійній подачі сировини до реактора, що забезпечується при великих обсягах виробництва дизельного біопалива. Періодичне використання такого обладнання призводить до складного і дорогого технічного оснащення і обслуговування.



1 – ємність з метиловим спиртом; 2 – ємність з каталізатором; 3 – бак для жиру; 4 – бак для змішування метилового спирту та каталізатора; 5 – насос для перекачування метилату калію; 6 – насос для відкачування жиру та виконання перемішування в гідрозмішувачі; 7 – трубчатий змійовик; 8 – циліндро-конічні компенсатори; 9 – гравітаційний розділювач; 10 – лійка; 11 – додатковий гравітаційний розділювач; 12 – фільтруючий елемент

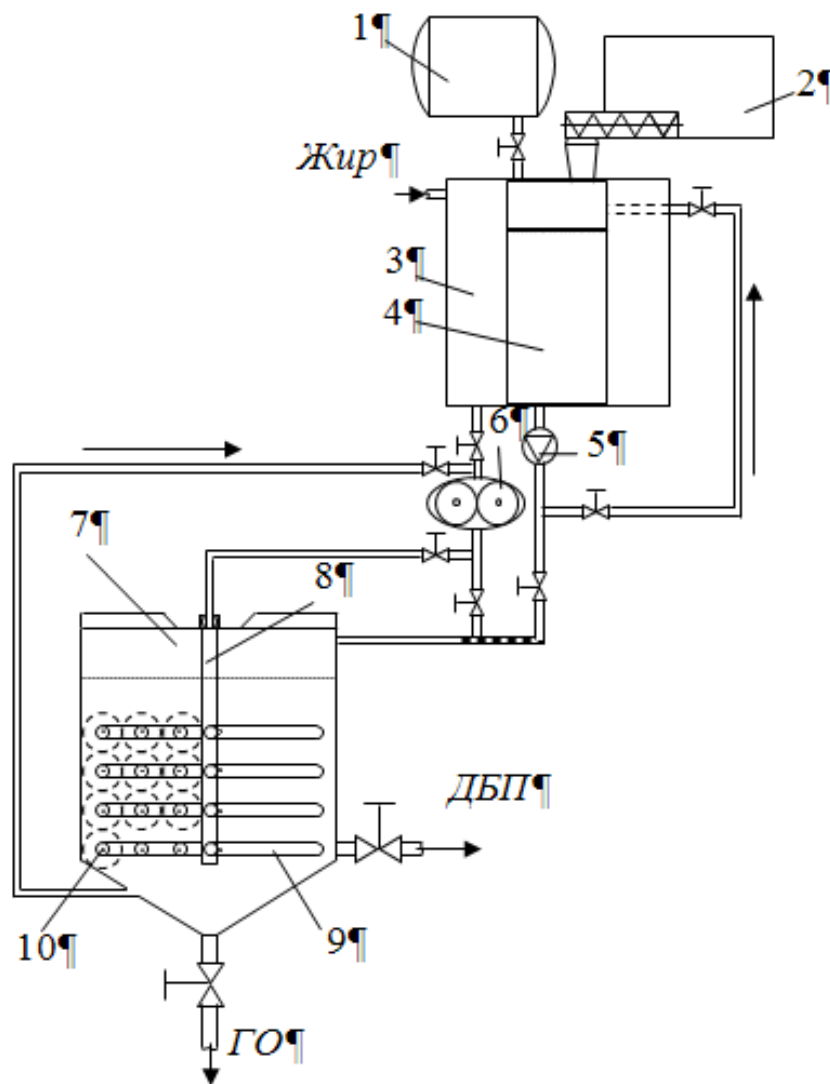
Рис. 2.15. Обладнання для виробництва дизельного біопалива (патент України на винахід 94346)

Відоме обладнання для виробництва дизельного біопалива, яке працює наступним чином: до ємності 4, із контейнера 1 метилового спирту подається метиловий спирт (рис. 2.16). Каталізатор із контейнера 2 подається в ємність 4 для розчинення. Насос 5 забезпечує повне розчинення каталізатора в метиловому спирті. Насос 6 подає із контейнера 3 жир і одночасно насос 5 із ємності 4 подає розчин метилату калію в гідрозмішувач 7. Під час перекачування емульсії, насос 6 подає суміш в гідромішалку 8, яка обертається за рахунок гідрореактивної сили струменів, що виходять із форсунок 10 розмішених на штангах 9 гідромішалки 8.

Після проходження естерифікації жиру отримана емульсія залишається у гідрозмішувачі 7 до повного розділення на дизельне біопаливо (ДБП) та гліцериновий осад (ГО).

Перевагами даного обладнання є мала габаритність, доступна вартість устаткування за рахунок використання гідроперемішування, можливість використання у сезонній роботі.

Недоліками є те, що перемішування емульсії відбувається пошарово і не забезпечується достатній рівень перемішування її шарів.



1 – ємність з метиловим спиртом; 2 – ємність з каталізатором; 3 – бак для жиру; 4 – бак для змішування метилового спирту та каталізатора; 5 – насос для перекачування метилату калію; 6 – насос для відкачування жиру та виконання перемішування в гідрозмішувачі; 7 – гідрозмішувач; 8 – гідромішалка; 9 – штанги гідромішалки; 10 – форсунки

Рис. 2.16. Обладнання для виробництва дизельного біопалива (патент України на винахід 100569)

В промисловому інституті механізації рільництва (ПІМР, Польща) було розроблене обладнання для виробництва дизельного біопалива W500M

(рис. 2.17) продуктивністю 500 л за 1 цикл, в якому застосовується перемішування без потреби підтримки температурного режиму. Дане обладнання розраховане для використання у сезонній роботі і при необхідності може мобільно перевозитись на причепі (рис. 2.18) для застосування в фермерських господарствах.



Рис. 2.17. Естерифікатор для виробництва дизельного біопалива в умовах фермерських господарств (Польща)



Рис. 2.18. Мобільне обладнання для виробництва дизельного біопалива W500M

Ряд установок для виробництва дизельного біопалива пройшли випробування в Українському НДІ прогнозування та випробування техніки і технологій для с-г виробництва ім. Л. Погорілого. Однак резерви удосконалення обладнання для виробництва дизельного біопалива ще в повній мірі не вичерпані.

2.4. Теоретичні основи виробництва дизельного біопалива

За експертною оцінкою якісних показників дизельного біопалива найвагомішими показниками якості виробленого дизельного біопалива є кінематична в'язкість та температура спалаху. Їх спільна вагомність становить 60 %, а тому оцінку якості дизельного біопалива доцільно визначати за наступним виразом:

$$P_{я} = \alpha(v_{\phi} > v_{н}; \frac{v_{\phi} - v_{н}}{v_{н}}; 0) + \beta(T_{с\phi} < T_{сн}; \frac{T_{сн} - T_{с\phi}}{T_{сн}}; 0) \quad (2.8)$$

де $P_{я}$ – показник величини відхилення фактичних значень якості дизельного біопалива від нормативних (узагальнений показник якості), %; α – вагомність показника кінематичної в'язкості палива, %; v_{ϕ} , $v_{н}$ – фактичне і нормативне значення кінематичної в'язкості, мм²/с; β – вагомність показника температури спалаху, %; $T_{с\phi}$, $T_{сн}$ – фактичне і нормативне значення температури спалаху, °С.

Встановлено, що кінематична в'язкість дизельного біопалива залежить від концентрації метилату калію, а температура спалаху – від часу відстоювання з доступом повітря.

Експериментальні дослідження показали (рис. 2.19), що із збільшенням концентрації метилату калію при естерифікації рослинної олії зменшується кінематична в'язкість. При додаванні 143 г і більше метилату калію на один літр ріпакової олії кінематична в'язкість буде відповідати вимогам ДСТУ 6081:2009.

Із збільшенням часу відстоювання метилового ефіру (рис. 2.20) збільшується його температура спалаху, що пояснюється поступовим вивільненням залишків метилового спирту. Необхідний час відстоювання метилового ефіру для отримання нормованої температури спалаху згідно ДСТУ 6081:2009 становить не менше 148 годин.

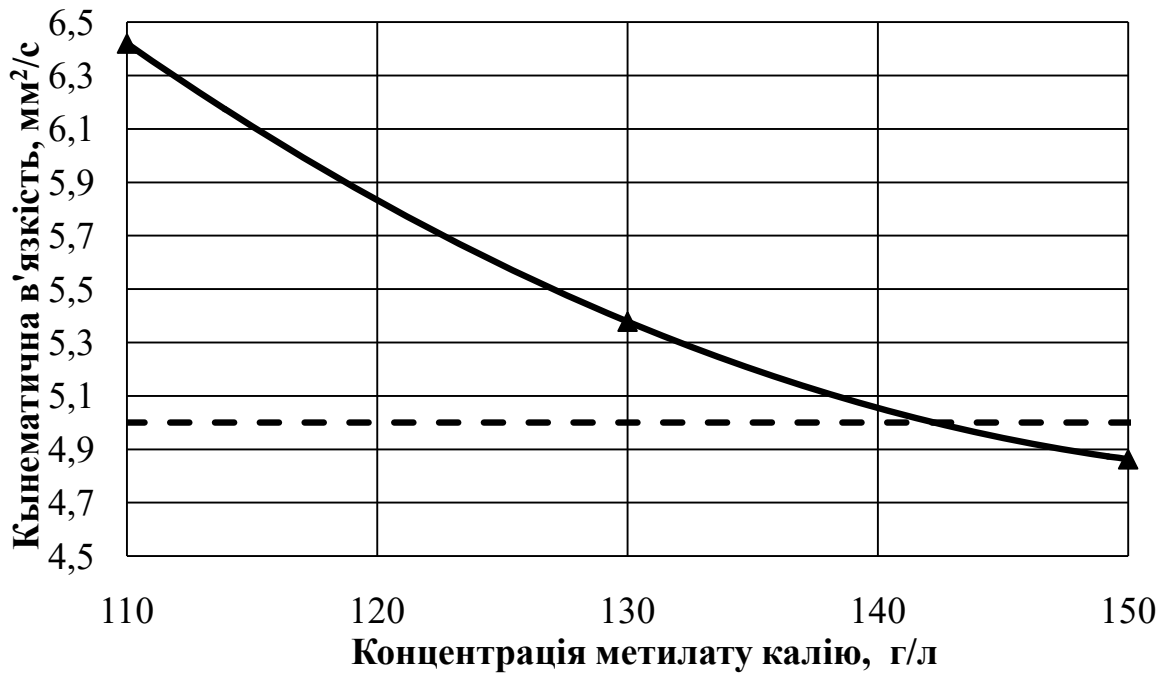
Для визначення коефіцієнту виходу дизельного біопалива користуються виразом:

$$k_{дбп} = \frac{V_{дбп}}{V_о} 100\% \quad (2.9)$$

де $k_{дбп}$ – коефіцієнт виходу дизельного біопалива, %; $V_{дбп}$ – об'єм дизельного біопалива, л; $V_о$ – об'єм олії, л.

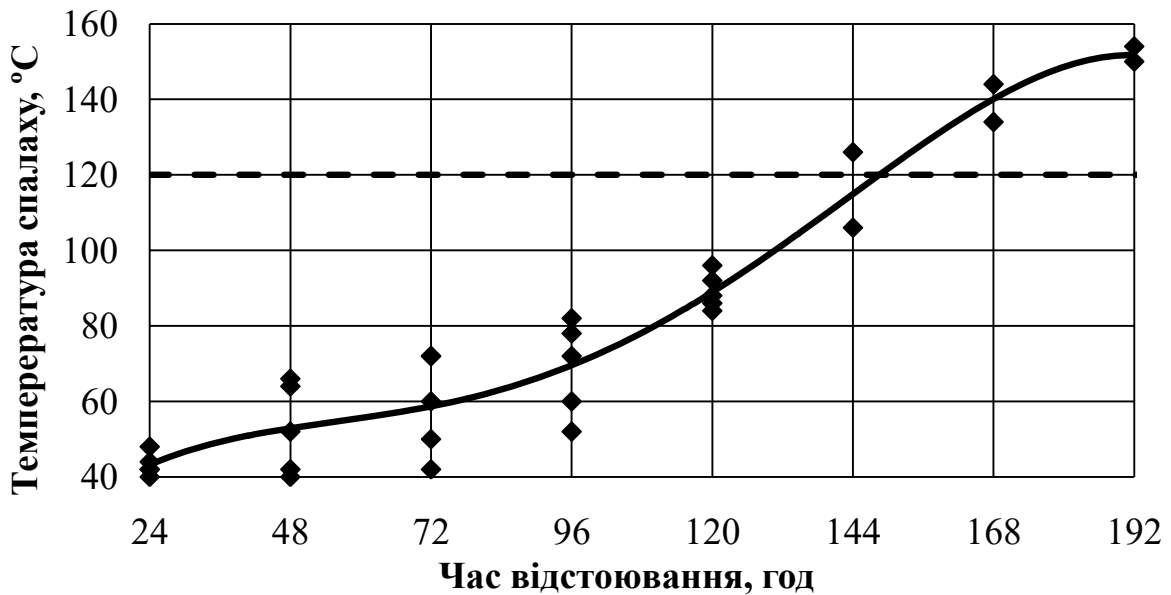
Для визначення продуктивності процесу естерифікації рослинної олії в дизельне біопаливо використовують вираз:

$$Q = \frac{V_0 k_{ДБП}}{\tau_3 + \tau_M + \tau_B} \quad (2.10)$$



— — Значення згідно ДСТУ 6081:2009 ▲ Експериментальні дані

Рис. 2.19. Залежність кінематичної в'язкості від концентрації метилату калію



— — Значення згідно ДСТУ 6081:2009 ◆ Експериментальні дані

Рис. 2.20. Залежність температури спалаху від часу відстоювання метилового ефіру з доступом повітря

де Q – продуктивність процесу естерифікації, м³/год. $k_{ДБП}$ – коефіцієнт виходу дизельного біопалива, відн. од.; τ_3 – час закачування в реактор суміші рослинної олії та метилату калію, год.; τ_M – час перемішування суміші, год.; τ_B – час відстоювання суміші на дизельне біопаливо і гліцериновий осад, год.

Спожиту електроенергію визначають за виразом:

$$W = \frac{P_3 \tau_3 + P_M \tau_M}{1000} \quad (2.11)$$

де W – спожита електроенергія, кВт год.; P_3 – фактична потужність насоса при закачуванні в реактор суміші рослинної олії та метилату калію, Вт, P_M – фактична потужність насоса при перемішуванні суміші, Вт.

Питомі витрати електроенергії для виробництва дизельного біопалива визначають за виразом:

$$E = \frac{W}{Q} 100 \quad (2.12)$$

де E – питомі витрати електроенергії, кВт год./м³.

Приведені залежності дозволяють визначити основні якісні та енергетичні показники виробництва дизельного біопалива.

2.5. Економічна ефективність виробництва дизельного біопалива

У аграрному виробництві для власних потреб доцільно використовувати невеликі установки та міні-заводи з виробництва дизельного біопалива продуктивністю від 30 до 300 т за рік. Сільськогосподарські підприємства у цьому випадку мають можливість економити обігові кошти і при цьому повністю забезпечувати себе дизельним біопаливом, а тваринницьку галузь макухою.

Виробничі витрати на виробництво дизельного біопалива за допомогою обладнання БДУ-100 продуктивністю 100 л/год. упродовж 2008-2013 рр. приведені в таблиці 2.1. Як видно із таблиці, виробничі витрати на виробництво дизельного біопалива за останні 5 років фактично подвоїлися за рахунок збільшення вартості обладнання, вартості електроенергії та росту заробітної плати.

Техніко-економічні показники виробництва дизельного біопалива (табл. 2.2) визначалися при його виході із олії 95%, розході ріпакової олії 53 т/рік, виході гліцеринового осаду 10,7 т/рік, співвідношенні метанолу і олії 0,14 відн. од. та каталізатора і метанолу 0,1 відн. од., а також відповідно розходу метанолу 7,37 т/рік і розходу каталізатора 0,74 т/рік. Теплотворна здатність дизельного палива при розрахунках приймалася на рівні 42 МДж/кг, а дизельного біопалива – 37 МДж/кг.

Густина дизельного біопалива приймалася на рівні 840 кг/м³. Ставка амортизаційних відрахувань приймалася на рівні 8 %, а відрахувань на технічне обслуговування і ремонт на рівні 6 %.

Таблиця 2.1. Виробничі витрати на виробництво дизельного біопалива

Марка обладнання	БДУ-100	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Продуктивність	л/год.	100					
	т/рік	50					
Капіталовкладення	грн	29000	33263	35558	37941	39686	40281
Амортизаційні відрахування	грн/рік	2320	2661	2845	3035	3175	3222
	грн/т	46,40	53,22	56,89	60,70	63,50	64,45
Відрахування на ТО	грн/рік	1740	1996	2133	2276	2381	2417
	грн/т	34,80	39,92	42,67	45,53	47,62	48,34
Вартість електроенергії	грн/кВт год.	0,43	0,52	0,60	0,73	0,73	0,79
Витрати на електроенергію	грн/т	3,88	4,73	5,44	6,66	6,66	7,20
Кількість обслуговуючого персоналу	чол.	1 (сумісник)					
Місячна зарплата обслуговуючого персоналу	грн/міс	1101	1220	1430	1759	2086	2340
Фонд зарплати персоналу	грн/рік	18206	20174	23646	29616	34494	38694
	грн/т	364,12	403,48	472,93	592,32	686,88	773,88
Всього витрат	грн/т	402,80	448,1	521,0	644,5	744,2	829,4
Загальновиробничі витрати	%	5					
	грн/т	20,14	22,41	26,1	32,23	37,21	41,47
Загальногосподарські витрати	%	10					
	грн/т	40,28	44,81	52,10	64,45	74,42	82,94
Питомі виробничі витрати	грн/т	463,22	515,34	599,20	742,18	855,79	953,83

Питомі витрати електроенергії становили 9,1 кВт год./т (встановлена потужність 1 кВт, коефіцієнт використання потужності 0,8 відн. од. Величина відрахування у соціальні фонди із зарплати приймалися на рівні 37,8%.

Як видно із таблиці, ціна рослинної олії в 2013 році була в порівнянні з 2008 роком більшою в 2 рази, ціна метилового спирту та каталізатора за цей же період збільшилася 1,7 рази, а ціна на дизельне паливо виросла в 2,5 рази. А це в свою чергу впливає на рівень рентабельності виробництва дизельного біопалива та прибуток. Оскільки ціни на нафтопродукти з кожним роком збільшуються, зростає також вартість сировини та хімічних компонентів, а це в свою чергу, впливає на рівень рентабельності виробництва дизельного біопалива та прибуток.

Таблиця 2.2. Техніко-економічні показники виробництва дизельного біопалива

Марка обладнання	БДУ-100	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Вартість метанолу	грн/т	5000	5660	6424	8011	8596	7907
Вартість каталізатора	грн/т	17800	20150	22870	28519	30600	28148
Вартість реактивів	грн/т	999,16	1131,05	1283,74	1600,82	1717,68	1580,01
Ціна гліцеринового осаду	грн/т	1355	1534	1741	2171	2329	2143
Вартість гліцеринового осаду	грн/т	290,97	329,38	373,84	466,18	500,21	460,12
Собівартість олії	грн/т	2930	3857	4516	6197	6494	5814
Вартість олії	грн/т	3085	4060	4762	6524	6836	6120
Собівартість виробництва ДБП	грн/т	4256	5377	6263	8400	8909	8193
Вартість ДП у рік використання ДБП	грн/л	5,19	6,43	8,97	9,51	9,27	13,98
	грн/т	6175	7653	10683	11326	11034	16640
Прибуток	грн/т	869	955	2682	944	148	5824
Прибуток після оподаткування	грн/т	609	668	1878	661	103	4077
Рентабельність	%	14,3	12,4	30,0	7,9	1,2	49,8
Термін окупності	років	0,95	1,00	0,38	1,15	7,68	0,20
Середнє значення	років	1,89					

Таким чином, оцінку економічної ефективності виробництва дизельного біопалива доцільно здійснювати з урахуванням індивідуальних особливостей конкретного фермерського господарства.

Лабораторна робота 2: Ознайомитися з конструкцією гідромеханічної мішалки для виробництва дизельного біопалива та визначити її параметри.

Мета роботи: Ознайомитись з принципом дії гідромеханічної мішалки. Визначити залежність частоти обертання гідромеханічної мішалки від частоти струму, що подається на електродвигун.

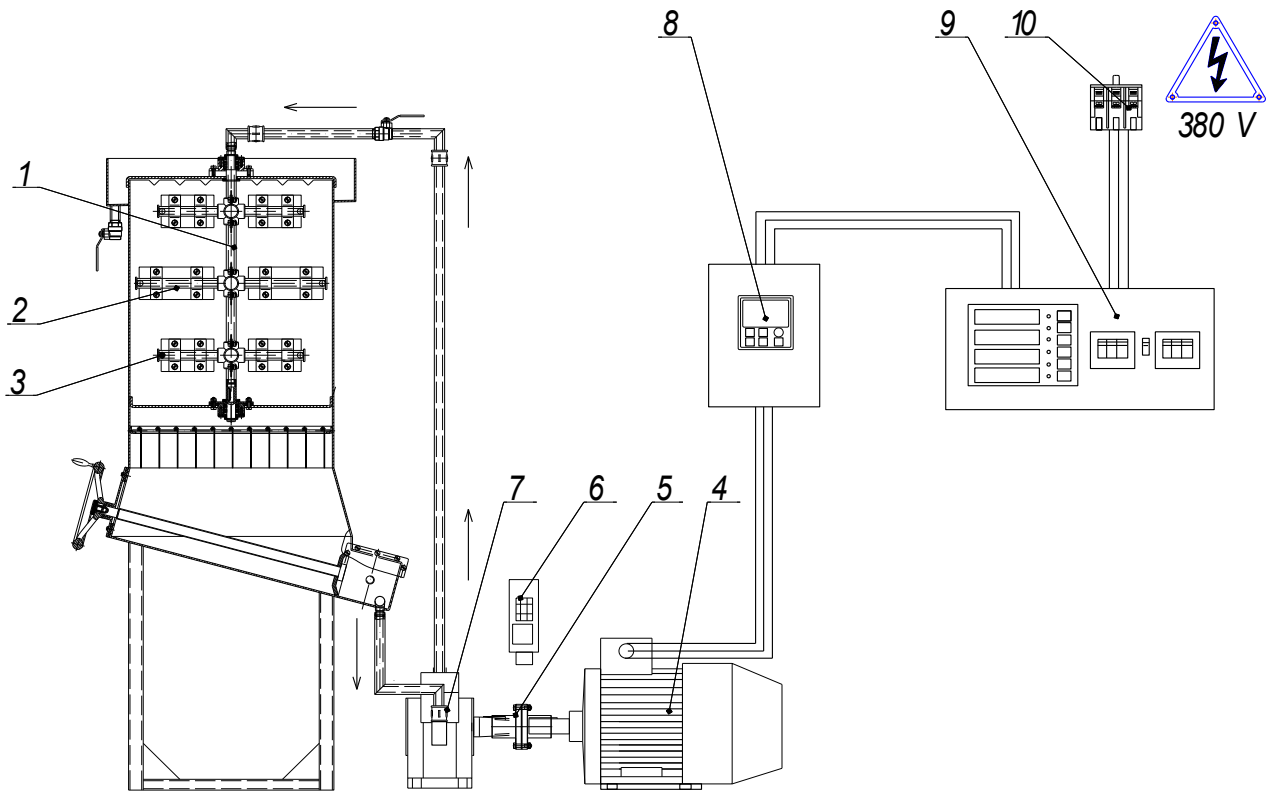
Прилади та обладнання: гідромеханічна мішалка, гідростанція, лазерний вимірювач частоти обертання, частотний перетворювач струму, аналізатор параметрів мережі, секундомір.

Ознайомлення з конструкцією гідромеханічної мішалки для виробництва дизельного біопалива проводиться згідно схеми обладнання (рис. 2.21) та підключених для вимірювання допоміжних приладів. Гідромеханічна мішалка підключається до електричної мережі через частотний перетворювач струму. Змінюючи частоту струму, що подається на електродвигун від 50 до 20 Гц, в межах заданого часу вимірювань, визначається частота обертання вала

електродвигуна та кількість обертів мішалки. Результати вимірів заносяться в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1. Результати вимірювань параметрів гідромеханічної мішалки

Назва параметру	Частота струму, що подається на електродвигун	Заданий час	Частота обертання вала двигуна	Кількість обертів мішалки
Позначення	f	t	n_d	n_m
Одиниці вимірювання	Гц	с	об/хв.	об/хв.
Дослід 1	50	10	1497	25,5
Дослід 2	40	10	1197	25,5
Дослід 3	30	10	897	24
Дослід 4	20	10	597	18



1 – гідромеханічна мішалка; 2 – лопатка; 3 – форсунка; 4 – електродвигун; 5 – муфтове з'єднання; 6 – лазерний вимірювач частоти обертання; 7 – насос шестерінчастий; 8 – частотний перетворювач струму; 9 – аналізатор параметрів мережі; 10 – трифазна електрична мережа
Рис. 2.21. Схема загального вигляду обладнання для виробництва дизельного біопалива з використанням гідромеханічного перемішування та його підключення до електричної мережі

За результатами дослідів будується графічна залежність кількості обертів гідромеханічної мішалки від частоти струму, що подається на електродвигун (рис. 2.22).

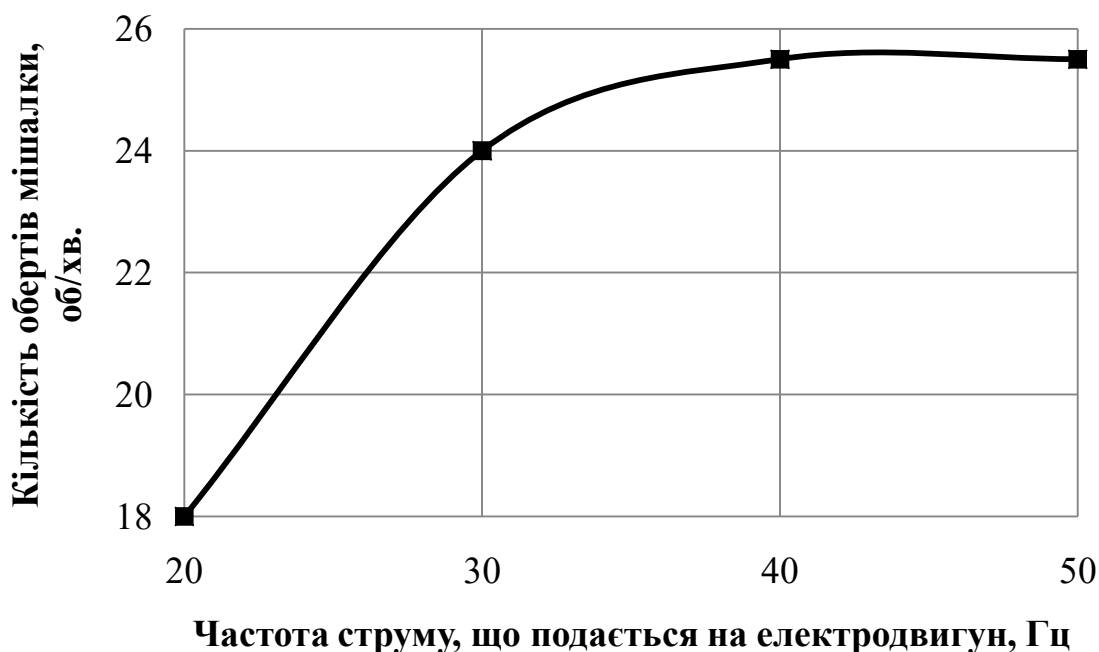


Рис. 2.22 Залежність кількості обертів гідромеханічної мішалки від частоти струму, що подається на електродвигун

Таким чином, експериментально встановлено, що зі збільшенням частоти струму, що подається на електродвигун частота обертання гідромеханічної мішалки збільшується. Особливо це характерно при зміні частоти струму від 20 до 40 Гц. При зміні частоти струму від 40 до 50 Гц частота обертання гідромеханічної мішалки є незмінною. Максимальна кількість обертів гідромеханічної мішалки становить 25,5 об/хв.

Практична робота 2: Розрахувати вартість олії гарячого віджимання для використання при виробництві дизельного біопалива, а також необхідні обсяги метилату калію (метилового ефіру й гідроокислу калію) та вихід дизельного біопалива із однієї тони олії.

Вихідні дані: загальний коефіцієнт виходу олії $k_o = 30\%$; коефіцієнт виходу олії першого (холодного) віджимання, $k_{ox} = 10\%$; ціна олії $C_o = 16$ грн./кг; ціна олії першого (холодного) віджимання $C_{ox} = 20$ грн./кг. У розрахунках прийняти, що для виробництва дизельного біопалива використовують метилат калію, який є сумішшю метилового спирту і КОН у співвідношенні 10:1. Витрата метилату калію для отримання дизельного біопалива: на 1 літр рослинної олії – 150 мл метилату калію. Фактична потужність насоса при закачуванні в реактор суміші рослинної олії та метилату калію становить 2250 Вт, а фактична потужність насоса при перемішуванні суміші 1890 Вт.

При двохступінчатому віджиманні коефіцієнт виходу олії другого (гарячого) віджимання k_{OG} та її гранична ціна C_{OG} становитимуть:

$$k_{OG} = k_O - k_{OX} = 30 - 10 = 20 \%,$$

$$C_{OG} = \frac{k_O C_O - k_{OX} C_{OX}}{k_O - k_{OX}} = \frac{30 \cdot 16 - 10 \cdot 20}{30 - 10} = 14 \text{ грн./кг.}$$

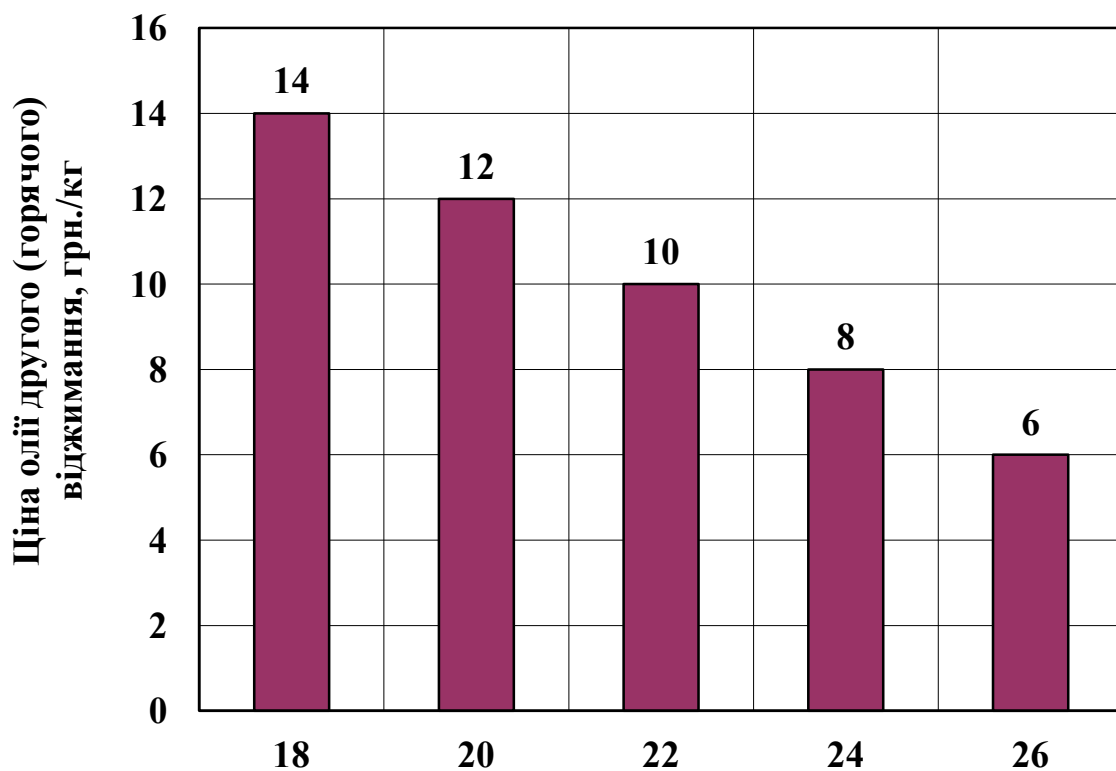
Коефіцієнт виходу олії першого (холодного) віджимання при якому ціна олії другого (гарячого) віджимання матиме нульове значення становить:

$$k_{OX} = k_O \frac{C_O}{C_{OX}} = 30 \frac{16}{20} = 24 \%.$$

Коли коефіцієнти виходу олії першого (холодного) та другого (гарячого) віджимання однакові і становлять $k_{OX} = k_{OG} = \frac{k_O}{2}$, гранична ціна олії другого (гарячого) віджимання в залежності від ціни олії першого (холодного) віджимання становитиме:

$$C_{OG} = 2C_O - C_{OX} = 2 \cdot 16 - 20 = 12 \text{ грн./кг.}$$

При зміні ціни ціна олії першого (холодного) віджимання в межах від 18 до 26 грн./кг, гранична ціна олії другого (гарячого) віджимання буде змінюватися в межах від 14 до 6 грн./кг (рис. 2.21).



Ціна олії першого (холодного) віджимання, грн./кг

Рис. 2.21. Залежність ціни олії другого (гарячого) віджимання від ціни олії першого (холодного) віджимання

Для отримання 1000 л рослинної олії необхідно переробити приблизно 3 тони зерна. Розхід метилату калію – 150 л на 1000 л рослинної олії. Для виготовлення 1 л метилату калію необхідно використати 1 літр метилового спирту та 100 грам КОН. Отже на 1000 л рослинної олії необхідно 150 л метилового спирту і 15 кг КОН.

Враховуючи, що з суміші 1000 л рослинної олії та 150 л метилату калію можна отримати 900 л метилового ефіру (дизельного біопалива) та від 150 до 190 л гліцеринового осаду, визначимо коефіцієнт виходу дизельного біопалива за наступним виразом:

$$k_{ДБП} = \frac{V_{ДБП}}{V_O} = \frac{900}{1000} 100\% = 90\%$$

Знаючи час закачування рослинної олії та метилату калію, який становить 0,2 год.; час перемішування, який становить 0,5 год.; а також час відстоювання після перемішування, який становить 2 год., можна розрахувати продуктивність обладнання для виробництва дизельного біопалива за виразом:

$$Q = \frac{V_O k_{ДБП}}{\tau_3 + \tau_M + \tau_B} = \frac{1000 \cdot 0,9}{0,2 + 0,5 + 2} = 333 \text{ л/год.} = 0,333 \text{ м}^3/\text{год.}$$

де $k_{ДБП}$ – коефіцієнт виходу дизельного біопалива, відн. од.

Споживана потужність при використанні шестерінчастого насоса для подачі та перемішування суміші визначається за виразом:

$$W = \frac{P_3 \tau_3 + P_M \tau_M}{1000} = \frac{2250 \cdot 0,2 + 1890 \cdot 0,5}{1000} = 1,395 \text{ кВт.}$$

Питому енергоємність виробництва дизельного біопалива визначаємо за виразом:

$$E = \frac{W}{Q} = \frac{1,395}{0,333} = 4,19 \text{ кВт год./м}^3$$

Таким чином, двохступінчатє віджимання дозволяє отримати високоякісну олію першого (холодного) віджимання для харчових потреб та недорогої олію другого (гарячого) віджимання – для потреб виробництва дизельного біопалива.

Запитання для самоконтролю:

1. Які основні операції технологічного процесу при використанні промислової технології виробництва рослинної олії?
2. Які технологічні операції відсутні в агропромисловій технології виробництва дизельного біопалива у порівнянні з промисловою?
3. Який відсоток рослинної олії виробляється в сільському господарстві за агропромисловою технологією?
4. Опишіть технологічну схему агропромислового виробництва дизельного біопалива із використанням двохстадійного віджиму олії.

5. Які основні операції технологічного процесу отримання дизельного біопалива?
6. Які основні переваги невеликих заводів для агропромислового виробництва дизельного біопалива?
7. Яка необхідність застосування двохступінчатого віджимання для отримання рослинної олії?
8. Як може бути визначена ціна олії другого (гарячого) віджимання в залежності від ціни олії першого (холодного) віджимання у випадку, коли коефіцієнти виходу олії першого (холодного) та другого (гарячого) віджимання однакові?
9. Які основні недоліки застосування двохступеневої схеми виробництва рослинної олії?
10. За рахунок чого досягається економічна ефективність виробництва дизельного біопалива при застосуванні двохступінчатого віджимання?
11. Охарактеризуйте залежність ціни олії другого (гарячого) віджимання від ціни олії першого (холодного) віджимання.
12. Які основні недоліки існуючих установок для виробництва дизельного біопалива?
13. Від яких речовин необхідно очищати дизельне біопаливо?
14. Які реактори застосовуються для виробництва дизельного біопалива? Охарактеризуйте їх.
15. Які основні переваги невеликих заводів для агропромислового виробництва дизельного біопалива?
16. За рахунок чого досягається економічна ефективність виробництва дизельного біопалива?
17. Від яких факторів залежить собівартість виробництва дизельного біопалива?
18. Який вид перемішування суміші рослинної олії та метилату калію найефективніший?
19. Що являє собою процес естерифікації?
20. Який вихід дизельного біопалива із рослинної олії?
21. За якими показниками оцінюють якість виробленого дизельного біопалива?
22. Як змінюється кінематична в'язкість дизельного біопалива в залежності від концентрації метилату калію?
23. Як змінюється температура спалаху дизельного біопалива в залежності від часу його відстоювання з доступом повітря?
24. Як визначається коефіцієнт виходу дизельного біопалива?
25. Як визначається продуктивність процесу естерифікації рослинної олії в дизельне біопаливо?
26. Як визначаються питомі витрати електроенергії для виробництва дизельного біопалива?
27. Опишіть роботу обладнання для виробництва дизельного біопалива з використанням гідромеханічного перемішування.

Література:

1. Голуб Г. Эффективность производства дизельного биотоплива в условиях фермерских хозяйств / Геннадий Голуб, Максим Павленко, Светлана Осауленко // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. – Lublin, 2014. – Vol. 16. № 4. – С. 263-268.
2. Голуб Г.А. Оцінка сировинної бази виробництва дизельного біопалива при двохступінчастому віджиманні рослинної олії / Г. А. Голуб, М. Ю. Павленко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК / Редкол.: Д. О. Мельничук (відп. ред.) та ін. – К.: ВЦ НУБіП України, 2014. Вип 194, ч.1. – С. 175-181.
3. Осейко М.І. Технологія рослинних олій: Підручник, – К.: Варта. – 2006. – 280 с.
4. Павленко М.Ю. Аналіз технологій виробництва рослинної олії / М. Ю. Павленко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК / Редкол.: Д.О. Мельничук (відп. ред.) та ін. – К., 2013. Вип 185, ч.2. – С. 83-87.
5. Голуб Г.А. Аналіз технологій виробництва рослинної олії та дизельного біопалива на її основі. Г.А. Голуб, М.Ю. Павленко, С.В. Лук'янець / Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: збірник наук. пр. / ДНУ «Український наук.-досл. ін.-т. прогнозування та випробування техніки і технологій для с.-г. виробництва ім. Леоніда Погорілого» (УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого); Редкол.: Кравчук В.І. (голов. ред.) та ін. – Дослідницьке, 2012. – Вип. 16 (30), кн. 2. – С. 391-399.
6. Павленко М.Ю. Аналіз технологій виробництва дизельного біопалива / М. Ю. Павленко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК / Редкол.: Д.О. Мельничук (відп. ред.) та ін. – К., 2013. Вип 185, ч.1. – С. 161-166.
7. Production and use of biodiesel in agrosystems / [Golub G., Dubrovin V., Pavlenko M., Chuba V.] // The 8th International Research and Development Conference of Central and Eastern European Institutes of Agricultural Engineering. Poznan, Puszczukowo, Poland: 2013. – P. 49-53.
8. Голуб Г.А. Особливості установок для виробництва дизельного біопалива / Г.А. Голуб, В.В. Чуба, М.І. Вільовка // Промислова гідравліка і пневматика (Всеукраїнський науково-технічний журнал). – 2011. – № 2 (32). – С. 91-95.
9. Виробництво та використання дизельного біопалива на основі рослинних олій / [Голуб Г.А., Павленко М.Ю., Чуба В.В., Кухарець С.М.; за ред. д-ра техн. наук, проф. Г.А. Голуба] // К. : НУБіП України, 2015. – 119 с.
10. Голуб Г.А. Економічна ефективність виробництва дизельного біопалива в умовах фермерських господарств / Г.А. Голуб, М.Ю. Павленко, С.В. Осауленко // Вісник ЖНАЕУ. Житомир: 2014, випуск №2 (45), т 4. ч II – С. 272-278.

11. Голуб Г.А. Напрямки удосконалення виробництва і використання дизельного біопалива / Г.А. Голуб, В.В. Чуба, М.Ю. Павленко // Збірник наукових праць ВНАУ. – Вінниця, 2012. – Вип. 10, т.1 (58). – С. 20-23.
12. Голуб Г.А. Технологічна схема виробництва комбікормів та дизельного біопалива / Г.А. Голуб, М.Ю. Павленко, О.М. Ачкевич // Вісник ЖНАЕУ. Житомир: 2015, випуск №2 (50), т 1.– С. 364-368.
13. Golub G.A. Оценка сырьевой базы производства дизельного биотоплива при двуступенчатом отжыме растительного масла / Gennadiy Golub, Maksim Pavlenko, Natalia Olar // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. – Lublin, 2014. – Vol. 16. № 3. – С. 26-33.
14. Golub G.A. Эффективность использования оборудования для производства дизельного биотоплива / Gennadiy Golub, Maksim Pavlenko, Saveliy Kuharets // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. – Lublin, 2015. – Vol. 17. № 3. – С. 11-16.
15. Golub G.A. Совершенствование технологической схемы производства комбикормов и дизельного биотоплива / Gennadiy Golub, Maksim Pavlenko, Oksana Achkevych // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. – Lublin, 2015. – Vol. 17. № 4. – С. 187-191.
16. Dubrovin V.A. Možnosti a perspektivy výroby a použití kapalných biopaliv na Ukrajině / Dubrovin V.A., Grigorovich A.I., Dragnev S.V., Golub G.A., Pavlenko M. Yu., Syera K.M. // Sborník přednášek a odborných prací. Praha – 2014. p. 120-124.
17. Голуб Г. Дослідження енергетичної ефективності циркуляційних реакторів-розділювачів / Голуб Г., Кухарець С., Осипчук О., Павленко М. // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: збірник наукових праць / ДНУ "УкрНДІ прогнозування та випробування техніки і технологій для с.-г. виробництва імені Леоніда Погорілого" (УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого); Редколегія: Кравчук В.І. (головний редактор) та інші. – Дослідницьке, 2015. – Вип. 19 (33). – 502 с. – С. 276-282.
18. Павленко М.Ю. Енергомісткість гідромеханічного перемішування при виробництві дизельного біопалива / М.Ю. Павленко, Г.А. Голуб // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія "Механізація та автоматизація виробничих процесів". – Суми: СНАУ, 2014. – Вип. 11 (26). – 135. – С. 39-41.
19. Кухарець С.М. Аналіз процесу отримання біодизельного пального та обґрунтування основних параметрів реактора-розділювача / Кухарець С.М., Голуб Г.А. Хрус В.М. // Сучасні проблеми збалансованого природокористування: Збірник наукових праць / Подільський державний аграрно-технічний університет (ПДАТУ); Науковий редактор: Іванишин І.І. – Кам'янець-Подільський, 2014. – Спеціальний випуск до ІХ науково-практичної конференції. – 220 с. – С. 137-143.

3. ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ДИЗЕЛЬНОГО БІОПАЛИВА

3.1. Основні властивості дизельного біопалива на основі рослинних олій як моторного палива

Дизельне біопаливо – це паливо, вироблене з рослинних олій або тваринних жирів, яке за своїми характеристиками подібне до дизельного палива і може використовуватись у дизельних двигунах, як в сумішах із дизельним паливом, так і в чистому вигляді.

Головна технічна проблема широкого впровадження дизельного біопалива полягає у необхідності адаптації існуючих дизельних двигунів до даного типу палива через відмінність деяких фізичних властивостей даного типу палива у порівнянні з дизельним паливом (табл. 3.1).

Таблиця 3.1. Фізичні властивості дизельного палива, дизельного біопалива та ріпакової олії

Характеристика	Дизельне паливо	Дизельне біопаливо	Ріпакова олія
Цетанове число, не менше	45	51	–
Густина, кг/м ³	860	860–900	952
Кінематична в'язкість, мм ² /с	3,0–6,0	3,5–5	78,7
Температура розгонки, °С			
5%	214	326	300
50%	280	335	–
96%	370	341	–
Вміст води (за методом Карла Фішера), мг/кг	52	500	310
Масова частка сірки, % не більше	0,288	0,001	0,009
Температура спалаху в закритому тиглі не менше, °С	40	120	324
Гранична температура фільтрованості, °С не вище	-5	+5	–
Коксованість 10% залишку, % не більше	0,3	0,3	<0,01
Зольність, % не більше	0,01	0,02	<0,01
Вміст, %			
С	87	77,4	77
Н	12,6	12,3	12
О	–	10	11
Нижча теплота згорання, МДж/кг	42,5	37,1– 37,8	36

Аналіз даних табл. 3.1 показує, що дизельне біопаливо найбільш близьке за енергоємністю та хімічним складом до дизельного палива, тому його застосування потребує мінімальних змін у системі живлення дизельного двигуна.

До переваг дизельного біопалива порівняно з дизельним паливом слід віднести:

- відновлювальність сировинної бази;
- значно меншу емісію вуглекислого газу, як парникового газу в атмосферу;
- кращі мастильні властивості порівняно, що зменшує зношуваність паливного насоса високого тиску та збільшує термін його служби;
- вищу пожежобезпечність, оскільки воно має вищу температуру самозаймання;
- вище цетанове число;
- практично повна відсутність сірки в паливі;
- відсутність шкоди при попаданні в навколишнє середовище, оскільки воно переробляється ґрунтовими мікроорганізмами упродовж 3-4-х тижнів.
- можливість його використання як у чистому вигляді, так і в суміші в будь-яких пропорціях з дизельним паливом.

До недоліків дизельного біопалива, котрі важко усунути тим чи іншим способом у процесі виробництва, слід віднести:

- вищу кінематичну в'язкість;
- вищу граничну температуру фільтрування та застигання;
- агресивну дію на натуральні резини та деякі еластомери;
- досить низьку окислювальну стабільність на відкритому повітрі;
- нижчу теплотворну здатність.

Нижча калорійність дизельного біопалива на величину від 13 до 15 % пояснюється меншим вмістом вуглецю в дизельному біопаливі, що призводить до збільшення годинної та питомої витрати палива. Наявність у дизельному біопаливі 10-11 % кисню дозволяє інтенсифікувати процес згорання і забезпечує підвищення температури згорання в циліндрі двигуна. Із одного боку це сприяє підвищенню індикаторного і ефективного коефіцієнту корисної дії двигуна, а з іншого – до збільшення вмісту оксидів азоту у відпрацьованих газах.

Висока кінематична в'язкість дизельного біопалива впливає на процес його фільтрування, проходження по паливопроводах, а також на процес розпилення палива.

Однією із важливих характеристик дизельного палива, що забезпечує подачу та фільтрування палива, є його рухливість при низькій температурі. Низькотемпературні властивості палива оцінюються температурами помутніння, при якій змінюється фазовий склад палива (поряд з рідкою фазою з'являється тверда), та застигання, при якій паливо повністю втрачає рухливість.

Вагомий вплив на властивості дизельного біопалива має вид рослинної олії з якого воно отримано, адже вміст жирних кислот у кожної рослини свій і змінюється в досить широких межах, і навіть у рослин одного виду може суттєво відрізнятись в залежності від сорту та умов вирощування. Склад жирних кислот рослинної олії обумовлює теплотворну здатність, в'язкість та

густину дизельного біопалива, які в свою чергу визначають особливості застосування та експлуатаційні параметри роботи МТА.

У таблиці 3.2 наведені основні властивості дизельного біопалива з олійних культур, які вирощуються в Україні та мають суттєвий вплив на використання дизельного біопалива.

Таблиця 3.2. Властивості дизельного біопалива виробленого з основних олійних культур України

Вид рослинної олії	Показники			
	Густина*, кг/м ³	Кінематична в'язкість*, мм ² /с	Температура спалаху у відкритому тиглі, °С	Об'ємний вихід біопалива, %
Ріпакова	878	7,7	135	86,5
Ляна	887	7,11	140	89,3
Соева	880	7,88	137	83,2
Рижієва	885	8,0	136	85,4
Гірчична	878	7,83	121**	86,5
Соняшникова	885	7,94	123**	83,3

* – дані отримані при температурі 20 °С;

** – температура спалаху у закритому тиглі.

Аналіз таблиці показує, що показники дизельного біопалива отриманого із різних рослинних олій суттєво не відрізняються, проте слід відмітити деякі відмінності щодо об'ємного виходу дизельного палива з рослинних олій.

У таблиці 3.3 наведені результати досліджень температури помутніння та застигання дизельного біопалива отриманого із найпоширеніших рослинних олій.

Таблиця 3.3. Температура помутніння та застигання дизельного біопалива з різних рослинних олій

Показник	Дизельне біопаливо на основі		
	соевої олії	соняшникової олії	ріпакової олії
Температура помутніння, °С	10,0	9,6	7,9
Температура застигання, °С	2,7	0,9	-0,8

Аналіз показує, що гранична температура навколишнього середовища, яка дозволяє експлуатацію дизельного двигуна без використання підігріву дизельного біопалива в паливному баці становить близько 10 °С.

Згідно виконаного аналізу властивостей дизельного біопалива на основі рослинних можна зробити наступні висновки:

– в якості палива для дизельних двигунів внутрішнього згорання найбільш підходить дизельне біопаливо на основі метилових ефірів жирних кислот рослинних олій;

- при використанні дизельного біопалива буде відбуватися збільшення його витрати у порівнянні з дизельним паливом;
- температура навколишнього середовища при якій можливо використання чистого дизельного біопалива становить вище ніж 10 °С.

3.2. Експлуатаційні параметри роботи дизельного двигуна при застосуванні дизельного біопалива

На основі проведених експериментальних досліджень роботи дизельного двигуна Д-65Н на регуляторних характеристиках (рис. 3.1) встановлено, що при застосуванні дизельного біопалива та його сумішей потужність та крутний момент, який розвиває двигун, залишається на тому ж рівні як і при використанні дизельного палива, проте відбувається збільшення годинної та питомої витрати палива. Згідно з проведеними дослідженнями годинна витрата палива на режимі максимальної потужності при використанні дизельного біопалива склала 12,92 кг/год., дизельного палива – 11,50 кг/год., суміші 75 % дизельного палива та 25 % дизельного біопалива – 11,84 кг/год., суміші 50 % дизельного палива та 50 % дизельного біопалива – 12,27 кг/год. Питомі витрати палива для всіх зазначених видів палива склали відповідно 276 г/(кВт год.), 254 г/(кВт год.), 260 г/(кВт год.) та 248 г/(кВт год.). Зокрема при переході з дизельного палива на використання суміші 75 % дизельного палива та 25 % дизельного біопалива, витрата палива збільшується на величину від 2 до 8 %, при використанні 50 % дизельного палива та 50 % дизельного біопалива – на величину від 7 до 12 %, а при використанні чистого дизельного біопалива – на величину від 13,5 до 18 % в залежності від завантаження двигуна.

Подібні результати отримані при використанні дизельного біопалива та його сумішей і для двигунів інших марок.

Так при гальмівних випробуваннях двигуна Д-248, з використанням дизельного біопалива та його сумішей з дизельним паливом, отримано збільшення годинної витрати палива від 4 % до 18 % у залежності від складу паливної суміші. При роботі двигуна на паливних сумішах з часткою дизельного біопалива 40 %, 60 %; 80 % та 100 %, питома витрата палива відповідно склала 241; 243; 255 і 271 г/(кВт год.) проти 230 г/(кВт год.) при роботі на дизельному паливі, що на 3,5 %; 6,5 %; 11,3 % і 17,8 % більше, ніж питома витрата дизельного палива. При роботі двигуна Д-238 на дизельному паливі отримано результати які показали, що при досягненні однакової потужності витрата палива при роботі на дизельному біопаливі збільшується на величину від 12 до 20 %. Аналіз отриманих регуляторних характеристик роботи двигуна СМД-14 (рис. 3.2) на дизельному паливі та дизельному біопаливі, а також їх сумішах з різною концентрацією показав, що відбувається зменшення ефективної потужності двигуна на 12 % на фоні одночасного збільшення питомої витрати палива від 10 до 17 % у залежності від концентрації дизельного біопалива в паливній суміші.

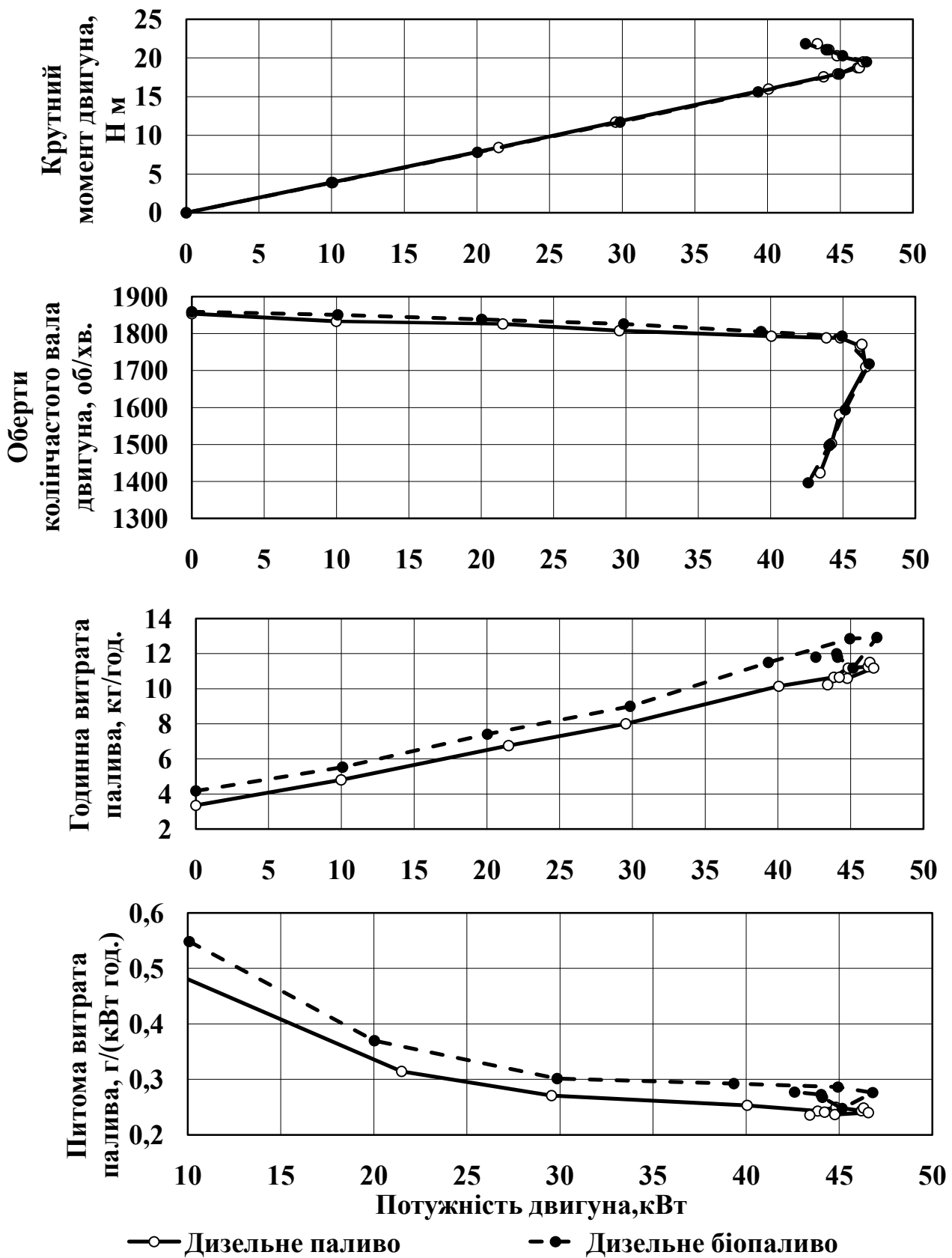
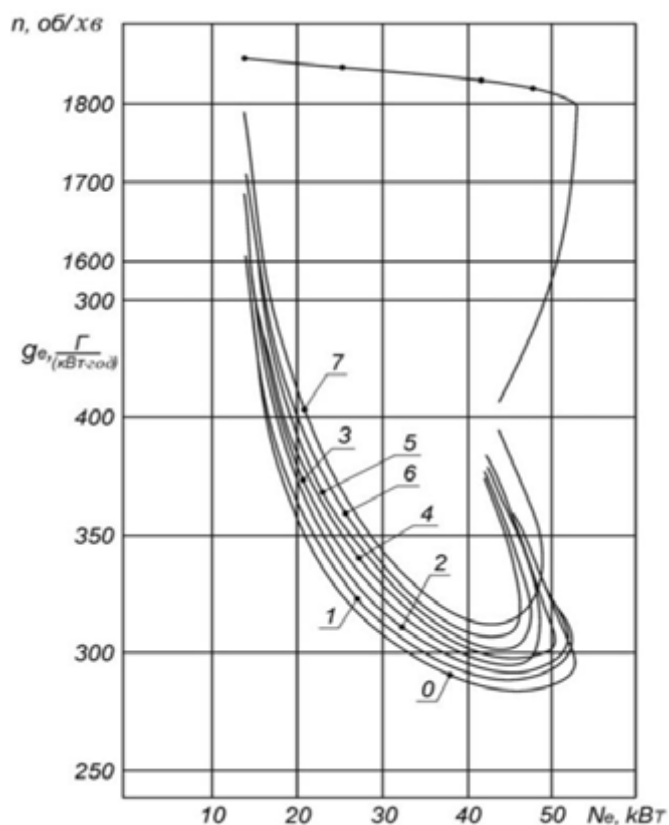


Рис. 3.1 Регуляторні характеристики роботи двигуна Д-65Н



0 – дизельне паливо (ДП); 7– дизельне біопаливо (ДБП); 1 – 95 % ДП+5 % ДБП; 2 – 90 % ДП+10 % ДБП; 3 – 80% ДП+20% ДБП; 4 – 70 % ДП+30 % ДБП; 5 – 50 % ДП+50 % ДБП; 6 – 30 % ДП+70% ДБП

Рис. 3.2. Регуляторні характеристики двигуна СМД-14Н

Збільшення витрати палива, що не відповідає різниці теплотворних здатностей дизельного біопалива та дизельного палива, більшість дослідників пов'язують із відмінностями густини та кінематичної в'язкості даного типу палива.

Вищі на 10 % густина та у 1,5 рази кінематична в'язкість дизельного біопалива, спричиняє збільшення на 14 % далекобійності паливного факела та зростання діаметру краплин розпиленого палива, що призводить до порушення сумішоутворення та збільшення періоду затримки самозаймання, внаслідок чого відбувається зниження ефективного тиску згорання, що призводить до зниження ефективності згорання дизельного біопалива.

На основі порівняльного аналізу експлуатаційних параметрів роботи дизельного двигуна на чистому дизельному біопаливі та дизельному паливі можна зробити наступні висновки:

- потужність та крутний момент при використанні дизельного біопалива майже не змінюється;
- спостерігається збільшення витрати палива на величину, що перевищує різницю теплотворних здатностей дизельного біопалива та дизельного палива нафтового походження;
- зменшення ефективності згорання дизельного біопалива пов'язано із високою кінематичною в'язкістю даного типу палива.

3.3. Кінематична в'язкість дизельного біопалива

Для підвищення ефективності використання дизельного біопалива, необхідно зменшити його кінематичну в'язкість, що може бути досягнуто за рахунок використання його сумішей із подібним за властивостями паливом але меншою кінематичною в'язкістю. Найбільш наближеним за своїми властивостями паливом, яке можна використати для створення суміші є дизельне паливо нафтового походження.

У таблиці 3.4 представлено результати досліджень впливу температури на кінематичну в'язкість дизельного біопалива на основі ріпакової та соєвої олій, а на рисунку 3.3 зображено характеристики зміни кінематичної в'язкості паливних сумішей дизельного біопалива із дизельним паливом нафтового походження.

Таблиця 3.4. Показники зміни кінематичної в'язкості палива, мм²/с

Тип палива	Температура, °С					
	0	3	8,5	14,0	17,5	20
Дизельне паливо (ДП)	10,22	8,43	6,13	5,27	4,85	4,5
Дизельне біопаливо із ріпакової олії (РМЕ)	17,42	13,31	10,97	8,92	8,2	7,64
Дизельне біопаливо із соєвої олії (СМЕ)	14,23	11,06	8,5*	7,21	6,68	6,15

* – дані зафіксовано при температурі 8,2 °С.

Ефективний діапазон використання дизельного біопалива, при якому кінематична в'язкість не буде суттєво впливати на роботу дизельного двигуна для сумішей з дизельним паливом та чистого дизельного біопалива із соєвої олії, знаходиться при температурі більшій за 5 °С, а для чистого дизельного біопалива із ріпакової олії при температурі більшій за 10 °С.

Враховуючи те, що кінематична в'язкість зменшується зі збільшенням температури і різко зростає при її зниженні, одним із ефективних методів зниження кінематичної в'язкості є застосування підігріву палива.

На рис. 3.4 наведені порівняльні дослідження зміни показників густини та в'язкості дизельного біопалива та дизельного палива нафтового походження.

Із підвищенням температури зниження кінематичної в'язкості дизельного біопалива відбувається більш інтенсивно, ніж дизельного палива. Так, в температурному діапазоні від 20 °С до 95 °С відбувається зменшення кінематичної в'язкості дизельного біопалива у 4 рази, дизельного палива – у 3 рази. Зменшення густини палив із підвищенням температури має прямо пропорційний характер. У температурному діапазоні від 20 °С до 95 °С густина дизельного палива зменшується на 5,6 %, дизельного біопалива на 6,2 %. Досягнення однакових показників кінематичної в'язкості дизельного біопалива та дизельного палива можливе при температурі дизельного біопалива вищій на 30-40 °С.

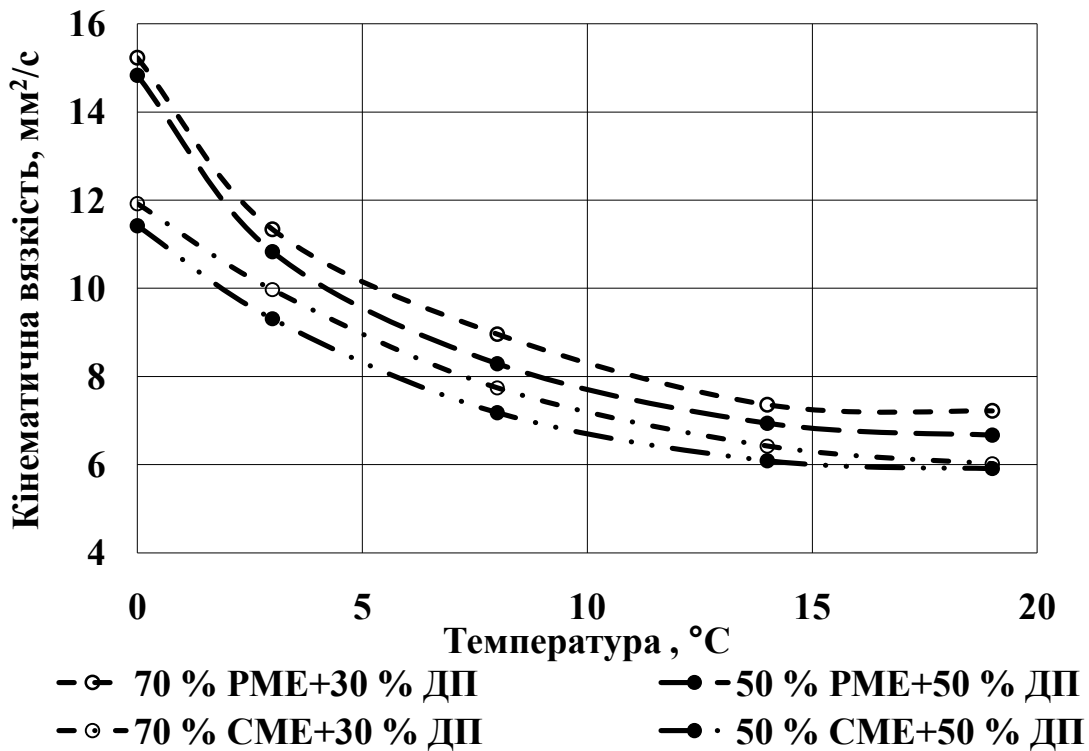


Рис. 3.3. Залежність кінематичної в'язкості сумішей дизельного біопалива з дизельним паливом від температури

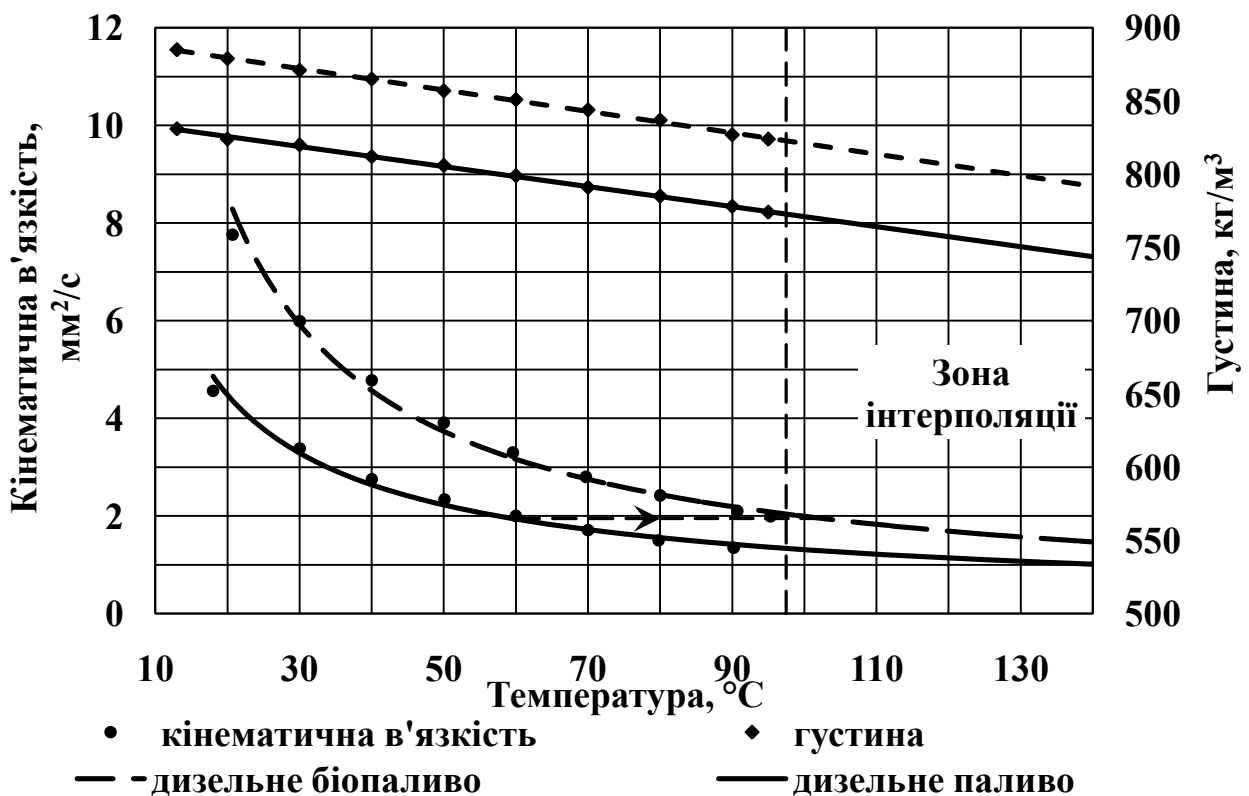


Рис. 3.4. Залежність кінематичної в'язкості та густини палива від температури

Враховуючи те, що температура дизельного палива в голові паливного насоса високого тиску сягає температури 60 °C і кінематична в'язкість

дизельного палива при даній температурі становить $2 \text{ мм}^2/\text{с}$, аналогічне значення кінематичної в'язкості для дизельного біопалива може бути досягнуто при температурі близькій до $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Для прогнозування зміни показників кінематичної в'язкості палив при температурі більшій за $100 \text{ }^\circ\text{C}$, виконано інтерполяцію отриманих експериментальних даних, яка показала, що кінематична в'язкість дизельного біопалива із ростом температури поступово знижується, проте інтенсивність падіння в'язкості суттєво зменшується.

Таким чином, ефективний діапазон використання дизельного біопалива, при якому кінематична в'язкість не буде суттєво впливати на роботу дизельного двигуна, знаходиться при температурі більшій за $10 \text{ }^\circ\text{C}$ для чистого дизельного біопалива та $5 \text{ }^\circ\text{C}$ для його сумішей з дизельним паливом. При підвищенні температури від 20 до $95 \text{ }^\circ\text{C}$ відбувається зменшення кінематичної в'язкості дизельного біопалива майже в 4 рази, проте досягнення однакових показників кінематичної в'язкості із дизельним паливом можливе при температурі дизельного біопалива на $30\text{--}40 \text{ }^\circ\text{C}$ вищій.

3.4. Підвищення ефективності використання дизельного біопалива

Для перевірки впливу показників зміни кінематичної в'язкості дизельного біопалива на характеристики його впорскування було виконано дослідження зміни кута розпилення факела дизельного палива та дизельного біопалива форсункою ФШ 62005 (двигуна СМД-14) в повітря при зміні температури палив (рис. 3.5).

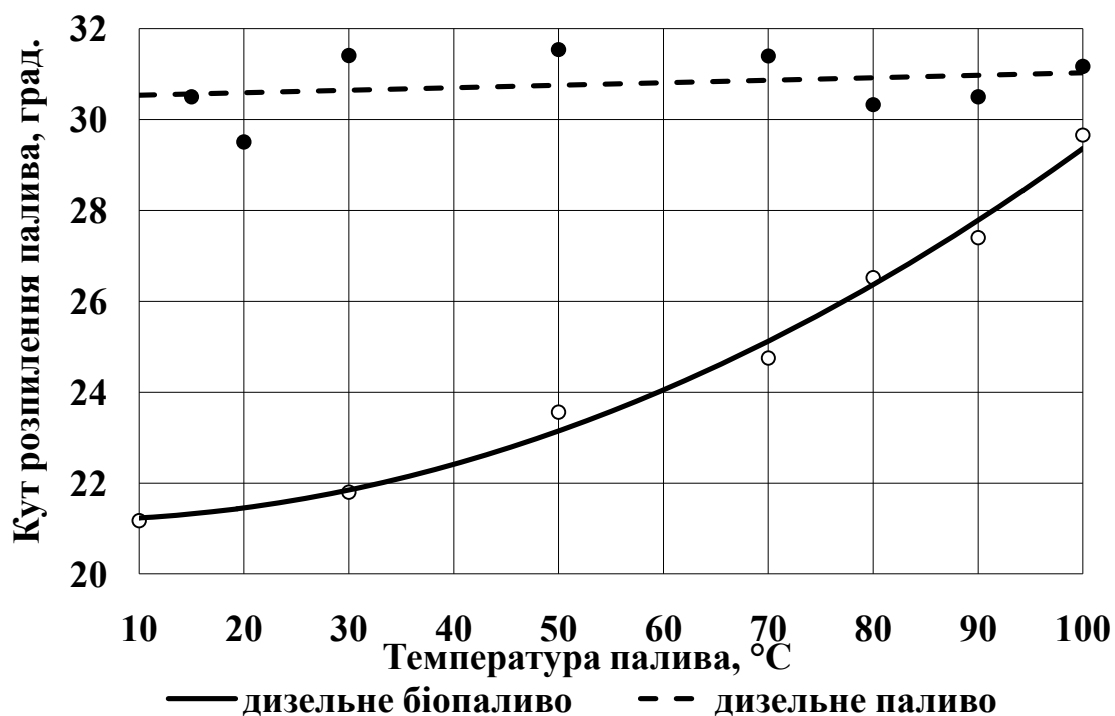


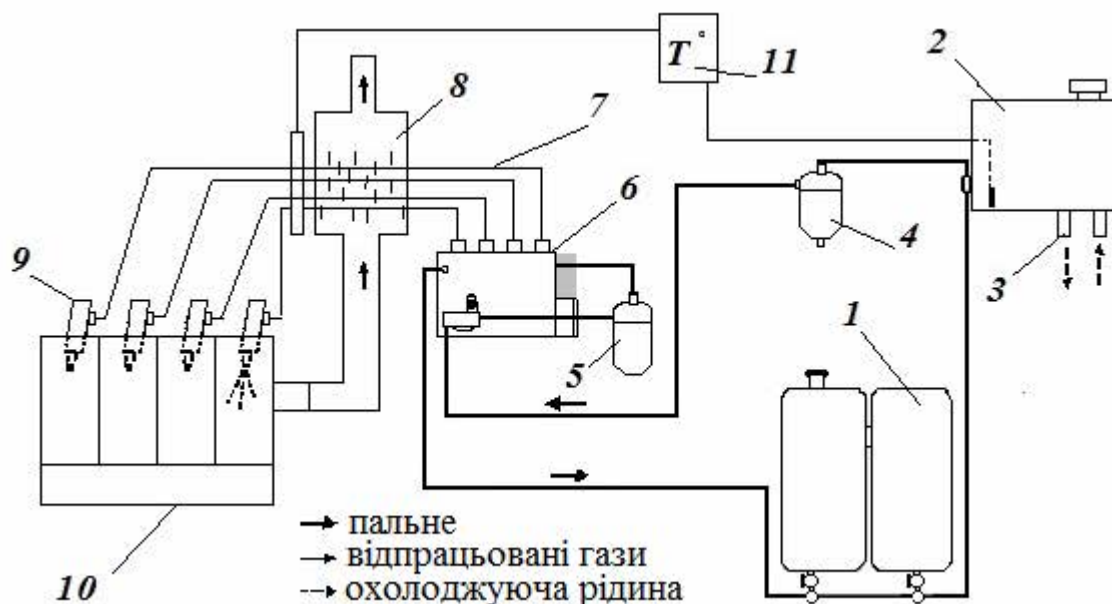
Рис. 3.5. Зміна кута розпилення факела від температури палива

Проведені експериментальні дослідження показали, що кут розпилення факела палива при підвищенні температури палива з 10 до $100 \text{ }^\circ\text{C}$ збільшився

від 21° до майже 30°, тобто на 40 %, проте не досяг значення кута розпилення для дизельного палива при 15 °С. Слід відмітити несуттєвий вплив температури нагріву дизельного палива на зміну кута розпилення.

Таким чином, підвищення температури дизельного біопалива перед впорскуванням покращує характеристики факела розпилення, що призводить до покращення процесу сумішоутворення та повноти згорання дизельного біопалива. Проте при температурі нагріву дизельного біопалива 100 °С не досягається значення кута розпилення дизельного палива, що свідчить про те, що ефективний діапазон нагріву дизельного біопалива знаходиться при дещо вищій температурі.

Враховуючи те, що температура підігріву дизельного біопалива обмежена температурним режимом роботи паливного насоса високого тиску, для підвищення ефективності застосування дизельного біопалива була розроблена система двохступеневого його підігріву (рис. 3.6).



1 – бак дизельного палива; 2 – бак дизельного біопалива; 3 – теплообмінник; 4 – фільтр грубого очищення; 5 – фільтр тонкого очищення; 6 – паливний насос високого тиску; 7 – паливопроводи високого тиску; 8 – нагрівальна камера; 9 – форсунки двигуна; 10 – двигун; 11 – блок контролю температури

Рис. 3.6 Система двохступеневого підігріву дизельного біопалива

Запропонована система дозволяє розширити температурний діапазон використання дизельного біопалива за рахунок його попереднього підігріву в паливному баці до температури 35-40 °С. При цій температурі кінематична в'язкість дизельного біопалива становить менше за 5 мм²/с і забезпечується його фільтрування у фільтрах грубої та тонкої очистки палива. Підвищення ефективності згорання дизельного біопалива досягається за рахунок

послідуючого більш інтенсивного його нагріву після паливного насоса високого тиску перед впорскуванням до циліндрів двигуна.

При застосуванні запропонованої системи пуск дизельного двигуна відбувався на дизельному паливі, яке міститься в основному паливному баці 1. На дизельному паливі двигун нагрівається до робочої температури, одночасно розігрівається бак з дизельним біопаливом 2 за допомогою трубчастого теплообмінника 3, який приєднаний до системи охолодження двигуна внутрішнього згорання. При досягненні необхідної температури дизельного двигуна та дизельного біопалива двигун переводиться на дизельне біопаливо. Далі паливо по паливопроводах надходить до фільтра грубої очистки 4, фільтр тонкого очищення 5 та потрапляє до паливного насоса високого тиску 6. Від паливного насоса високого тиску 6 по паливопроводах високого тиску 7 паливо проходить через нагрівальну камеру 8, де нагрівається до необхідної температури впорскування за рахунок тепла відпрацьованих газів двигуна. Потім паливо подається до форсунок 9, через які розпилюється в циліндрах двигуна внутрішнього згорання 10. У випускному колекторі двигуна внутрішнього згорання встановлено перепускну заслінку, яка дає змогу направляти частину вихлопних газів до нагрівальної камери 8 без дроселювання випускного колектора. Положення перепускної заслінки визначає кількість газів які проходять через нагрівальну камеру 8 і контролюється блоком контролю температури 11 із врахуванням зміни обертів двигуна внутрішнього згорання та циклової подачі палива.

При реалізації запропонованої схеми на тракторі Кий-14102 необхідно внести зміни в штатну систему паливопроводів низького тиску. Зворотну магістраль, яка з'єднує паливний насос високого тиску 6 з основним паливним баком 1, необхідно з'єднати з магістраллю подачі палива. Бак дизельного біопалива 1 під'єднується до основної магістраль подачі палива. Реалізація такої схема підключення дає змогу отримати кільцевий контур паливоподачі, в якому при закриванні паливних кранів баку дизельного палива та відкриванні крана баку дизельного біопалива, підігріте дизельне біопаливо потрапляє в магістраль паливоподачі. При зворотному переході двигуна на живлення дизельним паливом, магістраль повністю заповнюється дизельним паливом. Дана схема була реалізована на тракторах ПМЗ-6 АКЛ й Кий-14102 (рис. 3.7) та використовувалася при проведенні стендових та польових досліджень.

Система двохступеневого підігріву палива дозволила визначити оптимальний температурний діапазон нагріву дизельного біопалива перед впорскуванням в циліндри двигуна. При проведенні стендових випробувань роботи дизельного двигуна Д-65Н отримано залежності зміни питомої витрати дизельного біопалива від температури нагріву при різному завантаженні двигуна (рис. 3.8).

Аналіз показує, що зі збільшенням температури нагріву, питома витрата дизельного біопалива поступово знижується і досягає свого мінімального значення відповідно: 318 г/(кВт год.) при завантаженні двигуна 37 кВт; 329 (г/кВт год.) при завантаженні двигуна 28 кВт та 386 г/(кВт год.) при завантаженні двигуна 19 кВт в температурному діапазоні від 115 до 120 °С.

Слід зазначити, що характер зміни залежностей питомої витрати дизельного біопалива від температури нагріву при різному завантаженні двигуна подібний, проте значення температури нагріву дизельного біопалива, при якій досягається мінімальна витрата палива, знаходиться в діапазоні від 115 °С до 120 °С.



Рис. 3.7. Трактори ПМЗ-6 АКЛ та Кий-14102 обладнані системою двохступеневого підігріву палива

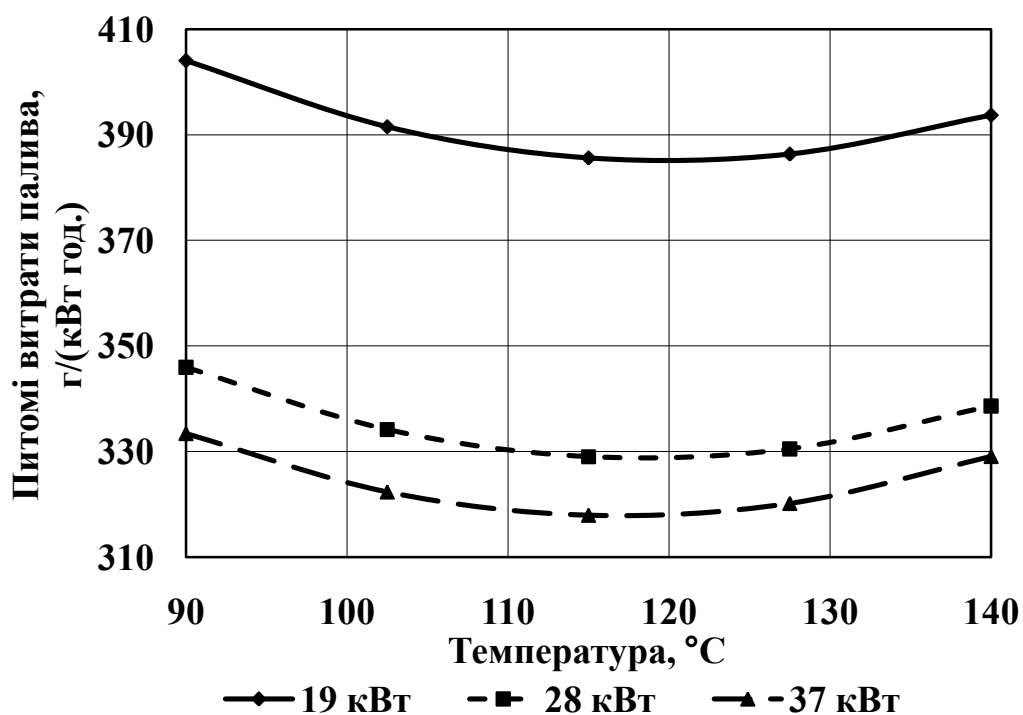


Рис. 3.8. Залежність питомої витрати дизельного біопалива від температури нагріву та навантаження двигуна

При застосуванні нагріву дизельного біопалива в температурному інтервалі від 90 до 120 °С відбувається зниження в'язкості палива, що впорскується, як наслідок, відбувається покращення характеристик впорскування (збільшується кут розпилу палива, зменшується далекобійність

факела, зменшується діаметр краплин розпилу), що призводить до покращення повноти згорання палива та зменшення його питомої витрати. При нагріві палива понад 125 °С відбувається подальше зниження в'язкості палива, в результаті чого відбувається надмірне зменшення діаметра краплин при розпиленні палива, що призводить до зменшення дальнобійності факела, зменшення турбулентних вихрів паливо-повітряної суміші в циліндрі, утворення зон з надмірною концентрацією палива та недостатньою кількістю повітря. У цих зонах зменшується швидкість горіння палива та повнота його згорання, як наслідок – відбувається збільшення питомої витрати палива.

Для перевірки впливу температури нагріву дизельного біопалива, було виконано порівняльні гальмівні випробування дизельного двигуна Д-65Н із визначенням техніко-експлуатаційних та екологічних показників роботи дизельного двигуна. У результаті отримано залежності зміни питомої витрати палива при використанні дизельного палива, дизельного біопалива без та із застосуванням нагріву палива перед впорскуванням у циліндр двигуна (рис. 3.9), а також отримано значення показників викидів чадного газу (CO) (рис. 3.10), вуглеводневих сполук (C_nH_m) (рис. 3.11), оксидів азоту (NO_x) (рис. 3.12) на відповідних режимах регуляторних характеристик.

Отримані значення питомої витрати палива, викидів чадного газу, вуглеводнів та оксидів азоту, дають змогу оцінити вплив температури нагріву на процес згорання дизельного біопалива у порівнянні з дизельним паливом нафтового походження.

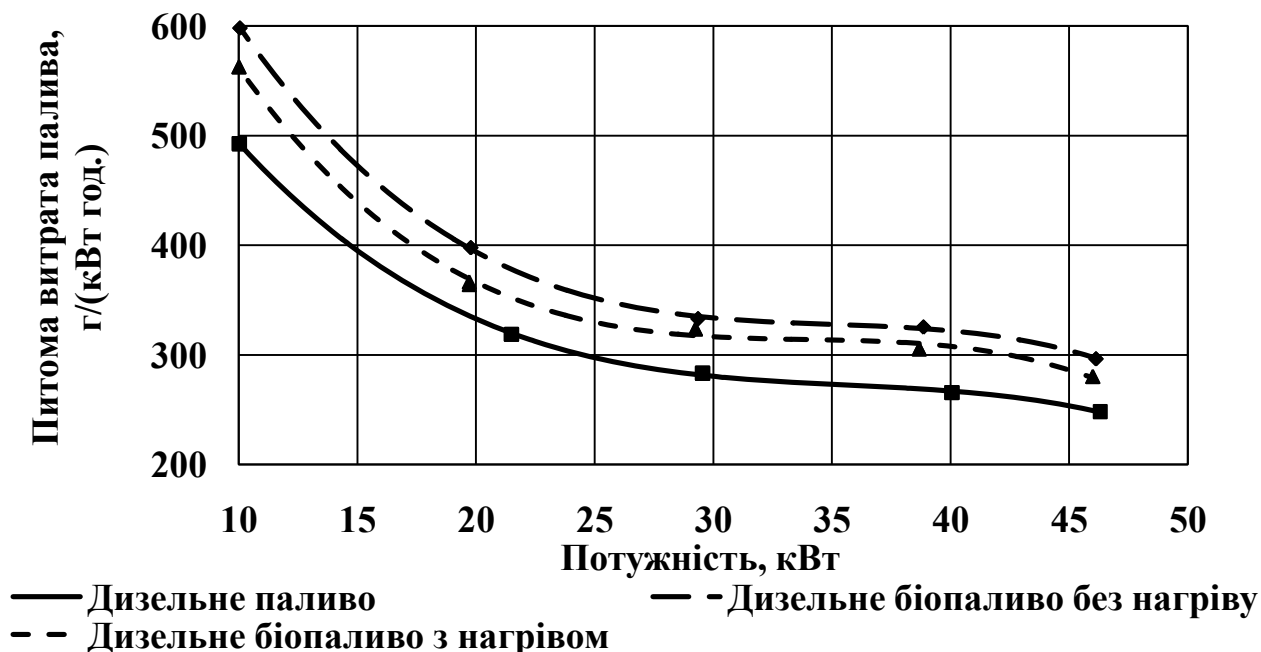


Рис. 3.9. Зміна питомої витрати палива від навантаження двигуна

Аналіз отриманих експлуатаційних характеристик показує (рис. 3.9), що при роботі на дизельному паливі двигун розвинув потужність 46,31 кВт при частоті обертання колінчастого вала 1771 об/хв. та питомій витраті палива

248 г/(кВт год.), на дизельному біопаливі без підігріву 46,13 кВт при частоті обертання колінчастого вала 1764 об/хв. та питомій витраті палива 297 г/(кВт год.), на дизельному біопаливі з підігрівом 45,99 кВт при частоті обертання колінчастого вала 1759 об/хв. та питомій витраті палива 280 г/(кВт год.), що відповідно на 19,75 % та 12,9 % більше, ніж витрата дизельного палива. Застосування нагріву дизельного біопалива перед впорскуванням в циліндри двигуна дозволяє досягти зменшення перевитрати дизельного біопалива від 3 до 10 % в залежності від навантаження двигуна.

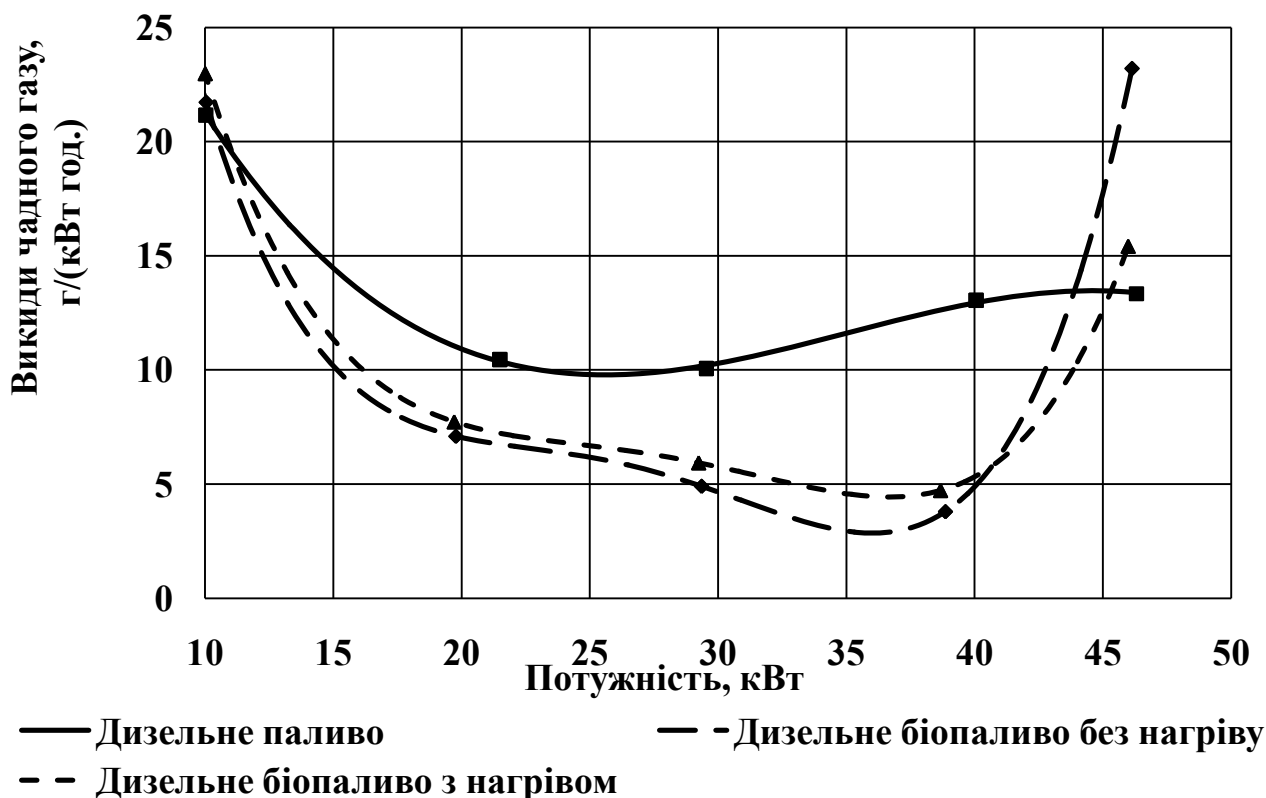


Рис. 3.10. Зміна питомих викидів чадного газу від навантаження двигуна

У дизельних двигунах СО утворюється в локальних зонах з багатою сумішшю і доокислюється у вуглекислий газ (CO_2) в процесі розширення, оскільки в циліндрі завжди є в достатку кисень. Аналіз показників викидів чадного газу (рис. 3.10) показує, що при завантаженні 10 кВт питомі викиди СО майже однакові і становлять на дизельному паливі 21,16 г/(кВт год.), на дизельному біопаливі без нагріву 21,72 г/(кВт год.), а з нагрівом 22,92 г/(кВт год.). При збільшенні навантаження до 20 кВт відбувається зменшення значень питомих викидів для дизельного палива майже в два рази та в три рази для дизельного біопалива. В інтервалі навантажень від 20 до 30 кВт питомі викиди СО для дизельного палива залишаються майже незмінними і досягають свого мінімального значення близько до 10 г/(кВт год.). Із подальшим ростом навантаження відбувається поступове збільшення викидів до 13,33 г/(кВт год.) при максимальному навантаженні. Із збільшенням навантаження питомі викиди СО при роботі на дизельному біопаливі поступово

знижуються і сягають свого мінімуму без підігріву 3,80 г/(кВт год.) та 4,72 г/(кВт год.) з підігрівом при навантаженні близькому до 39 кВт. При максимальному навантаженні двигуна відбувається різке збільшення значень питомих викидів CO до 23,17 г/(кВт год.) та 15,42 г/(кВт год.) при роботі на дизельному біопаливі без та з нагрівом, що перевищує на 81,3 % та 15,6 % значення викидів для дизельного палива. Зниження питомих викидів CO при використанні дизельного біопалива в порівнянні з дизельним паливом майже на всьому діапазоні завантаження пояснюється наявністю в структурі молекули біопалива вільного кисню, що сприяє більш повному його окисленню.

Аналіз характеристик зміни питомих викидів вуглеводневих сполук (рис. 3.11) показує, що характер зміни значень викидів в діапазоні від 10 до 40 кВт, майже однаковий і суттєво не відрізняються один від одного. Із ростом навантаження відбувається зменшення питомих значень викидів вуглеводневих сполук. Значення питомих викидів C_nH_m для дизельного біопалива без підігріву дещо нижчі, ніж у дизельного палива. При максимальному навантаженні слід відмітити різке збільшення питомих викидів вуглеводневих сполук для дизельного біопалива без підігріву, які у 2 рази перевищили значення викидів для дизельного палива.

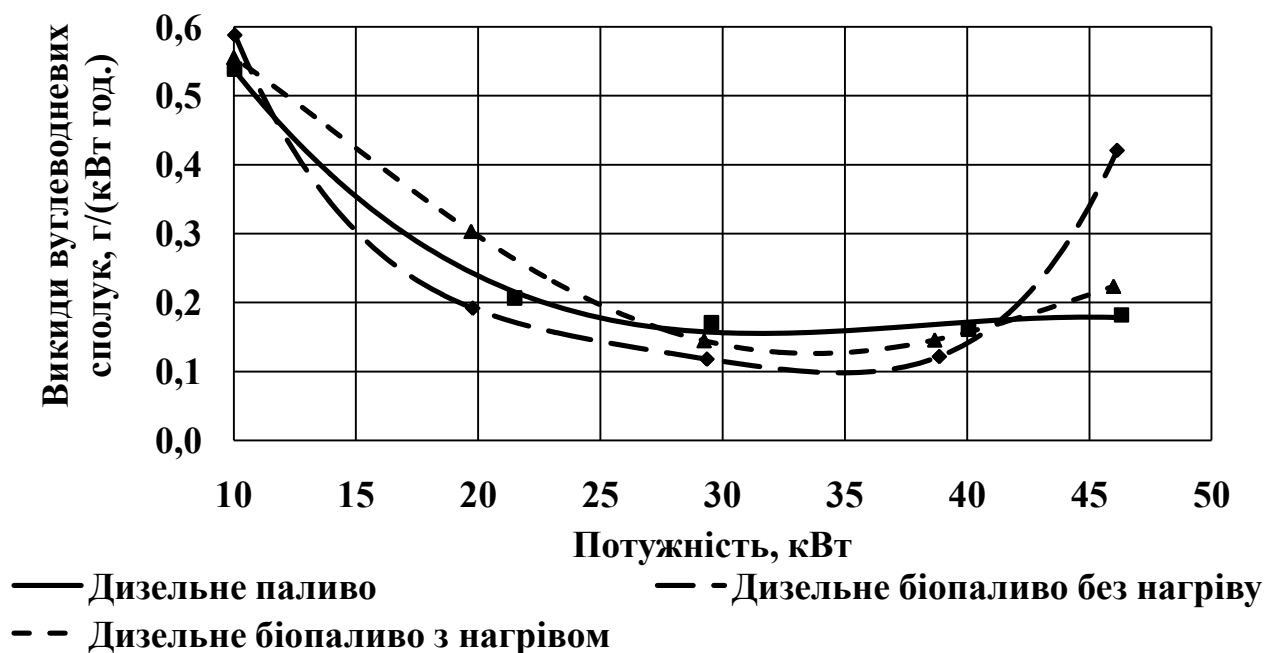


Рис. 3.11. Зміна питомих викидів вуглеводневих сполук від навантаження двигуна

Аналіз отриманих експериментальних залежностей (рис. 3.12) показує, що питоми значення оксидів азоту змінюється майже ідентично, і несуттєво відрізняються один від одного. При максимальній потужності показник питомих викидів NO_x для дизельного біопалива з підігрівом перевищив на 7,7 % та 17 % значення викидів для дизельного палива та дизельного біопалива без підігріву.

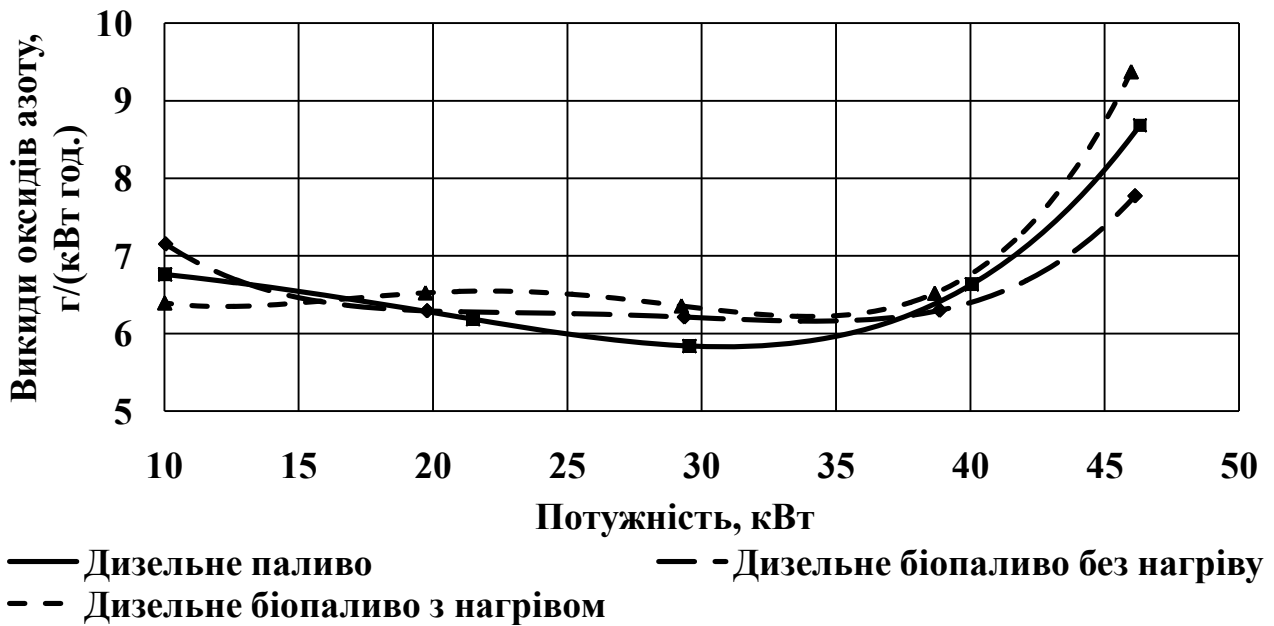


Рис. 3.12. Зміна питомих викидів оксидів азоту від навантаження двигуна

Різне зростання показників питомих викидів шкідливих сполук CO та C_nH_m дизельного двигуна на максимальній потужності при роботі на дизельному біопаливі без підігріву у порівнянні зі значеннями для дизельного палива пов'язане із недостатньою якістю розпилю та сумішоутворення (краплі палива при розпилі більші, ніж у дизельного палива, через вище значення кінематичної в'язкості), що на тлі максимальної циклової подачі палива призводить до збільшення кількості зон з недостатньою кількістю кисню навколо краплин палива, де молекули дизельного біопалива, маючи більший молекулярний ланцюг не встигають пройти повну деструкцію та окислення і, як наслідок, відбувається погіршення повноти згорання палива та зростання шкідливих викидів чадного газу та вуглеводнів.

Значення питомих викидів для дизельного біопалива із застосуванням нагріву майже на всьому інтервалі навантаження дещо вищі, ніж у дизельного біопалива без підігріву. При нагріві дизельного біопалива до температури $120\text{ }^\circ\text{C}$ відбувається покращення розпилення та сумішоутворення, у результаті чого збільшується повнота згорання хвостової частина палива, що складається з високомолекулярних вуглеводів. Це призводить до збільшення кількості шкідливих викидів та зниження годинної та питомої витрати палива при застосуванні нагріву. Особливо це відчутно при максимальному навантаженні двигуна, коли в циліндрі складаються несприятливі умови для повного згорання палива. Питомі викиди CO та C_nH_m у цьому режимі для дизельного палива без підігріву на 50 % та 90 % відповідно перевищили показники для дизельного біопалива з нагрівом. Більше значення питомих викидів оксидів азоту для дизельного біопалива з підігрівом пов'язане зі збільшенням температури локальних зон згорання палива за рахунок збільшення повноти його згорання, що в свою чергу сприяє інтенсифікації утворення NO_x .

У результаті досліджень встановлено, що застосування нагріву дизельного біопалива до температури 120 °С покращує повноту згорання палива, як наслідок спостерігається зменшення витрати дизельного біопалива, при несуттєвому погіршенні показників викидів. Слід відмітити зменшення шкідливих викидів чадного газу при застосуванні дизельного біопалива. Так, при завантаженні двигуна в інтервалі від 30 до 40 кВт, вони у два рази менші, ніж у дизельного палива. Викиди вуглеводневих сполук та оксидів азоту мають подібний характер змін та суттєво не відрізняються одне від одного. Суттєва відмінність від загального характеру зміни шкідливих викидів спостерігається при максимальному завантаженні двигуна, через виникнення несприятливих умов для сумішоутворення та згорання палива, але даний режим роботи не є характерним для дизельних двигунів при виконанні технологічних операцій в сільськогосподарському виробництві.

Таким чином, оптимальний температурний діапазон нагріву дизельного біопалива перед впорскуванням у циліндри двигуна знаходиться в межах від 115 до 120 °С. При цьому покращується повнота згорання палива і як наслідок, спостерігається зменшення витрати дизельного біопалива на величину від 3 до 10 % в залежності від навантаження, при несуттєвому погіршенні питомих показників шкідливих викидів.

3.5. Виробнича перевірка роботи МТА із застосуванням системи двоступеневого підігріву дизельного біопалива

Виробнича перевірка ефективності застосування дизельного біопалива та системи двоступеневого підігріву палива при роботі МТА була виконана на базі трактора ПМЗ-6АКЛ з двигуном Д-65Н при виконанні технологічних операцій передпосівної культивуації та коткування посівів, а також на базі трактора Кий-14102 при виконанні технологічних операцій оранки, дискування та посіву.

Аналіз результатів роботи МТА на базі трактора ПМЗ-6 АКЛ (табл. 3.5) показав, що під час виконання технологічної операції суцільної культивуації ґрунту при роботі на дизельному біопаливі зафіксовано збільшення витрати палива на 17,7 % у порівнянні з витратою палива на дизельному паливі. Застосування нагріву дизельного біопалива до температурного діапазону 110–125 °С дозволило зменшити витрату палива на 7,5 %. При виконанні технологічної операції прикочування посівів витрата дизельного біопалива збільшилася на 18,2 %, а застосування нагріву дизельного біопалива до температури 100-110 °С зменшило витрату палива на 4,7 %. Проте слід зазначити, що оптимального температурного діапазону нагріву дизельного біопалива, при виконанні технологічної операції прикочування посівів, досягнуто не було.

Випробування трактора Кий-14102 з двигуном Д-245 (рис. 3.13) виконувалося під час осінніх польових робіт при температурі навколишнього середовища від мінус 1 до плюс 6 °С, температура нагріву дизельного біопалива підтримувалася в інтервалі від 115 до 120 °.

Таблиця 3.5. Експлуатаційні витрати палива МГА базі трактора ПМЗ-6АКЛ

Вид операції	Тип палива			Перевитрата дизельного біопалива, %
	Дизельне паливо	Дизельне біопаливо		
	Витрата палива, кг/га	Температурний діапазон, °С	Витрата палива, кг/га	
Суцільна культивування: ПМЗ-6АКЛ + КПС-4	5,2	60–65	6,12	17,69
		110–125	5,69	9,4
Прикочування посівів: ПМЗ-6АКЛ + ЗКШ-6	1,43	40–55	1,69	18,18
		100–110	1,61	12,58



Рис. 3.13. Трактор Кий-14102 обладнаний системою двоступеневого підігріву дизельного біопалива при виконанні польових випробувань

Аналіз отриманих результатів (табл. 3.6) показує, що перевитрата дизельного біопалива порівняно з дизельним паливом становила при виконанні оранки 8,58%, а при дискуванні – 9,02 %, що пояснюється меншою теплотворною здатністю дизельного біопалива.

У більшості випадків нижчу теплоту згоряння дизельного біопалива приймають на рівні 37,5 МДж/кг, проте вона може суттєво відрізнятись, тому нижчу теплоту згоряння дизельного біопалива необхідно визначати в кожному конкретному випадку окремо.

Для перевірки адекватності отриманих результатів виконано перевірку нижчої теплотворної здатності дизельного палива та дизельного біопалива, шляхом спалювання зразків палива, яке використовувалося під час проведення експериментів в калориметричній бомбі. Дослідження показали, що нижча теплотворна здатність дизельного біопалива менша на 8,25 %, ніж у дизельного палива, що підтверджує адекватність отриманих даних при проведенні виробничих випробувань роботи трактора Кий-14102.

Проведені виробничі випробування МТА з використання системи двоступеневого підігріву дизельного біопалива, показали, що перевитрата дизельного біопалива при виконанні технологічних операцій становить від 8,0 % до 13 %, при збереженні показників продуктивності та потужності МТА.

Таблиця 3.6. Експлуатаційні витрати палива МТА на базі трактора Кий-14102 з використанням системи підігріву дизельного біопалива

Вид операції	Використано ДБП, л	Тип і витрата палива, кг/га		Перевитрата ДБП, %
		ДП	ДБП	
Оранка: Кий-14102 + PRO-3	200	15,85	17,21	8,58
Дискування: Кий-14102 +БДВ-3	670	5,74	6,258	9,02
Посів: Кий-14102 + Great Plains-1,5	380	8,7	9,8	12,64

Наведені результати виробничої перевірки дозволяють стверджувати про ефективність застосування системи підігріву дизельного біопалива.

3.6. Організаційні аспекти використання дизельного біопалива

Дизельне біопаливо досить агресивно поводить себе щодо конструкційних матеріалів, тому при його використанні доцільно дотримуватися наступних правил:

- дизельне біопаливо повинно відповідати вимогам ДСТУ 6081:2009 "Паливо моторне. Ефіри метилових жирних кислот олій і жирів для дизельних двигунів. Технічні умови";
- дизельне біопаливо повинно бути використане упродовж шести місяців з дати виготовлення;
- ємності для зберігання дизельного біопалива та паливні баки повинні періодично очищатися від осаду та утворень мікрофлори;
- для зменшення негативного впливу дизельного біопалива на моторну оливу початок роботи та нагрів двигуна до робочої температури рекомендується здійснювати на дизельному паливі;
- закінчувати роботу необхідно також на дизельному паливі, щоб забезпечити заміщення дизельного біопалива в паливній системі для здійснення, в подальшому, правильного запуску двигуна;
- при потраплянні дизельного біопалива на лакофарбове покриття, його терміново необхідно змити або насухо витерти, також потрібно запобігати потраплянню дизельного біопалива на гуму;

- при роботі на дизельному біопаливі рекомендується в два рази зменшити термін експлуатації моторної оливи та фільтра тонкої очистки палива;

- через кожних 50 годин роботи необхідно виконувати операцію зливання осаду з фільтрів грубої та тонкої очистки палива;

- не допускати роботи на залишках палива менше 5 % об'єму паливного баку;

- необхідно виконувати періодичний злив 5 % залишку палива через кожних 100 годин роботи з метою контролю за утвореннями осаду та відкладень мікрофлори;

- при постановці трактора на довготривале зберігання чи при перерві в роботі більш ніж на місяць, дизельне біопаливо повинно бути злито із паливного баку.

Аналіз виробничого досвіду використання дизельного біопалива показує, що більшість проблем, які обмежують широке використання дизельного біопалива сільськогосподарськими підприємствами, пов'язана з необхідністю дотримання вимог зберігання дизельного біопалива та контролю за його параметрами, а також необхідністю організації високого рівня технічного обслуговування техніки, яку заправляють дизельним біопаливом.

Основна проблема зберігання біопалива полягає в його здатності натягувати вологу та розчиняти бруд і лакофарбові покриття. Це погіршує якість дизельного біопалива, а тому:

- слід регулярно відбирати проби палива для перевірки його на відповідність стандарту ДСТУ 6081:2009;

- не рекомендується довгостроково зберігати дизельне біопаливо під прямим впливом високих або низьких температур;

- паливо необхідно зберігати в чистих і сухих ємностях без попадання сонячних променів;

- необхідно здійснювати періодичний контроль за змістом води у паливі, щоб уникнути небезпеки розвитку мікроорганізмів, утворення перекисів і корозійного впливу води, у тому числі й на елементи паливної апаратури;

- слід обов'язково видаляти воду із цистерн зберігання перед заповненням їх дизельним біопаливом;

- для мінімізації конденсації вологи при зберіганні дизельного біопалива необхідно тримати паливні ємності максимально заповненими, мити й осушувати їх до заповнення і після спорожнення;

- при використанні паливних сумішей дизельного палива та дизельного біопалива їх необхідно відстоювати упродовж 24 годин після змішування.

Перед початком експлуатації двигуна на дизельному біопаливі необхідно звернути увагу на проведення наступних профілактичних робіт:

- необхідно здійснити промивку та заміну фільтрів грубого і тонкого очищення палива, видалити шлакові відкладання в паливній системі й апаратурі;

- здійснити заміну резино-технічних виробів на стійкі до дії дизельного біопалива;
- необхідно змінити кут випередження подачі палива двигуна відповідно до рекомендацій заводу виробника при використанні дизельного біопалива;
- рекомендується виконувати зберігання дизельного біопалива при температурі вищій за плюс 10 °С.

3.7. Економічна ефективність використання дизельного біопалива

У сільськогосподарському виробництві загальна економічна ефективність нових технологій і техніки визначається, виходячи із визначення розміру прибутку від їх використання.

Загальновідомо, що прибуток визначається як різниця ціни реалізації продукції та її собівартості з урахуванням амортизації. У собівартість продукції входять складові витрат пов'язані з її виробництвом, а саме загальні витрати на матеріали та сировину, вартість технічного обслуговування і ремонту обладнання, вартість енергоресурсів, та заробітна плата з нарахуваннями. Економічну ефективність застосування дизельного біопалива при роботі машинно-тракторних агрегатів (МТА) у порівнянні з роботою на дизельному паливі, слід розглядати як різницю вартості використаного палива та експлуатаційних затрат, віднесених до одиниці певного об'єму виконаної роботи. При розрахунках приймаємо, що умовно-постійні витрати (заробітна плата з нарахуваннями на соціальні виплати, амортизаційні відрахування, витрати на ремонт, вартість спожитих послуг та інші прямі витрати) залишаються незмінними при заміні дизельного палива на дизельне біопаливо.

Річна економічна ефективність застосування дизельного біопалива при роботі МТА становить:

$$E = C_{ДП} (Q_{ДП} - Q_{ДП}^Д) - Q_{ДБП} \left(C_{ДБП} + \frac{(1 - k_{ЗРО})}{k_{ЗРО} T_{МО}} Q_{МО} C_{МО} \right), \quad (3.1)$$

де E – економічна ефективність застосування дизельного біопалива при роботі МТА, грн; $C_{ДП}$ – вартість дизельного палива, грн/л; $Q_{ДП}$ – річний обсяг використання дизельного палива, л; $Q_{ДП}^Д$ – річний обсяг додаткової витрати дизельного палива при роботі на дизельному біопаливі, л; $Q_{ДБП}$ – річний обсяг використання дизельного біопалива, л; $C_{ДБП}$ – вартість дизельного біопалива, грн/л; $k_{ЗРО}$ – коефіцієнт зменшення ресурсу моторної оливи при використанні дизельного палива, відн. од.; $T_{МО}$ – ресурс моторної оливи в одиницях використаного дизельного палива, л; $Q_{МО}$ – об'єм оливи в системі змащування дизельного двигуна, л; $C_{МО}$ – вартість моторної оливи, грн/л.

При визначенні економічної ефективності необхідно враховувати збільшення витрати дизельного біопалива у порівнянні з дизельним паливом, яке при використанні чистого дизельного біопалива сягає від 18 до 20 %.

Для використання дизельного біопалива при роботі МТА, паливні системи двигунів енергетичних засобів повинні бути модернізовані, що потребує додаткових капіталовкладень. Система двохступеневого підігріву для використання дизельного біопалива дозволяє знизити його витрату на 5-6 % та розширяє температурний діапазон використання дизельного біопалива.

Враховуючи вищенаведене витрата дизельного біопалива може бути визначена виходячи із витрати дизельного палива наступним чином:

$$Q_{ДБП} = k_{ЗВ} (Q_{ДП} - Q_{ДП}^D), \quad (3.2)$$

де $k_{ЗВ}$ – коефіцієнт збільшення витрат дизельного біопалива у порівнянні з дизельним паливом, відн. од.

Додаткові експлуатаційні витрати при використанні дизельного біопалива пов'язані зі зменшенням терміну служби моторної оливи, фільтрів очистки палива та додаткових витрат дизельного палива, які пов'язані з запуском двигуна на дизельному паливі та з необхідністю здійснення підігріву паливного баку дизельного біопалива при низьких температурах навколишнього середовища.

Витрата дизельного палива пов'язана із запуском двигуна МТА, визначається, виходячи з конструктивних особливостей енергозасобу, за виразом:

$$Q_{ДП}^3 = k_{ЗП} (V_{ФГО} + V_{ФТО} + V_{П} + V_{ПН}), \quad (3.3)$$

де $Q_{ДП}^3$ – витрата дизельного палива на запуск двигуна, л; $k_{ЗП}$ – коефіцієнт запасу, відн. од.; $V_{ФГО}$ – об'єм фільтру грубої очистки палива, л; $V_{ФТО}$ – об'єм фільтру тонкої очистки палива, л; $V_{П}$ – внутрішній об'єм паливопроводів, л; $V_{ПН}$ – внутрішній об'єм головки паливного насоса високого тиску, л.

Витрату дизельного палива при температурі навколишнього середовища нижчій за 10 °С, можна визначити наступним чином:

$$Q_{ДП}^H = t_H G_{ГОД}, \quad (3.4)$$

де $Q_{ДП}^H$ – змінна витрата дизельного палива на запуск двигуна та нагрів палива в паливному баці, л; t_H – час роботи двигуна на дизельному паливі, необхідний для розігріву дизельного біопалива в паливному баці, год.; $G_{ГОД}$ – годинна витрата дизельного палива при режимі роботи двигуна з розігрівом дизельного біопалива, л.

Загальну додаткову витрату дизельного палива, при роботі МТА на дизельному біопаливі, виходячи з річної витрати дизельного палива, можна визначити наступним чином:

$$Q_{ДП}^D = \frac{Q_{ДП}}{Q_{ЗМ}} [k_{КР} k_{ЗП} (V_{ФГО} + V_{ФТО} + V_{П} + V_{ПН}) + (1 - k_{КР}) t_H G_{ГОД}], \quad (3.5)$$

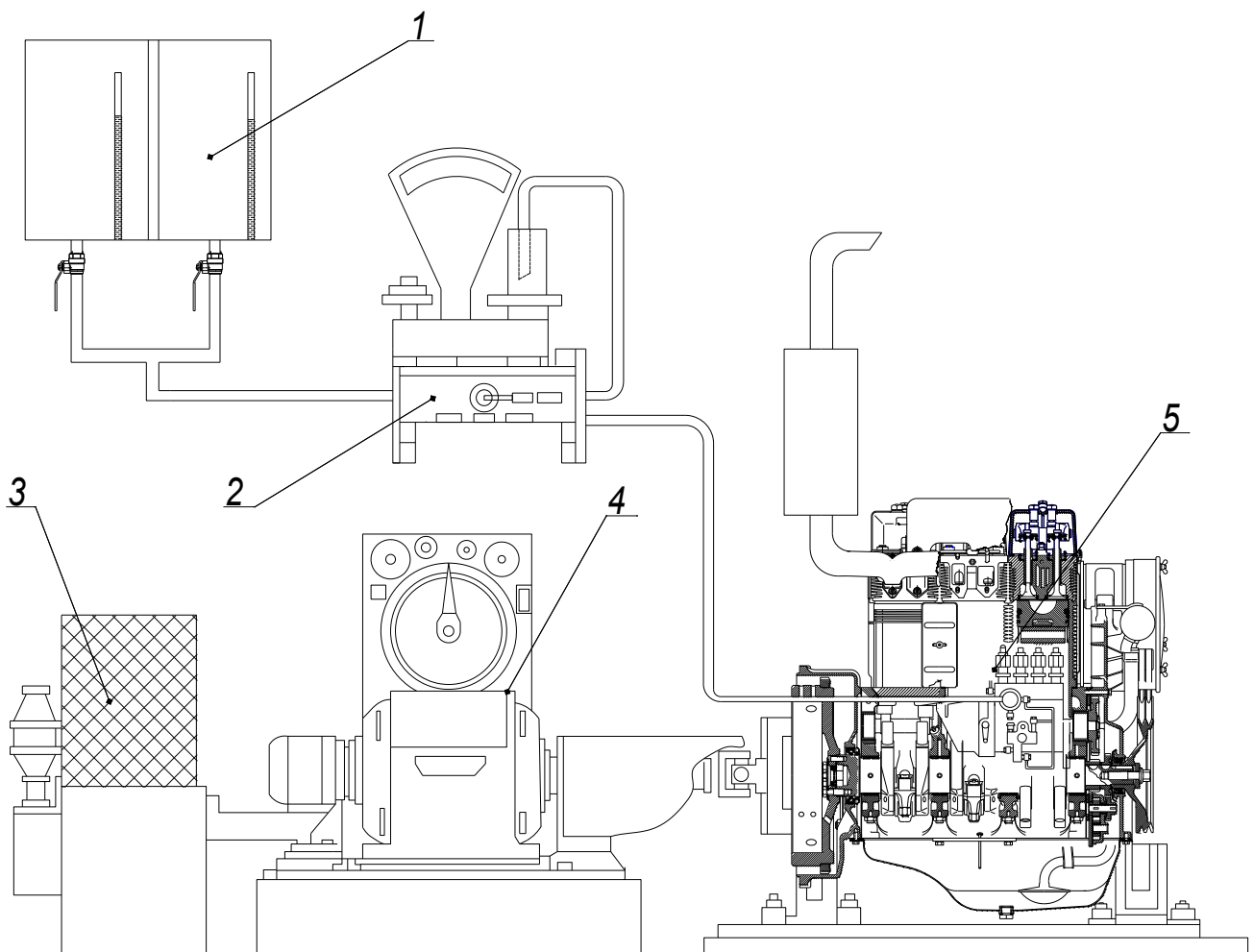
де $k_{КР}$ – коефіцієнт розподілення витрат дизельного палива, згідно граничної температури використання дизельного біопалива без застосування нагріву, відн. од.; $Q_{ЗМ}$ – середня змінна витрати палива МТА, л.

Лабораторна робота 3: Визначити витрату палива при роботі дизельного двигуна на дизельному паливі та дизельному біопаливі.

Мета роботи: Ознайомитись із конструкцією обкатувально-гальмівного стенду КИ-5543-ГОСНИТИ та провести визначення розходу палива при роботі дизельного двигуна на дизельному біопаливі та дизельному паливі нафтового походження.

Прилади та обладнання: обкатувально-гальмівний стенд КИ-5543-ГОСНИТИ, дизельний двигун, ваги, секундомір.

Обкатувально-гальмівний стенд КИ-5543-ГОСНИТИ (рис. 3.14) призначений для обкатування і випробовування тракторних двигунів. Його основні технічні характеристики наведено у таблиці 3.7.



1 – бак з паливом; 2 – ваги для палива; 3 – рідинний реостат; 4 – вимірювальний блок; 5 – ДВС.

Рис. 3.14. Схема розміщення елементів обкатувально-гальмівного стенду КИ-5543 ГОСНИТИ

При роботі обкатувально-гальмівного стенду КИ-5543-ГОСНИТИ вибраний тип палива надходить з бака до двигуна. Вимірювання витрати палива здійснюється за допомогою вагів для палива. На одній чашці вагів

встановлюють прозора ємність, на іншу чашку ставиться вантаж, що її врівноважує. При положенні крану "Замір" паливо подається з прозорої ємності в двигун.

Таблиця 3.7. Основні технічні характеристики обкатувально-гальмівного стенду КИ-5543 ГОСНИТИ

Показник, одиниця виміру	Значення
Діапазон регулювання частоти обертання ротора електромашини, об/хв.: – в режимі двигуна – в режимі генератора	600 – 1440 1700 – 3000
Найбільша гальмівна потужність стенду при 3000 об/хв., кВт	110
Номінальний крутний момент, Н м	390

Порядок виконання роботи – після прогрівання двигуна, важіль керування регулятором встановлюють в положення максимальної подачі вибраного типу палива та визначають максимальну частоту обертання холостого ходу і час витрати 100 грамів палива. Після цього реостатом, включеним в коло ротора електромашини, змінюють навантаження і визначають при цьому частоту обертання і час витрати 100 грамів палива. Результати заносять в таблицю 3.8.

Таблиця 3.8. Результати вимірювання показників двигуна

P_T , кг	n , об/хв.	Δt , с	ΔG_T , г	N_E , кВт	G_T , кг/год.	G_E , г/(кВт год.)
Дизельне паливо						
0	1853	107,8	100	–	3,34	–
7	1833	75,0	100	9,86	4,8	0,486
16	1826	53,3	100	21,48	6,75	0,314
22	1807	45,0	100	29,54	8	0,270
30	1793	35,5	100	40,05	10,14	0,253
34	1788	32,0	100	44,84	11,25	0,251
Дизельне біопаливо						
0	1889	86,3	100	–	4,17	–
7	1850	65,1	100	10,08	5,53	0,548
15	1838	48,6	100	20,03	7,4	0,369
22	1826	39,2	100	29,84	9,2	0,301
30	1805	31,3	100	39,34	11,5	0,292
34	1793	28,0	100	44,94	12,85	0,285

На основі отриманих даних визначають ефективну потужність двигуна визначають за формулою:

$$N_E = 0,736 \frac{P_T n}{1000}$$

де: N_E – ефективна потужність двигуна, кВт; P_T - покази стрілки по шкалі вагового механізму, кг; n – частота обертання ротора електромашини по тахометру, об/хв.

Годинну витрату палива визначають за виразом:

$$G_T = 3,6 \frac{\Delta G}{\Delta t}$$

де: G_T – годинна витрата палива двигуном, кг/год.; ΔG – маси витраченого палива, г; Δt – час, за який двигун витрачає дозу палива ΔG , с.

На основі розрахунків будують графік залежності годинної витрати палива від потужності двигуна (рис. 3.15) для дизельного палива та дизельного біопалива.

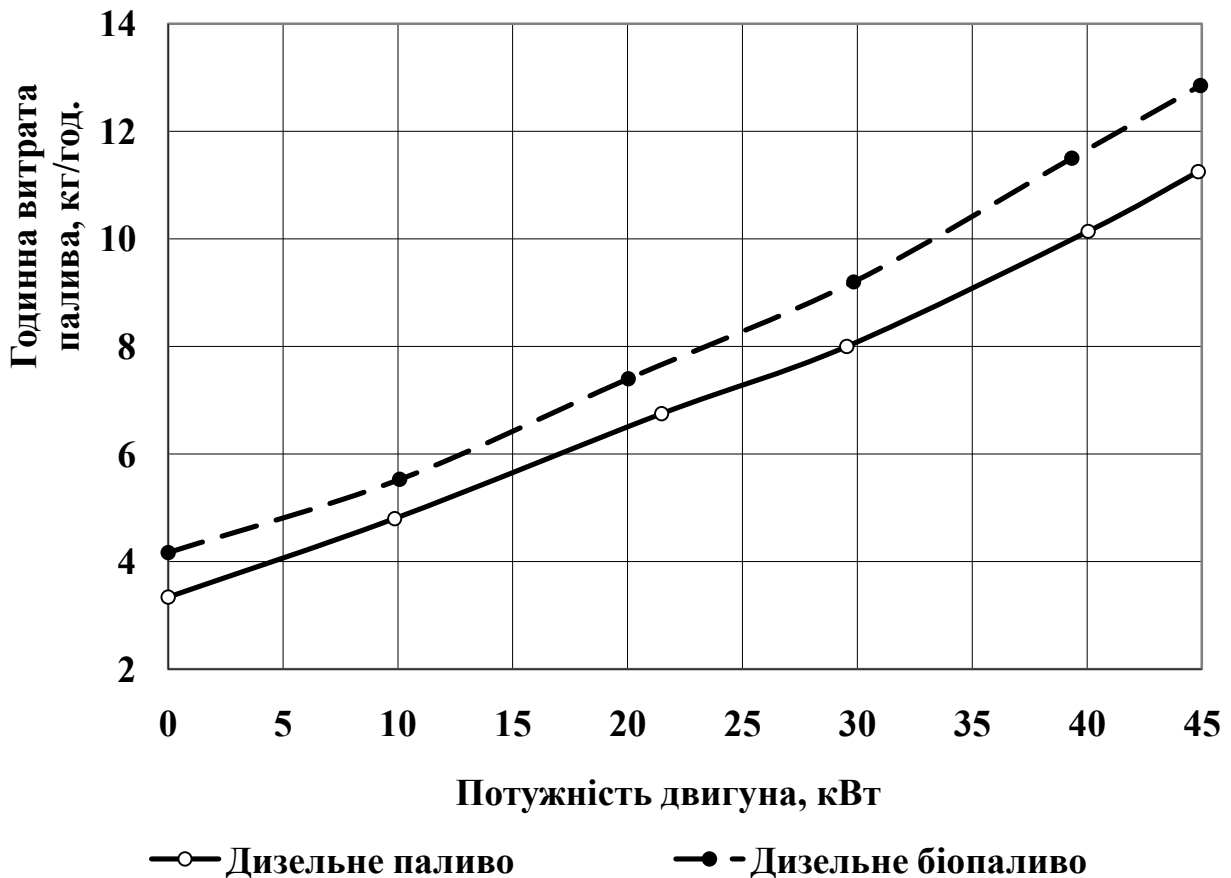


Рис. 3.15. Годинна витрата палива при максимальному положенні важеля подачі палива

Питому витрату палива визначають за виразом:

$$g_E = \frac{G_T \cdot 10^3}{N_E}$$

де: g_E – питома витрата палива г/кВт год.

На основі розрахунків будують графік залежності питомої витрати палива від потужності двигуна (рис. 3.16) для дизельного палива та дизельного біопалива.

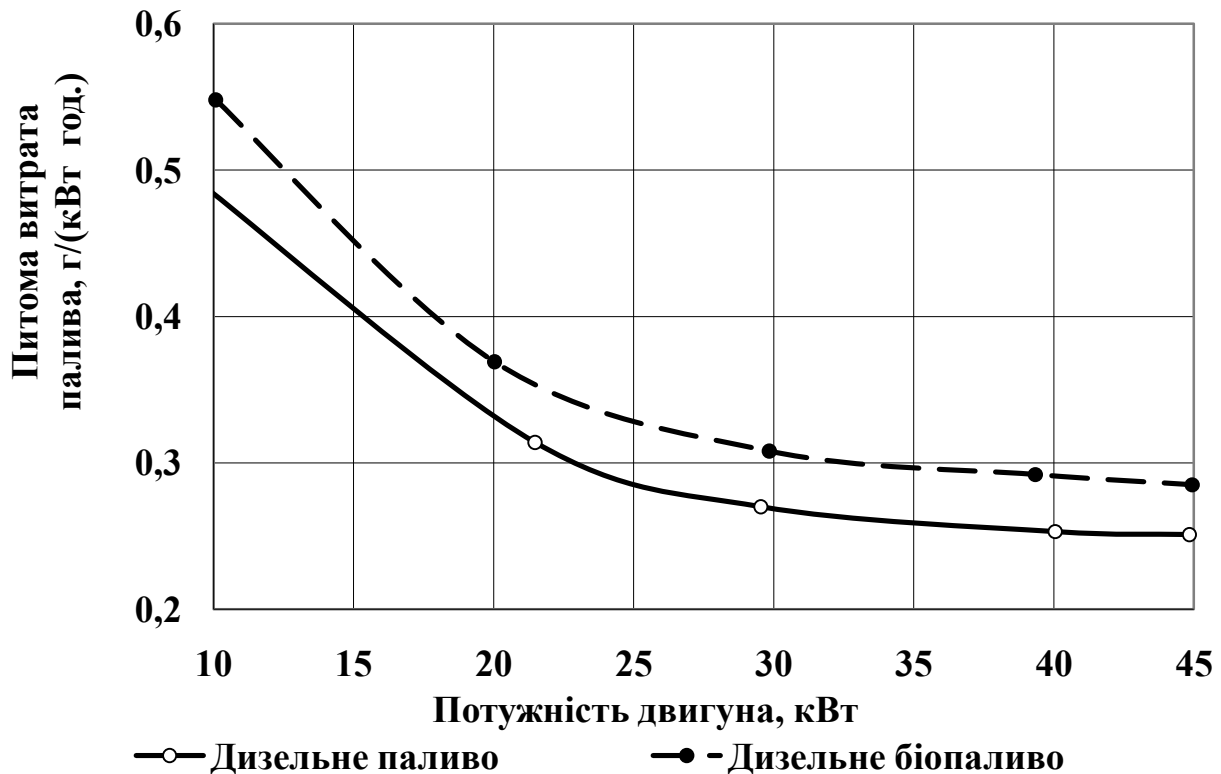


Рис. 3.16. Питома витрата витрати палива при максимальному положенні важеля подачі палива

Таким чином, на основі аналізу експериментальних даних роботи дизельного двигуна на регуляторних характеристиках встановлено, що при застосуванні дизельного біопалива відбувається збільшення годинної та питомої витрати палива на величину від 13,5 до 18 % в залежності від завантаження двигуна.

Практична робота 3: Визначити річну потребу в дизельному біопаливі та розрахувати економічну ефективність застосування дизельного біопалива при роботі МТА.

Вихідні дані: Річне завантаження МТА $H_3 = 1150$ у.е. га; нормативна витрата палива на умовний еталонний гектар $G_{VE} = 9,1$ л/у.е. га; середня змінна витрати палива МТА $Q_{3M} = 70$ л.; вартість дизельного палива $C_{ДП} = 13,98$ грн/л; вартість дизельного біопалива $C_{ДБП} = 7,21$ грн/л; вартість моторної оливи $C_{МО} = 50$ грн/л. Експлуатаційні параметри МТА та конструктивні параметри двигуна енергозасобу необхідні для розрахунку економічної ефективності

приведені в табл. 3.9. Варіант модернізації паливної системи двигуна енергозасобу МТА для роботи на дизельному біопаливі згідно рис. 3.6.

Таблиця 3.9. Експлуатаційні та конструктивні параметри двигуна енергозасобу МТА при використанні дизельного біопалива

Коефіцієнт розподілення витрат дизельного палива, згідно граничної температури використання дизельного біопалива без застосування нагріву, відн. од.	k_{KP}	0,7
Коефіцієнт запасу при зміні типу палива, відн. од.	$k_{ЗП}$	1,2
Час роботи двигуна на дизельному паливі, необхідний для розігріву дизельного біопалива в паливному баці, год.	t_H	0,5
Годинна витрата палива на режимі роботи двигуна при розігріві дизельного біопалива, л	$G_{ГОД}$	10
Коефіцієнт збільшення витрат дизельного біопалива у порівнянні з дизельним паливом, відн. од.	$k_{ЗВ}$	1,12
Коефіцієнт зменшення ресурсу моторної оливи при використанні дизельного біопалива, відн. од.	$k_{ЗРО}$	0,8
Об'єм фільтра грубої очистки палива, л	$V_{ФГО}$	0,7
Об'єм фільтра тонкої очистки палива, л	$V_{ФТО}$	0,3
Внутрішній об'єм паливопроводів, л	$V_{П}$	0,2
Внутрішній об'єм головки паливного насоса високого тиску, л	$V_{ПН}$	0,35
Об'єм оливи в системі змащування дизельного двигуна, л	$Q_{МО}$	12
Ресурс моторної оливи в одиницях використаного дизельного палива, л	$T_{МО}$	4200
Капітальні витрати на модернізацію паливної системи, грн	K	20000

Виходячи із нормативного річного завантаження МТА визначаємо витрату дизельного палива:

$$Q_{ДП} = H_3 G_{VE} = 1150 \cdot 9,1 = 10465 \text{ л.}$$

Виходячи з умов експлуатації МТА на дизельному біопаливі додаткову витрату дизельного палива, можна визначити наступним чином:

$$Q_{ДП}^Д = \frac{Q_{ДП}}{Q_{ЗМ}} [k_{KP} k_{ЗП} (V_{ФГО} + V_{ФТО} + V_{П} + V_{ПН}) + (1 - k_{KP}) t_H G_{ГОД}] =$$

$$= \frac{10465}{70} [0,7 \cdot 1,2(0,7 + 0,3 + 0,2 + 0,35) + (1 - 0,7) \cdot 0,5 \cdot 10] = 418 \text{ л.}$$

Слід зазначити, що коефіцієнт розподілення витрат дизельного палива, згідно граничної температури використання дизельного біопалива без застосування нагріву в паливному баці k_{KP} може дещо відрізнятись від прийнятого, оскільки визначається кліматичною зоною розташування господарства.

Необхідна кількість дизельного біопалива для заміщення дизельного палива нафтового походження визначається за виразом:

$$Q_{ДБП} = k_{ЗВ} (Q_{ДП} - Q_{ДП}^Д) = 1,12 \cdot (10465 - 418) = 11252 \text{ л.}$$

Умовно-постійні витрати (заробітна плата з нарахуваннями на соціальні виплати, амортизаційні відрахування, витрати на ремонт, вартість спожитих послуг та інші прямі витрати) залишаються незмінними при заміні дизельного палива на дизельне біопаливо. Економічну ефективність застосування дизельного біопалива при роботі МТА, віднесена до одиниці або певного об'єму виконаної роботи, визначають як різницю вартості використаного палива та додаткових витрат пов'язаних з особливістю роботи МТА при використанні дизельного біопалива:

$$E = C_{ДП} (Q_{ДП} - Q_{ДП}^Д) - Q_{ДБП} \left(C_{ДБП} + \frac{(1 - k_{ЗРО})}{k_{ЗРО} T_{МО}} Q_{МО} C_{МО} \right) =$$

$$= 13,98 \cdot (10465 - 418) - 11252 \cdot \left(7,21 + \frac{(1 - 0,8)}{0,8 \cdot 4200} \cdot 12 \cdot 50 \right) = 58633 \text{ грн.}$$

Термін окупності капітальних затрат на переобладнання МТА для використання дизельного біопалива визначається як відношення затрачених коштів до економічної ефективності використання дизельного біопалива:

$$T = \frac{K}{E} = \frac{20000}{58633} = 0,34 \text{ років.}$$

Таким чином, річна економічна ефективність застосування дизельного біопалива для одного МТА може становити 58,633 тис. грн. при терміні окупності додаткового обладнання необхідного для використання дизельного біопалива менше одного року.

Запитання для самоконтролю:

1. Що являє собою дизельне біопаливо?
2. Яка головна технічна проблема широкого впровадження дизельного біопалива?
3. У чому головна відмінність дизельного біопалива від біодизельного?
4. У чому головні переваги дизельного біопалива порівняно з дизельним паливом?
5. Які основні недоліки дизельного біопалива, котрі важко усунути тим чи іншим способом у процесі виробництва?
6. У чому полягають основні відмінності дизельного палива виробленого із різних рослинних олій?
7. Як змінюється при застосуванні дизельного біопалива та його сумішей з дизельним паливом потужність і крутний момент, який розвиває двигун?
8. Як змінюється при застосуванні дизельного біопалива та його сумішей з дизельним паливом питома і годинна витрата палива?
9. Який ефективний діапазон використання дизельного біопалива, при якому кінематична в'язкість не буде суттєво впливати на роботу дизельного двигуна для сумішей з дизельним паливом та чистого дизельного біопалива?

10. За рахунок чого підвищення температури дизельного біопалива перед впорскуванням покращує його згорання?
11. Опишіть систему двохступеневого підігріву дизельного біопалива.
12. При якій температурі нагріву дизельного біопалива досягається його мінімальна витрата?
13. Охарактеризуйте залежність питомої витрати палива від навантаження двигуна при використанні дизельного палива, дизельного біопалива без та із застосуванням нагріву палива.
14. Охарактеризуйте залежність питомих викидів чадного газу від навантаження двигуна при використанні дизельного палива, дизельного біопалива без та із застосуванням нагріву палива.
15. Охарактеризуйте залежність питомих викидів вуглеводневих сполук від навантаження двигуна при використанні дизельного палива, дизельного біопалива без та із застосуванням нагріву палива.
16. Охарактеризуйте залежність питомих викидів оксидів азоту від навантаження двигуна при використанні дизельного палива, дизельного біопалива без та із застосуванням нагріву палива.
17. Як впливає використання системи двохступеневого підігріву дизельного біопалива на перевитрату дизельного біопалива у порівнянні з дизельним паливом нафтового походження?
18. Яких основних правил доцільно дотримуватися при використанні дизельного біопалива?
19. Які основні профілактичні роботи необхідно виконати перед початком експлуатації двигуна на дизельному біопаливі?
20. За рахунок чого досягається економічна ефективність застосування дизельного біопалива?
21. Як визначається витрата палива при роботі дизельного двигуна за допомогою обкатувально-гальмівного стенду?

Література:

1. Адаптация тракторов и автомобилей к работе на биотопливе / Н. В. Краснощеков, Г. С. Савельев, А. Д. Шапкайц [и др.] // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1994. – №12. – С. 1-4.
2. Альтернативные дизельные топлива / В. Полищук, В. Дубровин, А. Полищук // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. – Lublin, 2012. – Т. 14. – С. 20-31.
3. Визначення нижчої теплоти згорання біодизельного палива за хроматографічними даними / В. Г. Семенов, С. М. Черненко, С. М. Атамась // Вісник Кремен. держ. університету ім. М. Остроградського. Наукові праці КДУ ім. М. Остроградського. – 2010. – Вип. 2., Ч. 1. – С. 87-91.
4. Влияние свойств биотоплив на характеристики впрыскивания в камеру с постоянным давлением / И. П. Васильев, А. Хайлинг, М. Кайзер [и др.] // Двигатели внутреннего сгорания. – 2011. – №2. – С. 37-41.

5. Вплив біодизеля на експлуатаційні показники роботи МТА / В. Надикто, В. Дідур, В. Федоренко // Техніка і технології АПК. – 2008. – №1. – С. 27-29.

6. Галушак О. О. Особливості акумуляторної системи живлення common rail при динамічному регулюванні відсоткового складу суміші дизельного та біодизельного палив / О. О. Галушак // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. –2014. – №2 (69). – С. 74-77.

7. ДСТУ 3868-99 Паливо дизельне. Технічні умови.

8. ДСТУ 6081:2009 Паливо моторне. Ефіри метилових жирних кислот олій і жирів для дизельних двигунів. Технічні вимоги.

9. Звонов В. А. Исследование эффективности применения в дизельных двигателях топливных смесей и биотоплив / Звонов В. А., Козлов А. В., Теренченко А. С. // Российский химический журнал. – 2008. –№6. – С. 147-151.

10. Разлейцев Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях. – Харьков: Вища школа, 1980. – 169 с.

11. Семенов В. Г. Аналіз показників роботи дизелів на нафтових і альтернативних паливах рослинного походження / В. Г Семенов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: Збірка наук. праць. Харків: НТУ «ХПІ». – 2002. – № 3. – С. 177-197

12. Шароглазов Б. А. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов: учебник / Б. А. Шароглазов, М. Ф. Фарафонов, В. В. Клементьев// – Челябинск: ЮУрГУ, 2004. – 344 с.

13. Bondioli P. Evaluating the Oxidation Stability of Biodiesel. An Experimental Contribution. / P. Bondioli, L Folegatti // Rivista Italiana delle Sostanze Grasse. – 1996. – Vol. 73. – P. 349-353.

14. Correlating Chemical Structure and Physical Properties of Vegetable Oil Esters / Jr. de A Rodriguez, F. de P Cardoso, E. R. Lachter [and other] // JAOCS. – 2006. –Vol. 83 – P. 353-357.

15. Dunn R. O. Effects of minor constituents on cold flow properties and performance of biodiesel / R. O. Dunn // Progress in Energy and Combustion Science. – 2009 –Vol. 35/ –P. 481-489

16. Monoyem A. The effect of timing and oxidation on emissions from biodiesel fueled engines / A. Monoyem, J. H. Van Gerpen, M. Canakci // Transactions of the ASAE. – 2001. –Vol. 44(1). – P. 35-42.

17. Голуб Г.А., Чуба В.В., Марус О.А. Визначення витрати палива машинно-тракторним агрегатом при польових випробуваннях. – Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК / Редколегія: С.М. Ніколаєнко (відповідальний редактор) та інші – К.: 2015. – ВЦ НУБіП України, 2015. – Вип. 224. – 310 с. – С. 303-309.

18. Чуба В.В., Голуб Г.А. Вплив підігріву дизельного біопалива на параметри впорску палива. – Сучасні тенденції розвитку освіти, науки і виробництва. Збірник наукових праць Міжнародної науково-практичної

конференції педагогічних і науково-педагогічних працівників, науковців та молодих вчених, 9-10 грудня 2015 р. – Ніжин, 2015. – 184 с. – С. 101-102.

19. Г. Голуб, В. Чуба. Дослідження нагріву дизельного біопалива перед впорскуванням до циліндрів двигуна. – Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: збірник наукових праць / ДНУ "УкрНДІ прогнозування та випробування техніки і технологій для с.-г. виробництва імені Леоніда Погорілого" (УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого); Редколегія: Кравчук В.І. (головний редактор) та інші. – Дослідницьке, 2015. – Вип. 19 (33). – 502 с. – С. 271-275.

20. Голуб Г.А., Чуба В.В., Зубко В.М. Режими нагріву дизельного біопалива в паливному баці // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія "Механізація та автоматизація виробничих процесів". – Суми: СНАУ, 2014. – Вип. 11 (26). – 135. – С. 70-74.

21. Голуб Г.А., Чуба В.В. Експлуатаційні параметри роботи двигуна при застосуванні дизельного біопалива. – Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК / Редколегія: Д.О. Мельничук (відповідальний редактор) та інші – К.: 2014. – Вип. 196, ч. 1. – 448 с. – С. 23-31.

22. Г. Голуб, В. Чуба. Моделирование эксплуатационных показателей работы МТА на дизельном биотопливе. – MOTROL: Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. / An International Journal on Operation of Farm and Agri-Food Industry Machinery. – Lublin-Rzeszow, 2014. – Vol. 16, No 3. – 358 с. – P. 66-73.

23. Голуб Г.А., Чуба В.В. Оцінка витрати пального при застосуванні дизельного біопалива. – Міжвідомчий тематичний науковий збірник "Механізація та електрифікація сільського господарства". – Глеваха, 2014. – Вип. 99. Т. 2 – 480 с. – С. 76-83.

24. Голуб Г.А., В.В. Чуба. Математичне моделювання експлуатаційних показників роботи машинно-тракторного агрегату на дизельному біопаливі. – Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія "Техніка та енергетика АПК" / Редколегія: Д.О. Мельничук (відповідальний редактор) та інші – К.: ВЦ НУБіП України, 2014. – Вип. 194, ч. 1. – 253 с. – С. 181-187.

25. В. Чуба, Г. Голуб. Экологические показатели работы двигателя Д-65Н на дизельном биотопливе. – MOTROL: Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. / An International Journal on Operation of Farm and Agri-Food Industry Machinery. – Lublin-Rzeszow, 2013. – Vol. 15, No 4. – 328 с. – P. 172-179.

26. Голуб Г.А., Чуба В.В. Експлуатаційні параметри МТА при роботі на дизельному біопаливі. – Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві // Збірник наукових праць Інституту механізації тваринництва Національної академії аграрних наук України. – Запоріжжя, ІМТ НААН України, 2012. – Вип. 2 (10). – 234 с. – С. 23-32.

4. ОСНОВИ ВИРОБНИЦТВА БІОЕТАНОЛУ

4.1. Загальні відомості про біоетанол

Світове виробництво біоетанолу як альтернативного палива для транспорту зросло з 17 млрд. літрів у 2000 до 85 млрд. літрів у 2012 році. Згідно з оптимістичними прогнозами, очікуваний об'єм виробництва біоетанолу в світі у 2020 р. складе 281,5 млрд. л при середньорічному темпі зростання об'єму ринку за період з 2016 по 2020 рр. 12,5%. За песимістичного прогнозу, очікуваний об'єм споживання біоетанолу в 2020 р. буде становити 187,5 млрд. л при середньорічному темпі зростання об'єму ринку біоетанолу в 2016-2020 рр. – 10%. У обох сценаріях у 2020 р. об'єм світової торгівлі біоетанолом складатиме до 10% від світового об'єму виробництва рідкого палива. Лідерами, як і раніше, залишаться США і Бразилія, їх частка в сумі в світовому виробництві до 2020 р. складатиме від 55 до 65%.

Просторова будова атому біоетанолу (хімічна формула C_2H_5OH) приведена на рис. 4.1

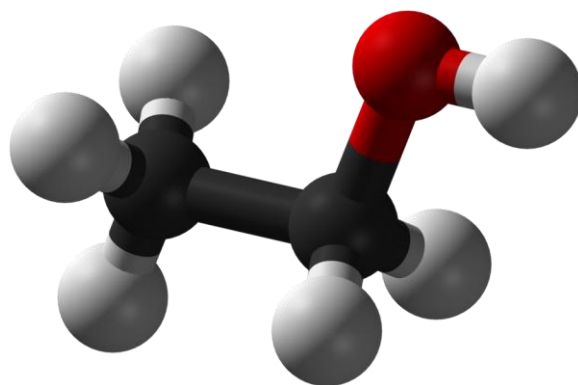


Рис. 4.1. Просторова будова атому біоетанолу (білий колір – водень, червоний колір – кисень, чорний колір вуглець)

Україна споживає 4,5 млн. т бензину в рік. Власний видобуток сировини – нафти і газових конденсатів забезпечує лише 20% цієї кількості, решта бензину виробляється з імпортової нафти або завозиться з сусідніх країн.

Бензинова залежність країни може бути істотно знижена за рахунок виробництва і використання біоетанолу. Інтерес інвесторів до цього виду діяльності з'явився тільки після подолання бензином на АЗС у 2011 році цінового рівня 1,25-1,35 дол. США за літр. Собівартість етанолвмісних добавок становить 0,7-0,8 дол. США за літр. Будучи змішані з бензином, вони дають цілком пристойний бензин типу А-95, з низьким вмістом сірки і ароматичних вуглеводнів. На рис. 4.2 наведено приклади використання товарного біоетанолу.

Біоетанол – термін, який з'явився близько 15 років тому, для позначення етилового спирту, отриманого шляхом біохімічної переробки рослинної сировини. Етиловий спирт (етанол) може бути отриманий і чисто хімічним

шляхом з етилену, однак цей етанол вже не буде "екологічним", оскільки він вироблений з не відновлюваної вуглеводневої сировини. Спалювання такого етанолу призводить до зростання концентрації вуглекислого газу в атмосфері так само, як і спалювання природного газу і нафти. При спалюванні ж біоетанолу вуглекислий газ, що виділяється в атмосферу розглядається таким, що не викликає глобальне потепління, оскільки він зовсім недавно був використаний рослинами з атмосфери під час фотосинтезу. Термін "біоетанол" поширився в той час, коли виникла загальна занепокоєність наслідками антропогенної зміни клімату планети.



Рис. 4.2. Заправка автомобіля біоетанолом E85 та вигляд пляшки денатурованого етанолу

Таким чином, біоетанол – це безводний високооктановий етиловий спирт (октанове число становить 105), отриманий в процесі переробки рослинної відновлювальної сировини, методом ферментації цукрів мікроорганізмами, який використовується в якості моторного палива (містить не менше 99% етилового спирту). Використовується він також для виготовлення моторного сумішевого палива або добавок до моторного палива.

За результатами статичних напрацювань підприємств спиртової промисловості та науковців, фізико-хімічні показники біоетанолу унормовано до наведених у таблиці 4.1.

Біоетанол можна застосовувати в сучасних двигунах внутрішнього згорання (без зміни їх конструкції) до 15% у суміші з бензином, збільшуючи тим самим октанове число останнього, або безпосередньо як паливо. Біоетанол, на відміну від нафти, є однією з форм використання поновлюваних джерел енергії, які можна отримати з сільськогосподарської сировини. Крім біоетанолу, в технологічному процесі виробництва, також отримують цінну кормову добавку – барду.

Таблиця 4.1. Якісні показники біоетанолу

№ п/п	Назва показника	Норма показника	
		Марка А	Марка Б
1	Зовнішній вигляд та колір	Прозора безбарвна рідина або світло жовтого забарвлення	
2	Густина за температури $(20 \pm 0,1)^{\circ}\text{C}$, $\text{кг}/\text{м}^3$	від 787 до 792	
3	Температури при 760 мм рт. ст.: кипіння плавлення спалаху	78 -35 112	
3	Об'ємна частка води, %, не більше	0,2	
4	Масова концентрація сухого залишку, $\text{мг}/\text{дм}^3$, не більше	100	
5	Об'ємна частка спирту етилового, %, не менше	97,8	98,3
6	Об'ємна частка метанолу, %, не більше	1,0	
10	Об'ємна частка бензину (вуглеводнів), %	від 1,0 до 1,5	

Біоетанол це вибухово-небезпечна речовина, адже пари спирту змішуючись з повітрям в концентрації від 2,8 до 13,7 % до об'єму повітря, мають здатність вибухати від джерела вогню або іскри, а концентровані водні розчини легко займаються і горять без утворення кіптяви. Біоетанол гігроскопічний, він абсорбує вологу із повітря. Пари є отруйним для людини, тварин, а також для мікроорганізмів, максимально допустима концентрація їх в повітрі – 1 мг/л.

На відміну від харчового спирту, з якого виробляються алкогольні напої, паливний етанол виготовляється шляхом скороченої дистиляції (дві ректифікаційні колони, замість п'яти), тому він містить метанол та сивушні масла і проходить процес денатурації бензином, що робить його непридатним для вживання.

Інтерес до етанолу, як паливу, виник набагато раніше, ніж людство помітило глобальне потепління. Він був обумовлений дефіцитом нафтового палива в деяких країнах і наявністю значних ресурсів для виробництва біоетанолу. Йдеться в першу чергу про Бразилію, уряд якої почав заохочувати використання біоетанолу в якості компонента палива для двигунів з іскровим запалюванням. Потім до процесу часткової заміни нафтового автомобільного палива біоетанолом стали підключатися США і Канада, країни Європи. На сьогоднішній день це справа зайшла досить далеко та стала одним із важливих напрямків розвитку світової економіки. Збільшення виробництва біоетанолу спричинило розширення посівів поновлюваної сировини – цукрового очерету, кукурудзи, інших зернових культур. Почалося виробництво багатопаливних двигунів із іскровим запалюванням, пристосованих до споживання палив із вмістом до 95% біоетанолу.

4.2. Сировинна база та основи процесу виробництва біоетанолу

В умовах України сировиною для виробництва біоетанолу можуть бути цукровмісні (цукровий буряк, цукрове сорго, топінамбур) чи крохмалевмісні (кукурудза, жито, пшениця, картопля) сільськогосподарські культури, а також інші види рослин чи їх залишки (стебла, трави, залишки сільськогосподарської та деревообробної промисловості).

Картопля найбільш повно відповідає технологічним вимогам спиртового виробництва, так як швидко розварюється, утворює агломероване сусло, що містить необхідну кількість азотистих речовин для живлення дріжджів; картопляний крохмаль забезпечує найбільш високий вихід спирту.

Зерновими культури, які підходять для виробництва спирту є ячмінь, жито, пшениця, овес, просо, кукурудза, а також можна отримувати етиловий спирт з сорго, гречки, гороху, вики, сочевиці та ін. Хімічний склад зерна різних сільськогосподарських культур наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2. Усереднений хімічний склад основних зернових культур (в % на суху речовину)

Культура	Крохмаль	Цукор	Целюлоза	Геміцелюлози і пектинові речовини	Білки	Жири	Мінеральні речовини
Кукурудза	70	3,0	2,1	7,0	10	4,6	1,3
Ячмінь	55	4,0	6,0	11,0	12	2,0	3,5
Овес	45	2,0	14,0	13,0	12	5,5	3,8
Просо	58	3,8	11,0	2,0	12	4,6	4,0
Пшениця	60	4,3	2,8	8,0	16	1,9	2,2
Жито	65	5,0	2,2	10,0	13	1,7	2,0

Із зернових культур найкращою сировиною для виробництва спирту є кукурудза, адже вона міститься відносно більше крохмалю, менше клітковини, більше жиру (що підвищує кормову цінність барди) крім того, урожайність кукурудзи в 2-3 рази вище врожайності інших зернових культур.

Меляса, яка є відходом цукробурякового виробництва, що утворюється після кристалізації цукру. За зовнішнім виглядом меляса є густою рідиною темно-коричневого кольору.

Целюлоза – складовий компонент відходів переробки деревини, некондиційна деревина, а також кукурудзяні качани, соняшникове лушпиння, бавовникове лушпиння тощо. Тобто, ті матеріали, які містять в значній кількості поліцукри, перш за все целюлозу.

У таблиці 4.3 наведений орієнтовний питомий вихід біоетанолу із біосировини, а на рисунку 4.3 – вихід біоетанолу із розрахунку на один гектар.

Таблиця 4.3. Орієнтовна урожайність сільськогосподарських культур та можливий вихід біоетанолу

Культура (біосировина)	Орієнтовний вихід, ц/га	Вихід етанолу з тонни сировини, л/т
Цукровий буряк	600	50
Топінамбур	300	87
Цикорій	350	92
Картопля	324	114
Кукурудза (зерно)	70	416
Пшениця	50	395
Ячмінь	58	370
Жито	30	340
Меляса	21	650
Деревина		200

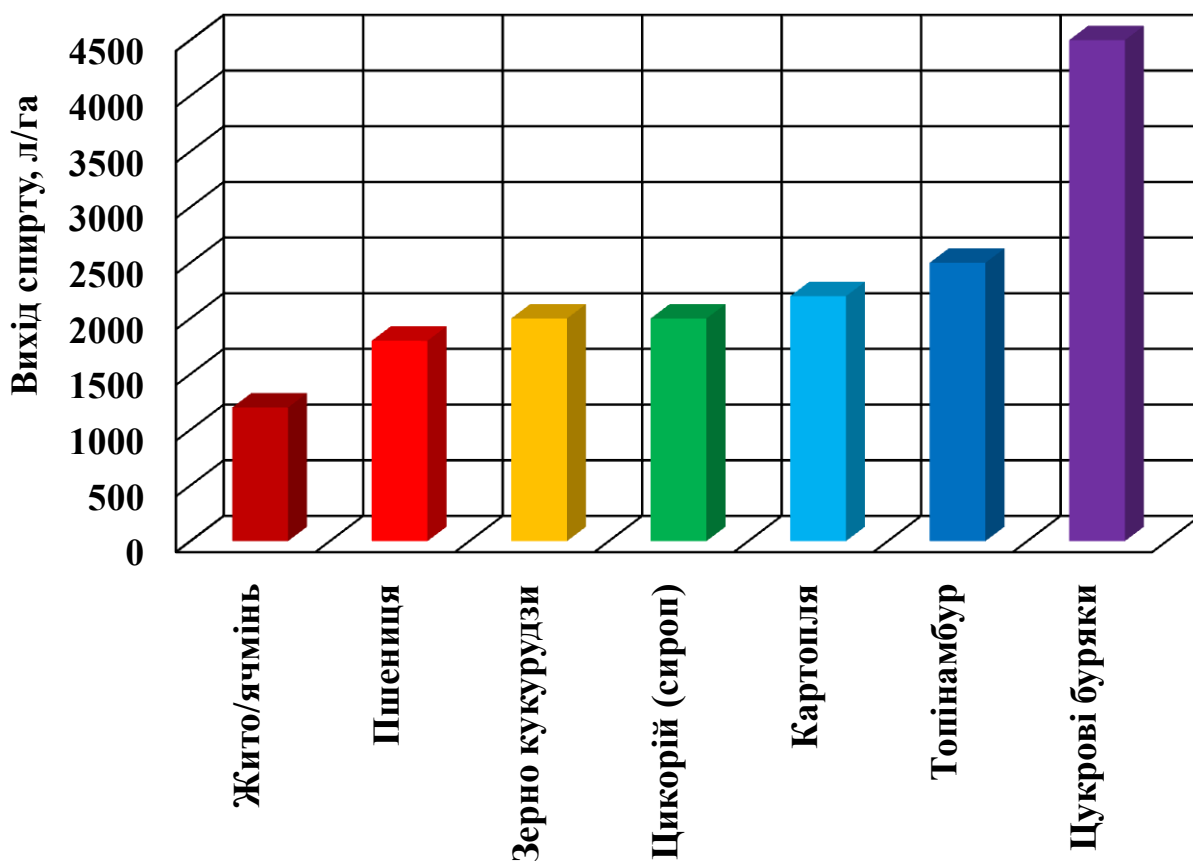
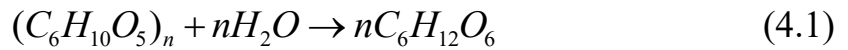
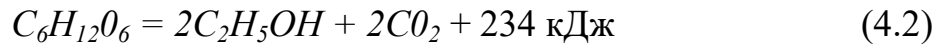


Рис 4.3. Ефективність виробництва біоетанолу із різних видів сільськогосподарських культур (джерело uk.wikipedia.org)

При виробництві біоетанолу спочатку необхідне рівномірне подрібнення сировини. Наступний етапи технологічного процесу – суспендування і оцукрювання, в результаті яких полісахариди крохмалю гідролізуються у придатні для зброджування дріжджами моноцукри:



Перетворення сировини в біоетанол здійснюється за допомогою дріжджів які є одноклітинними мікроорганізмами класу аскоміцетів (сумчастих грибів). Дріжджі належать до факультативних анаеробів. Це означає, що вони виявляють свої життєві функції як у присутності кисню повітря (аеробний процес), так і при його відсутності (анаеробний процес). За відсутності повітря вони для здійснення своїх життєвих функцій використовують кисень, який міститься в органічних речовинах. Ферментація за анаеробною схемою називається бродінням. При цьому утворюється етиловий спирт та діоксид вуглецю:



Оптимум інтенсивності бродіння 35°C. Більшість дріжджів добре розвивається у межах рН 3,7-3,3. На розвиток дріжджів значно впливає концентрація цукру. Оптимальний його вміст у середовищі для дріжджів складає від 13 до 20%. На дріжджі спирт має пригнічуючу дію, максимальна концентрація спирту в спиртовій бражці 11-12%. Зі збільшенням концентрації спирту в бражці інтенсивність бродіння зменшується.

4.3. Основи біотехнологічного процесу отримання біоетанолу

Принципова технологічна схема виробництва спирту із крохмалевмісної сировини передбачає виконання наступних технологічних операцій на прикладі зернових культур.

Приймання сировини. Зерно має бути здоровим, з високою крохмалистістю, вологістю від 14 до 17 %, в залежності від культури та мати незначну засміченість. При прийманні звертають увагу на щільність зерна, яка повинна знаходитись в межах: у кукурудзи 680-820, жита 680-750, пшениці 730-840, ячменю 580-700, вівса 400-450, проса 680-780 г/дм³.

Очищення сировини. Усі види зерна, які надходить у виробництво, очищають від пилу, землі, каміння, металевих предметів та ін. Домішки, які відрізняються від зерна даної культури товщиною або шириною і аеродинамічними властивостями, відокремлюють на повітряно-ситовому сепараторі. У очищеному зерні вміст домішок повинен бути не більше 1%. Дрібні феромагнітні домішки, які містяться у зерні після очистки у повітряно-ситових сепараторах, відокремлюють з допомогою магнітних сепараторів.

Подрібнення зерна. При високотемпературному розварюванні зерна при температурах від 120 до 160°C прохід помелу крізь сито з отворами діаметром 1 мм повинен бути 100%. А при низькотемпературному розварюванні при температурах від 85 до 95°C помел повинен бути понадтонким, тобто прохід крізь сито з отворами діаметром 0,25 мм повинен становити 100%.

Приготування замісу. Для отримання замісу помел зерна змішують з водою у співвідношенні 2,5-3,0 дм³ на 1 кг помелу. Найбільша кількість розчинних вуглеводів накопичується в замісах, приготовлених при температурі 60–65°C. Для зменшення витрат води та покращання фізико-хімічного складу замісу в останні роки до 50% води замінують фільтратом барди. Окрім того, в

заміс додається до 30% розріджуючого термостабільного ферментного препарату для зменшення його густини.

Термоферментативна обробка замісів. Основна мета – підготовка до оцукрювання крохмалю. Оцукрення найбільш активно і повно проходить тоді, коли крохмаль незахищений клітинними стінками, оклейстерезований і розчинений. Це досягається розварюванням – тепловою обробкою сировини при підвищеному тиску і температурах від 85 до 170°C. Далі заміс подається в апарати термоферментативної обробки, в яких він обробляється 90-120 хв., поступово перетікаючи із одного в інший. При цьому проводиться постійне перемішування замісу для контакту з ферментом.

Оцукрення (гідроліз) розвареної маси. Оцукрювання складається із охолодження розвареної маси до температури від 57 до 60°C, змішування розвареної маси з ферментними препаратами, безпосередньо оцукрювання крохмалю та охолодження сусла до початкової температури його бродіння. У результаті оцукрення розвареної маси отримують напівпродукт – сусло спиртового виробництва.

Культивування дріжджів. Дріжджі спиртового виробництва – це зброжене сусло для дріжджів, масова частка сухих речовин у якому зменшена до половини або третини від початкової та з концентрацією дріжджів від 180 до 200 млн. клітин в 1 см³.

Збродження сусла. У бродильних апаратах цукор сусла зброджують дріжджами у спирт. Сусло, що бродить називають бражкою, а зброжене сусло – зрілою бражкою. При періодичному способі збродження виробничі дріжджі вносять у бродильний апарат, який потім поступово заповнюють суслим. Кількість виробничих дріжджів становить від 8 до 10% від об'єму сусла. Нормальна тривалість бродіння 72 год., а завдяки використанню сучасних способів попередньої підготовки сусла вона може бути скорочена до 60 год. Температура бродіння залежить від штаму використаних дріжджів і може підтримуватись в межах від 28 до 35°C. Бродіння вважають, закінченим, коли вміст незброджених цукрів у бражці досягає 0,2-0,3 г/100 см³.

Виділення спирту (перегонка) та його ректифікація. На перегонку і ректифікацію спирту подається зріла бражка, яка складається з води (82-90 мас. %), сухих речовин (4-10 % мас. %) та етилового спирту із супутніми леткими домішками (6-10 % мас. або 9-14 об. %). У бражці міститься також 1,0-1,5 г/дм³ діоксиду вуглецю, її кислотність 0,5°, рН 4,5-5,2.

Перегонка – розділення суміші летких речовин, що мають різну температуру кипіння, на окремі компоненти або фракції шляхом часткового випаровування та наступної конденсації пари. Ректифікація – багаторазова перегонка в протиточному потоці рідини і пари. В результаті тепломасообміну між компонентами на контактних пристроях (тарілках) пара, що піднімається вгору по ректифікаційній колоні, збагачується спиртом, а рідина, що опускається донизу, збіднюється. Шляхом ректифікації (багаторазового випаровування і конденсації) при атмосферному тиску можна досягнути максимальної концентрації етанолу – 97,2 об. %. На цьому процес отримання біоетанолу закінчується.

Найбільш простим способом отримання спирту із зрілої браги є здійснення його перегонки за допомогою дистилятора (рис. 4.4).

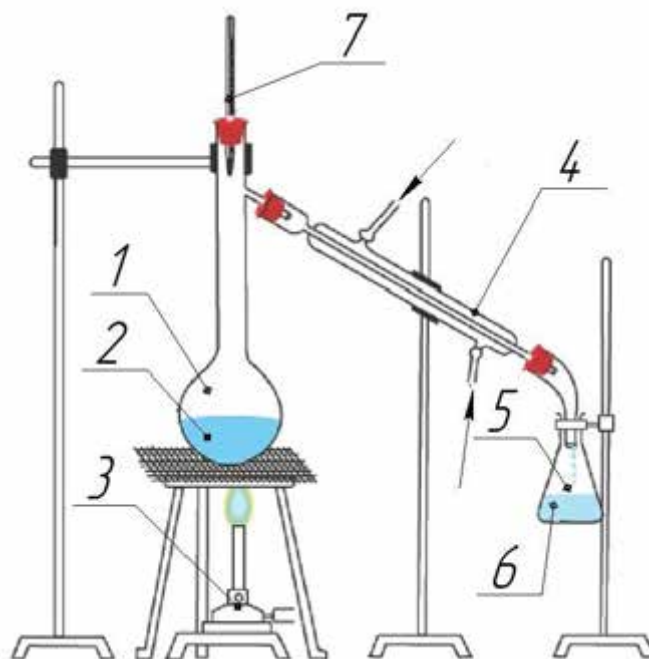


Рис. 4.4. Найпростіший дистилятор

Дистилятор складається з випарної ємності 1 і конденсатора-охолоджувача 4, які з'єднані між собою похилим патрубком. Ємність заповнена зрілою брагою 2, нагрівання якої здійснюється нагрівачем 3. Через конденсатор-охолоджувач постійно протікає охолоджуюча вода (показана стрілками). Для зручності роботи з дистилятором у вертикальній частині патрубку може бути встановлений термометр 7, який реєструє температуру пари, що прямує на конденсацію. Отриманий дистилят 6 стікає в приймальну ємність 5.

Спрощена промислова схема виробництва біоетанолу приведена на рис. 4.5.

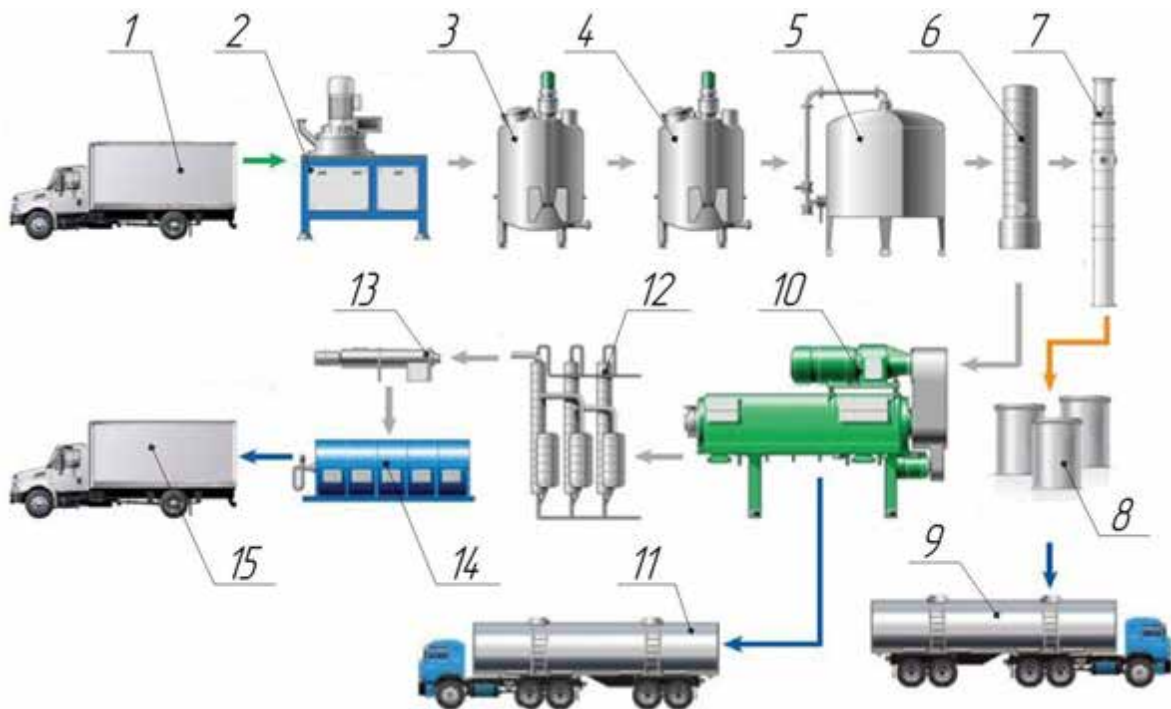
Зневоднення і денатурація. Порівняно з питним спиртом, технологічний процес отримання біоетанолу не вимагає високого очищення від супутніх домішок але доповнюється стадіями зневоднення (спирт міцністю 96%, проходить систему молекулярних сит, де позбавляється від залишкової кількості води і стає абсолютним етанолом) і денатурації (додавання до біоетанолу бензину в кількості від 2 до 5%, що робить його непридатним до споживання).

4.4. Технологічні схеми виробництва біоетанолу

Один із варіантів технологічної схеми виробництва спирту представлений на рис. 4.6. Технології виробництва біоетанолу залежать від вибраної сировини. Однак всі вони, як правило, включають наступні етапи:

1. Підготовка сировини.
2. Екстракція цукру або гідроліз (оцукрювання) сировини.

3. Ферментація (зброджування) оцукреної маси.
4. Дистиляція (перегонка) браги
5. Очищення (ректифікація) спирту.

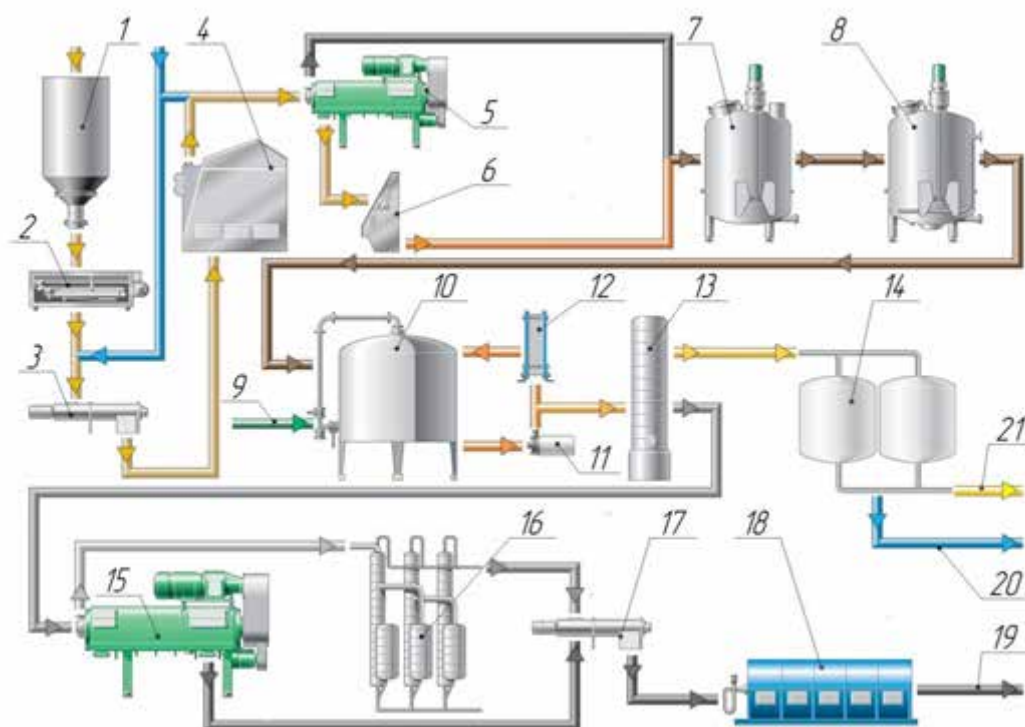


1 – постачання сировини, 2 – подрібнення, 3 – приготування замісу, 4 – оцукрювання, 5 – зброджування, 6 – дистиляція, 7 – ректифікація, 8 – зберігання біоетанолу, 9 – транспортування біоетанолу, 10 – розділення барди, 11 – транспортування рідкої барди, 12 – випаровування вологи, 13 – гомогенізація, 14 – сушіння барди, 15 – транспортування сухої барди
Рис. 4.5. Спрощена схема виробництва біоетанолу

Спочатку сировина рівномірно подрібнюється, що прискорює переробку. Наступний етап технологічного процесу суспендування і оцукрювання. Суспендування й оцукрювання – це перетворення полісахариду крохмалю у придатні для зброджування дріжджами моноцукри. В процесі суспендування за рахунок додавання води отримують суспензію. Потім суспензію нагрівають парою у спеціальному апараті - розварювачі, де крохмаль під дією альфа-амілазних ферментів зріджується. Під дією амілолітичних ферментів крохмаль перетворюється на розчин олігоцукрів. Цей гідролізований крохмаль піддається подальшій переробці – оцукрюванню, у ході якої глюкоамілазні перетворюють декстрин у придатну для зброджування глюкозу.

Наступна стадія – ферментація чи зброджування. На цьому етапі частина оцукреного суслу подається в дріжджогенератор. Інша частина оцукреного суслу з апарату-оцукрювача змішується з активованою дріжджовою біомасою в бродильному апараті. Процес бродіння триває від 48 до 60 годин, причому перемішування забезпечує оптимальний контакт дріжджів із цукрами, а регулювання температури й вмісту поживних речовин підтримує необхідну

швидкість збродження. В процесі бродиння цукри сусли зброджуються до етанолу і вуглекислого газу. Отримана в результаті бродиння, так звана культуральна, рідина містить до 10% етанолу.



1 – бункер для сировини, 2 – дозатор, 3 – змішувач, 4 – агломератор, 5 – серпаратор, 6 – промивач клейковини, 7 – ємкість для суспендування, 8 – ємкість для оцукрювання, 9 – дріжжі, мінеральні солі, 10 – ємкість для збродження, 11 – насос, 12 – пластинчастий теплообмінник, 13 – дистиляційна колона, 14 – молекулярне сито, 15 – сепаратор, 16 – випарювач, 17 – змішувач, 18 – сушарка, 19 – кормові дріжжі, 20 – вода, 21 – біоетанол

Рис. 4.6. Технологічна схема виробництва спирту із зерно-картопляної сировини

Спиртові дріжджі, які застосовуються для переробки крохмалевмісної сировини, повинні мати високу бродильну активність, швидко і повно зброджувати цукри, а також використовувати інші компоненти поживного середовища в анаеробних умовах, бути стійкими до продуктів реакції, добре протистояти розвитку шкідливої мікрофлори.

Далі в процесах дистиляції і ректифікації відбувається виділення і очищення біоетанолу. Дистиляція починається із бражної колони. В ній із продукту бродиння (культуральної рідини) відганяється суміш етанолу і води. Подальше очищення відбувається в ректифікаційній колоні, де спирт максимально звільняється від води.

Останнім етапом при виготовленні біоетанолу, є процес його зневоднення. Етиловий спирт, на відміну від метилового, утворює з водою азеотроп. В азеотропному стані концентрації спирту в парі і рідині, з якої

утворюється ця пара, збігаються. Для етилового спирту і води це відповідає 97,2 об. % за атмосферного тиску.

Найбільше промислове значення має зневоднення за допомогою адсорбції на молекулярних ситах. Низька собівартість молекулярних сит, простота їх обслуговування і невисокі енергетичні витрати дозволяють значно спростити процес зневоднення спирту.

Кінцевий продукт (біоетанол) направляється на зберігання, а потім споживачам. На етапі дистиляції утворюється основний відхід виробництва біоетанолу – післяспиртова барда, яка спочатку направляється на декантурацію, де відбувається її поділ на рідку і тверду фракції. Рідка відсепарована фракція надходить на випарну установку для видалення надлишкової вологи і отримання концентрованого сиропу. Післяспиртова барда переробляється для одержання кормових дріжджів або біогазу.

4.5. Отримання біоетанолу із целюлозовмістних матеріалів

Целюлозовмістні (або, як їх часто називають, лігноцелюлозні) субстрати сьогодні найпоширеніші поновлювані органічні сполуки. Щорічно на одного жителя планети утворюється близько 20-25 т целюлози.

Для країн з помірним кліматом, які володіють великими лісовими масивами, дешевою сировиною для великотоннажного виробництва біоетанолу служить деревина.

Деревина може використовуватися як сировина за умови руйнування структурних зв'язків лігніну з целюлозою та гідролізом останньої, тобто потрібна певна хімічна або біохімічна попередня обробка. Це стримує певним чином широке використання деревини для отримання спиртів.

Деревина – це продукт біологічного, а саме рослинного походження. Як будь-який біологічний організм, деревина складається з клітин. Клітинні стінки приблизно на 99% складаються з органічних сполук. Мінеральні речовини становлять зазвичай не більше 1%.

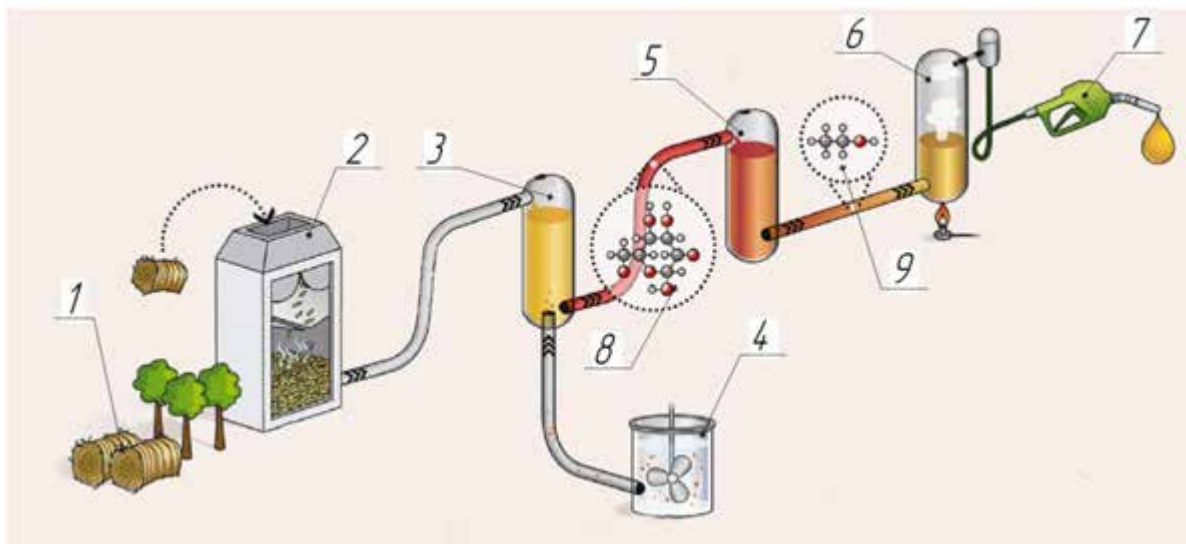
Так як клітковина при гідролізі дає глюкозу, а глюкозу, як відомо, можна перетворити на етанол, то спирт можна одержувати шляхом хімічної переробки целюлозомістких матеріалів. За одним із способів, отримання етилового спирту із целюлозомістких матеріалів здійснюється наступним чином: в гідролізному апараті з сірчаною кислотою нагрівають деревні відходи, наприклад тирсу і тріску. Клітковина при цьому гідролізується до глюкози. Сірчану кислоту потім нейтралізують вапняним розчином з утворенням осаду (CaSO_4), який потім відокремлюють. Отриманий розчин глюкози піддають бродінню у чанах в присутності дріжджів. Після бродіння розчин відокремлюють від дріжджів і в ректифікаційних колонах відганяють з нього спирт; дріжджі направляють знову в бродильний чан. На заключному етапі розчин проходить стадії зневоднення та денатурації.

Технологія отримання спирту шляхом зброджування деревних гідролізатів досить енергоємна (на стадії гідролізу) і потребує використання іржостійкого устаткування (основна перешкода її широкого використання в

практиці). Економічність і ефективність виробництва може бути досягнута тільки при великих обсягах продукції.

Великі перспективи для використання целюлози як сировини для отримання найрізноманітніших продуктів відкриває ферментативний гідроліз, здійснюваний комплексами целлюлаз і гемицеллюлаз, які продукуються деякими грибами і бактеріями. Такий гідроліз протікає при температурі від 40 до 60°C і рН від 4 до 7, не вимагає великих енерговитрат та іржостійкого устаткування.

Останнім часом набуває поширення ензиматичний метод (рис. 4.7). Тут гідроліз відбувається під дією ензимів (наприклад *Trichoderma viride*). Попередня обробка включає в себе усування лігнінової оболонки за допомогою спеціального обробітку із застосуванням розчиннику кадоксену (розчин із 5-7% вмістом оксиду кадмію та 28% етилендіаміну) та обробку рідким аміаком під високим тиском, котрий руйнує волокна у целюлозі, полегшуючи проникнення ензимів. Таким способом вдається досягти практично стовідсоткової переробки целюлози.



1 – целюлозовмісна сировини, 2 – попередня обробка, 3 – гідроліз під дією ензимів, 4 – підготовка ензимів, 5 – ферментація, 6 – дистиляція, 7 – використання біоетанолу, 8 – структура молекули глюкози, 9 – структура молекули біоетанолу

Рис. 4.7. Спрощена схема ензиматичного методу виробництва біоетанолу

Щоб розширити можливості застосування деревини для отримання біоетанолу інтенсивно розроблюються різні технології деструкції лігноцелюлози: механічні (розмелювання), фізичні (гамма-опромінення), фізико-хімічні (паровий вибух, або парокрекінг), хімічні (гідроліз), біологічні (ферментативний гідроліз) та різні комбінації перерахованих методів. До найбільш перспективних слід віднести поєднання парокрекінгу з ферментативним гідролізом, коли сировина обробляється паром при високій температурі та високому тиску. При цьому відбувається вибух кристалічних

структур та відділення лігніну від целюлози з подальшим гідролізом клітковини целюлозолітичними ферментами.

Впроваджуються у виробництво також технології отримання біоетанолу з морських водоростей. В таких процесах модифіковані бактерії безпосередньо конвертують бурі водорості в етанол за рахунок перетворення полісахариду - альгінової кислоти (альгінату), який у великій кількості міститься у водоростях.

4.6. Технічна реалізація виробництва біоетанолу

Технічне забезпечення виробництва біоетанолу подібне до забезпечення виробництва етанолу (рис. 4.8). Одним із основних елементів технологічної лінії виробництва є дистиляційні чи ректифікаційні колони. Принцип дії таких колон однаковий, тільки дистиляційні колони використовують для відділення біоетанолу, а ректифікаційні для його очищення.



Рис. 4.8. Завод із виробництва біоетанолу

Ректифікаційна (дистиляційна) колона (рис. 4.9) – технологічний апарат, призначений для розділення рідких сумішей, складові яких мають різну температуру кипіння. Класична колона являє собою вертикальний циліндр з контактними пристроями всередині. У ректифікаційні колони подаються пари рідин, що переганяються. Вони піднімаються знизу, а в режимі протитечії назустріч парам йде рідина, яка конденсується нагорі в холодильнику. У випадку, якщо речовина складається з двох компонентів, кінцевими продуктами є дистилят, що виходить з верхньої частини колони і кубовий залишок (менш летючий компонент у рідкому вигляді, що виходить з нижньої частини колони).

Ректифікаційні установки за принципом дії поділяються на періодичні та безперервні. В установках безперервної дії колективна сира суміш надходить в колону і продукти поділу виводяться з неї безперервно. В установках періодичної дії суміш, яку поділяють, завантажують в куб і ректифікацію проводять до одержання продуктів заданого кінцевого складу.



Рис. 4.9. Загальний вигляд ректифікаційної колони та багатоколонного дистилятора

Промислові ректифікаційні колони можуть досягати 60 метрів у висоту і 6 метрів у діаметрі. У ректифікаційних колонах в якості контактних пристроїв застосовуються тарілки, які дали назву хімічному терміну, і насадки. Насадка, що заповнює колону, може бути металева, керамічна, скляна та інші. Конденсація здійснюється на поверхні цих елементів.

Важливим елементом виробництва біоетанолу є його зневоднення для уникнення розшаровування при змішуванні з бензином. Для зневоднення можливе використання молекулярних сит (адсорбентів) – це найсучасніша низькоенергетична технологія зневоднювання. В цій технології перегріта суміш пари етанолу і води проходить через шар цеоліту, тобто пористого матеріалу з дуже точно витриманим розміром пор. Молекули етанолу трохи більше розміру пор і затримуються в порах електростатичними силами. У той же час менші молекули води проходять крізь молекулярні сита, не затримуючись. У результаті утворюється безводний біоетанол. Дифузійне випарювання – це ще один метод осушування, у якому застосовуються гідрофільні мембрани. З одного боку мембрани створюється вакуум. У силу розходження дифузійного опору й парціального тиску етанолу і води відбувається розділення цих речовин на мембрані. Вода проходить крізь неї, а зневоднений етанол залишається. Для зневоднення також використовується азеотропна перегонка. У азеотропних

установках у суміш спирту й води додається розділюючий агент, що утворює азеотроп з етанолом або водою. Потім у регенераційній колоні цей азеотроп розділяється на розділюючий агент і компонент вихідної суміші.

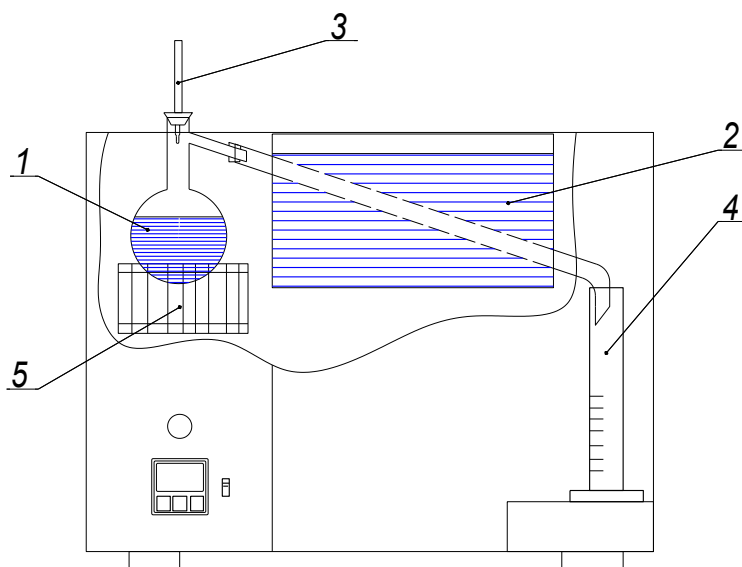
Таким чином, технічне забезпечення виробництва біоетанолу постійно удосконалюється в напрямку підвищення продуктивності, зменшення енергомісткості та підвищення якості отриманої продукції.

Лабораторна робота 4: Визначити вміст біоетанолу в складі сумішевого бензину А-95 біо.

Мета роботи: Ознайомитись із конструкцією апарату АРНС-1М для фракційного поділу нафтопродуктів та визначити вміст біоетанолу в паливній суміші бензину А-95 біо.

Прилади та обладнання: Апарат АРНС-1М для фракційного поділу нафтопродуктів, колба Вюрца, мірні циліндри.

Апарат АРНС-1М (рис. 4.10) призначений для фракційного поділу нафтопродуктів та використовується в якості лабораторного обладнання для визначення фракційного складу палив. Його основні технічні характеристики наведено у таблиці 4.4.



1 – колба Вюрца; 2 – холодильник; 3 – термометр; 4 – мірний циліндр; 5 – ТЕН електричний

Рис. 4.10. Схема апарату фракційного поділу нафтопродуктів АРНС-1М

Таблиця 4.4. Основні технічні параметри та характеристики

Показник, одиниця виміру	Значення
Температурний діапазон розділення нафтопродуктів, °С	0-400
Похибка вимірювання температури, °С	±5
Діапазон регульованої потужності нагріву, %	0-100

При роботі апарату АРНС-1М паливо поступово нагрівається в колбі Вюрца та випаровується, після чого пари надходять у холодильник де конденсуються. Після цього рідина збігає із холодильника та накопичується в мірному циліндрі.

Спочатку в мірний циліндр відбирають $V_3=100$ мл проби бензину А-95 біо та переливають у колбу для перегонки, спостерігаючи за тим, щоб жодна крапля рідини не потрапила в паровідвідну трубку. Колбу встановлюють на нагрівний елемент і регулюючи вертикальну висоту, виставляють таким чином, щоб паровідвідна трубка за допомогою пробки, через яку вона проходить, щільно з'єднувалася із трубкою холодильника. Паровідвідна трубка повинна входити в трубку холодильника на відстань від 25 до 50 мм. Через отвір щільно прилягаючої пробки в горловину колби встановлюють термопару таким чином, щоб вона розміщувалася по центру горловини колби, а її нижній кінець знаходився на одному рівні з нижньою точкою внутрішньої стінки паровідвідної трубки. Мірний циліндр розміщують під нижній кінець трубки холодильника з таким розрахунком, щоб кінець трубки холодильника знаходився в центрі циліндра і входив в нього на відстань не більше 25 мм, але й не нижче відмітки 100 см^3 . Після цього щільно закривають циліндр шматком фільтрувального паперу або іншим аналогічним матеріалом. За допомогою нагрівача поступово нагрівають рідину витримуючи температурні режими роботи холодильника ($0-4^\circ\text{C}$) і одночасно ведуть спостереження за температурою нагрівання та кількістю палива, що переганяється. При досягненні температури парів на рівні 78°C фіксують кількість палива, що знаходиться у мірному циліндрі V_{II} . Після досягнення температури 79°C , перегонку палива завершують, фіксують при цьому кінцеве значення кількості палива V_K у мірному циліндрі. Враховуючи, що температура кипіння біоетанолу становить $78,3^\circ\text{C}$, різниця між початковим та кінцевим значенням об'єму палива в мірному циліндрі, буде становити об'єм біоетанолу в зразку палива, що досліджувався.

Результати вимірювань та розрахунків заносять у табл. 4.5.

Таблиця 4.5. Результати вимірювання вміст біоетанолу в складі сумішевого бензину

Показник	Позначення	Значення
Об'єм палива перегнаного до 78°C , мл	V_{II}	23
Об'єм палива перегнаного до 79°C , мл	V_K	35,5
Об'єм біоетанолу, мл	V_{BE}	12,5
Вміст біоетанолу в паливі, %	–	12,5

Об'єм біоетанолу в зразку палива, що досліджувався становить:

$$V_{BE} = V_K - V_{II} = 35,5 - 23 = 12,5 \text{ мл} \quad (1)$$

Відношення отриманого об'єму біетанолу до початкового об'єму зразка палива, буде становити вміст біетанолу в даному паливі:

$$k_{BE} = \frac{V_{BE}}{V_3} 100\% = \frac{12,5}{100} 100\% = 12,5\% \quad (2)$$

Таким чином, експериментально встановлено, що в досліджуваному зразку палива вміст біетанолу становить 12,5%.

Практична робота 4: Розрахувати техніко-економічні показники виробництва біетанолу та визначити обсяги сировини й необхідну площу для повного заміщення бензину, що споживається в аграрному виробництві.

Вихідні дані: Сировина для виробництва біетанолу – кукурудза, урожайність $U = 7$ т/га; вартість зерна кукурудзи $C_K = 2700$ грн./т, ціна біетанолу $C_{BE} = 15$ грн./кг; ціна бензину $C_B = 15,35$ грн./л; річні обсяги використання бензину в аграрному виробництві $P_B = 152$ тис. т., нижча теплотворна здатність бензину $Q_B = 42$ МДж/кг; нижча теплотворна здатність біетанолу $Q_{BE} = 27$ МДж/кг; густина біетанолу $\rho_{BE} = 0,8$ кг/м³. Показники процесу виробництва біетанолу необхідні для проведення розрахунків наведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6. Показники процесу виробництва біетанолу із зерна кукурудзи

Показник	Позначення	Значення
Витрата води на замішування сировини л/кг	Q_B	3
Витрата дріжджів по відношенню до обсягу замісу, %	q_D	8
Вміст спирту у бражці, %.	q_{BE}	13
Частка виробничих витрат віднесена до ціни сировини, від. од.	k_{BV}	0,5
Витрата бензину на денатурацію спирту, %	q_B	3

Розрахунки виконуються в наступному порядку. Спочатку розраховується технологічна потреба в воді для замішування подрібненого в муку зерна кукурудзи при виробництві біетанолу із розрахунку на $m_C = 1$ тону сировини:

$$V_B = m_C Q_B = 1000 \cdot 3 = 3000 \text{ л/т.}$$

Враховуючи, що при приготуванні замісу подрібнене в муку зерно повністю розчиняється у воді, приймаємо, що об'єм замісу дорівнює об'єму води затраченої на його формування. Далі отриманий заміс піддають термоферментативній обробці та процесу оцукрювання, в результаті якого отримують сушло, об'єм якого рівний об'єму замісу, тобто $V_c = V_B$.

Потреба у виробничих дріжджах для зброджування отриманого сушла визначається наступним чином:

$$V_D = V_c q_D = 3000 \cdot \frac{8}{100} = 240 \text{ л.}$$

Після змішування замісу із дріжджами утворюється сусло яке піддають зброджуванню упродовж певного часу, в результаті чого утворюється зріла бражка об'ємом:

$$V_{BP} = V_C + V_D = 3000 + 240 = 3240 \text{ л.}$$

Вихід біоетанолу становитиме:

$$V_{BE} = V_{BP} \frac{q_{BE}}{100} = 3240 \frac{13}{100} = 421 \text{ л.}$$

Побічним продуктом виробництва біоетанолу є барда, яку можна використовувати на кормові цілі при відгодівлі худоби або направляти на метанове зброджування з метою отримання біогазу. Вихід барди після виробництва біоетанолу становить:

$$V_{BAP} = V_{BP} \left(1 - \frac{q_{BE}}{100} \right) = 3240 \left(1 - \frac{13}{100} \right) = 2819 \text{ л.}$$

Вартість кукурудзи в ціні біоетанолу:

$$B_C = \frac{Ц_K}{V_{BE} \cdot \rho_{BE}} = \frac{2700}{421 \cdot 0,8} = 8,02 \text{ грн./кг.}$$

Орієнтовна собівартість виробництва біоетанолу із зерна кукурудзи:

$$C_{BE} = (1 + k_{BB}) B_C = (1 + 0,5) \cdot 8,02 = 12,03 \text{ грн./кг.}$$

Прибуток від виробництва біоетанолу із зерна кукурудзи:

$$П = Ц_B - C_{BE} = 15 - 12,03 = 2,97 \text{ грн./кг.}$$

Рентабельність виробництва біоетанолу із зерна кукурудзи:

$$P = \frac{П}{C_{BE}} = \frac{2,97}{12,03} 100\% = 24,69\%.$$

Вихід біоетанолу із одного гектара площі під кукурудзою:

$$V_{BE}^S = UV_{BE} = 7 \cdot 421 = 2947 \text{ л.}$$

Потреба в бензині для виконання денатурації біоетанолу отриманого з одного гектара кукурудзи:

$$V_B = V_{BE}^S q_B = 2947 \cdot \frac{3}{100} = 88,41 \text{ л.}$$

Вартість бензину для проведення денатурації отриманого етанолу із одного гектара кукурудзи:

$$B_B = V_B Ц_B = 88,41 \cdot 15,35 = 1357,1 \text{ грн.}$$

Потреба в біоетанолі для заміщення бензину в аграрному виробництві України:

$$П_{BE} = \frac{П_B Q_B}{Q_{BE}} = \frac{152 \cdot 42}{27} = 236,445 \text{ тис. т/рік.}$$

Потреба в зерні кукурудзи та площі під її вирощування для повного заміщення біоетанолом бензину в аграрному виробництві:

$$m_{зк} = \frac{P_{БЕ} \cdot 10^6}{V_{БЕ} \cdot \rho_{БЕ}} = \frac{236,445}{421 \cdot 0,8} 10^6 = 702034 \text{ т/рік.}$$

$$S_K = \frac{m_{зк}}{У} = \frac{702034}{7} = 100291 \text{ га.}$$

Таким чином проведені розрахунки показали, що при переробці зерна кукурудзи із однієї тонни зерна отримуємо 421 л біоетанолу та 2819 л барди, Рентабельність виробництва біоетанолу із зерна кукурудзи без врахування реалізації барди становить 24,69%. Вихід біоетанолу із одного гектара кукурудзи становить 2947 л., а для повного заміщення бензину в аграрному виробництві необхідно переробити на біоетанол 702034 т кукурудзи.

Запитання для самоконтролю:

1. Яку речовину називають біоетанолом?
2. Дайте характеристику біоетанолу?
3. Чим відрізняється біоетанол від етанолу?
4. Вкажіть основні етапи технологічного процесу виробництва біоетанолу.
5. Для чого потрібне зневоднення біоетанолу?
6. Який вихід біоетанолу із основних сільськогосподарських культур?
7. Що являє собою дистиляційна колона?
8. Що являє собою ректифікаційна колона?
9. Опишіть технологію отримання біоетанолу із крохмлевмісної сировини.
10. Опишіть технологію отримання біоетанолу із цукровмісної сировини.
11. Опишіть технологію отримання біоетанолу із цюлолозовмісної сировини.
12. В чому сутність технології отримання біоетанолу із водоростей?
13. Які способи зневоднення біоетанолу Ви знаєте?
14. Що таке молекулярне сито?
15. Які країни є лідерами у виробництві біоетанолу?
16. Назвіть основні напрямки використання біоетанолу.
17. Для чого потрібна підготовка сировини при виробництві біоетанолу?
18. Як проходить зброджування сировини при виробництві біоетанолу?
19. Розкрийте сутність технологічного процесу оцукрювання сировини.
20. Розкрийте сутність ензиматичного методу виробництва біоетанолу.
21. З якою метою подрібнюють зерно при виробництві біоетанолу?
22. Які шляхи зменшення витрати води при приготуванні замісів?
23. Опишіть технологічну схему виробництва спирту із крохмалевмісної сировини?

Література:

1. Альтернативна енергетика: навч. посіб. для студентів вищих навчальних закладів / [М.Д. Мельничук, В.О. Дубровін, В.Г. Мироненко,

І.П. Григорюк, В.М. Поліщук, Г.А. Голуб, В.С. Таргоня, С.В. Драгнєв, І.В. Свистунова, С.М. Кухарець]. – К.: Аграр Медіа Груп, 2012. – 244 с.

2. Голуб Г.А Інвестиційна привабливість виробництва і використання дизельного біопалива / Г.А. Голуб, С.В. Лук'янець // Економіка АПК. - 2013. - № 2. - С. 54-61.

3. Кириленко І.Г. Формування ринку українського біопалива: передумови, перспективи, стратегія / І.Г. Кириленко, В.В. Дем'янчук, Б.В. Андрющенко // Економіка АПК. – 2010. – № 4. – С. 62.

4. Коденська М.Ю. Обґрунтування необхідності розробки інвестиційних проектів у розвиток біоетанолової галузі на базі продукції цукровобурякового виробництва / М.Ю. Коденська. – К.: ННЦ «ІАЕ», 2010. – 12 с.

5. Красінько В.О. Біоенергетика та охорона довкілля: конспект лекцій для студ. спец. 7.05140101 «Промислова біотехнологія» / В.О. Красінько /. - К.: НУХТ, 2013. – 88 с.

6. Месель-Веселяк В.Я. Ефективність альтернативних видів енергії в сільському господарстві України / В.Я. Месель-Веселяк, В.С. Паштецький // Економіка АПК. – 2011. – № 12. – С. 3-9.

7. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Под ред. Ю. И. Дытнерскоо. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Химия, 1991. – 494 с.

8. Скорук О.П. Пріоритетні напрями виробництва біоетанолу в Україні / О.П. Скорук, І.В. Зубар // Економіка АПК. - 2014. - № 2. - С. 36-42.

9. Соловей О.І. Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії [Навчальний посібник] / О.І. Соловей, Ю.Г. Лега, В.П. Розен та інші; [За заг. ред. О.І. Солов'я] - Черкаси: ЧДТУ, 2007. – 490 с.

10. Бейли Дж. Основы биохимической инженерии / Дж. Бейли, Д. Ол-лис. – М.: Мир, 1989. – Т. I. – 692 с.; Т. II. – 590 с.

11. Теоретические основы биотехнологии древесных композитов. – Т. 2. Ферменты, модели, процессы / А.В. Болобова [и др.]. – М.: Наука, 2002. – 354 с.

12. Дебабов В.Г. Биотопливо / В.Г. Дебабов // Биотехнология. – 2008. – № 31. – С. 1–14.

13. Технология спирта и спиртосодержащих продуктов / В.В. Ильинич [и др.]. – М.: Агропромиздат, 1987. – 383 с.

14. Маринченко В.А. Спиртовые дрожжи в промышленном производстве спирта / В.А. Маринченко. – М.: Наука, 1999. – 230 с.

15. Нетрусов А.И. Микробиология / А.И. Нетрусов, И.Б. Котова. – М.: Академия, 2006. – 352 с.

16. Рабинович М.Л. Производства этанола из целлюлозосодержащих материалов: потенциал российских разработок / М.Л. Рабинович // Прикладная биохимия и микробиология. – 2006. – Т. 42, № 1. – С. 5–32.

17. Синицин А.П. Биоконверсия лигноцеллюлозных материалов / А.П. Синицин, А.В. Гусаков, В.М. Черноглазов. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 224 с.

18. Технологии гидролизных производств / В.И. Шарков [и др.]. – М.: Лесная промышленность, 1973. – 408 с.

5. ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ БІОЕТАНОЛУ

5.1. Основні властивості біоетанолу як моторного палива

Біоетанол є одним з відновлюваних джерел енергії для двигунів внутрішнього згорання з іскровим запаленням.

Основні фізико-хімічні властивості біоетанолу в якості моторного палива наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 Основні властивості біоетанолу, який використовується в якості моторного палива у порівнянні з бензином

Властивість	Од. виміру	Вид палива	
		бензин	біоетанол
Щільність при 20°C	кг/м ³	740	810
Нижча теплотворна здатність	МДж/кг	43,3-44,0	25,0-26,8
	МДж/л	32,50	20,25
Калорійність стехіометричної суміші	кДж/м ³	3439-3910	3850
Теплота пароутворення	кДж/кг	330	850
Температура кипіння	°С	30-205	78
Температура спалаху	°С	230-260	404
Стехіометрична потреба повітря в процесі згорання	кг. пов./кг пал.	14,9	9
Октанове число:			
– по моторному методу	–	82-84	94
– за дослідницьким методом	–	92-100	108
Цетанове число	-	3-14	8
Температура полум'я в повітрі	°С	2062-2197	1962

Аналіз фізико-хімічних властивостей дає можливість стверджувати, що через меншу теплотворну здатність біоетанолу, при його використанні в чистому вигляді у порівнянні з бензином, витрата палива зростає на величину близько 70%. Вища теплота пароутворення вказує, що у порівнянні з бензином, при випаровуванні однакової кількості палива, необхідно підвести більше ніж у два рази теплоти для випаровування, тому запустити двигун при температурах навколишнього середовища меншій за 10°C, при використанні чистого біоетанолу, досить складно. Менша теплота згорання та кількість повітря, необхідна для згорання, вказує на необхідність серйозних змін налаштувань системи подачі палива та повітря при використанні біоетанолу в чистому вигляді. У цьому випадку подачу палива необхідно збільшити, а оскільки теплота пароутворення значно більше ніж у бензину, необхідно змінити величину кута запалювання. Високе октанове число біоетанолу дозволяє підвищити ступінь стиснення в циліндрах на величину від 12 до 14 відн. од. та збільшити при цьому потужність двигуна не змінюючи його об'єму. Високе октанове число дозволяє використовувати біоетанол для

приготування суміші дешевого низькооктанового бензину і, що не менш важливо, позбутися застосування отруйних антидетонаторів, таких як тетраетилсвінець, бензол, толуол, вуглеводні з бічними ланцюгами, метилтретбутиловий ефір, сполуки марганцю і т.д.

Виходячи із властивостей біоетанолу можна сформулювати його основні переваги при використанні в якості моторного палива:

- нульовий баланс CO₂;
- широка сировинна база для його виробництва;
- невисока вартість виробництва у порівнянні з бензином;
- нетоксичний та розчинний у воді, тому не викликає забруднення ґрунту та ґрунтових вод;
- не містить сірки;
- відсутня детонація;
- пари біоетанолу розсіюються швидше, ніж пари бензину і вони менш вогнебезпечні через більш високі показники температури самозаймання;
- розроблені й успішно застосовуються автомобілі з двигунами FFV «flexible-fuel vehicles», що працюють на E100 – азеотропа етанолу (96 % спирту і 4 % води).

Переваги біоетанолу при використанні в якості добавки до бензину:

- підвищує детонаційну стійкість бензину (кожні 3% біоетанолу, який додається, збільшують октанове число бензину на величину від 1 до 1,5 од.);
- при розливі бензину, присутній в ньому біоетанол розкладається природним чином швидше інших складових, не завдаючи шкоди навколишньому середовищу;
- наявність кисню в складі молекули біоетанолу сприяє більш повному згоранню;
- при наявності 10% вмісту біоетанолу в бензині скорочуються вихлопи аерозольних часток до 50%, викиди чадного газу – на 30%, а викиди летючих органічних сполук – більш ніж на 25%;
- знижуються викиди оксидів азоту;
- робота звичайного автомобільного ДВС на сумішевому паливі з 10% біоетанолу не вимагає зміни конструкції двигуна;
- на сьогодні розроблено ряд паливних сумішей біоетанолу для ДВЗ: E5, E7, E10; E85, E95 (буква "E" від англійського Ethanol).

До недоліків використання біоетанолу необхідно віднести:

- нижча теплотворна здатність біоетанолу, що зумовлює більш високі витрати палива;
- підвищення тиску насиченої пари палива збільшує ймовірність утворення парових пробок у паливній системі;
- підвищені викиди альдегідів і випаровування вуглеводневих сполук (у середньому викиди альдегідів при роботі на спиртах приблизно в 2-4 рази вищі, ніж при роботі двигуна на бензині);
- використання паливних сумішей із вмістом біоетанолу більше 10% потребує внесення суттєвих змін в конструкцію двигуна;

- низька фазова стабільність суміші бензину з біоетанолом (не виключено розшарування при зберіганні);
- чинить негативний вплив на гумовотехнічні вироби та металеві матеріали в системі паливоподачі;
- необхідна організація автономної системи перекачування і зберігання спиртовмісних бензинів, яка б повністю виключала контакт палива з водою.

5.2. Світовий досвід використання біоетанолу

Придатність біоетанолу як енергоносія, в тому числі і як палива для карбюраторних двигунів внутрішнього згорання, була встановлена відразу ж після появи перших автомобілів. У 1979 році комісія ООН запропонувала широке застосування біоетанолу в якості палива, як спосіб зниження залежності від нафти. Відсоток вмісту біоетанолу в моторному паливі позначається літерою «Е», наприклад Е85 – суміш з 85% біоетанолу та 15% бензину.

У 1980 році в США було вироблено біля 9,2 млн. тонн біоетанолу і створено більше 1000 заправних станцій з так званим «газохолом» – сумішшю біоетанолу з бензином (рис. 5.1). Крім Сполучених Штатів, біоетанол як пальне широко використовується в Бразилії, Угорщині, Австрії, Німеччині, Італії, Польщі, Чехії, Словаччині та інших країнах.



Рис. 5.1. Паливна колонка в Іст-Лансінг, штат Мічиган для продажу сумішевого палива марок Е10, Е15, Е30 і Е85.

У Бразилії виробництво біоетанолу із цукро- і крохмалевмісної сировини для використання як пального для автомобілів було розпочато в 1975 році. Значну кількість біоетанолу як добавки до бензину виробляє Індія, яка

забезпечує власні потреби у нафті значною мірою завдяки її імпорту. Індія має надлишки цукрової тростини, зерна, картоплі, що полегшує задачу виробництва біоетанолу. Франція у 1990 році скоротила виробництво пального з нафти вдвічі порівняно з 80-ми роками за рахунок використання біоетанолу. При додаванні 10% біоетанолу до бензину було заощаджено 1,5 млн. тонн нафти. Куба після другої світової війни як пальне для автомобілів використовувала суміш 20 % біоетанолу з бензином.

За даними світових експертів, у світі налічується 575 заводів із виробництва біоетанолу загальною потужністю 80,6 млн. тонн. Завдяки додаванню біоетанолу до бензину, економія нафти у 2010 році, склала 50,7 млн. тонн.

Бразилія та США займають передові позиції, виробляючи разом 87% світового етанолу. У 2010 році Бразилія виробила 26,2 млрд. л, що становило 30,1% всього біоетанолу, спожитого у світі упродовж цього року. Бразильський уряд забезпечив три важливі початкові інструменти для виробництва біоетанолу: гарантовані закупівлі державною нафтовою компанією Petrobras, позики під низькі відсотки для агропромислових фірм, що виробляють біоетанол та фіксовані ціни бензину та біоетанолу, за якими біоетанол продають за 59% вартості бензину. Для безперебійного збуту біоетанолу в 1979 році урядом було заплановано до 1981 року випустити 350 тис. автомобілів, що працювали винятково на біоетанолі. Після того, як у кінці 1980-х років кількість автомобілів, які використовують чистий біоетанол, сягнула більше ніж 4 млн. шт., що становило одну третину автопарку всіх транспортних засобів у країні, виробництво біоетанолу та продаж автомобілів, що працюють лише на біоетанолі, знизилися. Ціни на бензин різко знизилась у зв'язку з низькою ціною нафти. Також відчувалась нестача біоетанолу на внутрішньому ринку, через що тисячі автомобілів залишились у середині 1989 року без палива. Уряд Бразилії змушений був розпочати у 1991 році імпорт біоетанолу.

Довіру до транспортних засобів, що працюють на біоетанолі, було відновлено з появою на бразильському ринку автомобілів з "багатопаливним двигуном" (FFV), які здатні використовувати паливо з будь-яким вмістом біоетанолу.

У 2014 році автомобілі з багатопаливними двигунами виробляли такі компанії, як Chevrolet, Fiat, Ford, Peugeot, Renault, Volkswagen, Honda, Mitsubishi, Toyota, Citroen, Nissan, Kia Motors, Volvo та ін.

Автомобілі з багатопаливними двигунами становили 22% від продажу автомобілів в Бразилії у 2004 році, У березні 2009 року кількість їх досягла 10 млн. шт. Нині у Бразилії немає жодного легкового автомобіля, який би використовував чистий бензин.

У США паливний етанол використовується в основному як кисневмісна добавка до бензину та у вигляді суміші з бензином обсягом до 10%, і в меншій кількості у якості палива E85 для автомобілів із багатопаливними двигунами. Уряд США стимулює виробництво біоетанолу упродовж останніх 38 років. Із 1978 по 2004 роки Федеральний уряд запровадив для платників федерального акцизного збору на моторні палива податковий кредит на біоетанол, що домішується до бензину. Із 2005 до 2008 рр. він становив 51 цент за галон

біоетанолу, змішаного з бензином, що складало трохи більше ніж 5% за галон E10. Із 2009 року і до сьогодні податковий кредит було знижено, і нині він становить 45 центів за галон біоетанолу. Однак біоетанол другого покоління, вироблений з целюлозної сировини, отримав податковий кредит у розмірі 1,01 долара за галон. Адміністрацією департаменту захисту навколишнього середовища визначено, що біопаливом другого покоління вважається будь-яке відновлювальне паливо, вироблене з відновлювальної біомаси, життєвий цикл викидів парникових газів яких, порівняно зі звичайним паливом, нижче щонайменше на 60%. Таким чином, традиційний біоетанол, вироблений із зерна кукурудзи, не може отримувати податкового кредиту, але целюлозний біоетанол, вироблений зі стебла та качанів кукурудзи (без насіння) може підпадати під дану пільгу. Виробники стверджують, що у зв'язку зі збільшенням обсягів виробництва біоетанолу із кукурудзи та зростанням попиту на неї підвищується ціна, тому фермери отримують вищі прибутки, а уряд країни заощаджує кошти за рахунок зниження витрат з надання субсидій фермерам за федеральними програмами.

В Європейському Союзі до 2005-го, за встановленими нормами, в бензин додавали 2% біоетанолу, до 2010-го вже 5%, а до 2020-го цей показник планують збільшити до 10%. Але при цьому, відповідно до встановлених норм, у всіх регіонах Євросоюзу має бути гарантована наявність інфраструктури, яка б забезпечувала заправки і поставки бензину без вмісту біоетанолу для неадаптованих транспортних засобів.

5.3. Перспективи використання біоетанолу в Україні

Виробництво біоетанолу в Україні як високооктанової кисневмісної добавки до бензинів було розпочато в 1999 році. Річна сумарна потужність спиртових заводів в Україні – 4,6 млн. т/рік, потреба внутрішнього споживання етилового спирту становить 1,8 млн. тонн, а експорт – 0,6 млн. тонн, коефіцієнт завантаження потужностей становить близько 40%. У 2013 році українські спиртові заводи виробили приблизно 50 тис. тонн біоетанолу.

Упродовж останніх років виробництво біоетанолу та добавок на його основі здійснюється на ДП «Наумівський спиртовий завод», ДП «Гайсинський спиртовий завод», ДП «Лужанський експериментальний завод» та Хоростківському МПД ДП «Укрспирт».

Законодавством передбачено ряд податкових, кредитних та інших пільг щодо виробництва і використання біоетанолу, які вступили в дію з 1 січня 2010 р., а саме звільнення від сплати податку на прибуток упродовж 10 років, звільнення від сплати мита при ввезенні обладнання до 2019 р. та ін.

Водночас багато спиртових заводів працюють з неповним завантаженням або взагалі простоюють. У перспективі потужності цих підприємств можна використати для виробництва біоетанолу з лігніноцелюлози. В Україні можливим також є одночасне виробництво цукру та біоетанолу на цукрових заводах. Виробництво двох важливих продуктів допоможе регулювати обсяги виробництва цукру та біоетанолу залежно від попиту та цін.

При додаванні 5% біоетанолу в бензин що споживається автотранспортом України, потреба ринку біоетанолу становитиме більше 250 тис. тон в рік. Також є можливість отримати квоту на постачання біоетанолу в країни Євросоюзу в розмірі 100 тис. тон біопалива на рік.

В Україні ведуться розробки тракторів здатних працювати на біоетанолі. Прикладом цього може бути багатопаливний трактор, розробку якого виконано спільною лабораторією «Трактор», куди увійшли представники ННЦ «ІМЕСГ», Харківського тракторного заводу і ВАТ «ЗАЗ». За основу була взята модель ХТЗ-2511G (рис. 5.2). Замість стандартного дизельного двигуна на ній був встановлений бензиновий мотор МєМЗ-307м дефорсований – з 70 до 35 к.с. Представлений трактор є багатопаливним, може працювати на бензині, пропан-бутані та біоетанолі.

Для досягнення оптимальних паливно-економічних показників роботи двигуна при застосуванні біоетанолу, необхідно щоб автомобіль був обладнаний двигуном типу FFV. Тобто комп'ютер автомобіля повинен вміти визначати вміст біоетанолу в паливній суміші та автоматично коректувати параметри впорскування палива та робочих циклів.



Рис. 5.2. Багатопаливний трактор ХТЗ- 2511G

5.4. Використання біоетанолу, як палива для двигунів внутрішнього згоряння

Додавання 10% біоетанолу до бензину дозволяє зменшити викиди аерозольних частинок на 50%, а викиди оксиду вуглецю – на 30%. На 2014 рік частка біоетанолу в світовому споживанні моторного палива склала 6%. Найбільшого розповсюдження транспорт на біоетанолі набув в США та Бразилії. Етанол є менш «енергоємним» джерелом енергії, ніж класичне паливо (це стосується тільки сумішей з високим вмістом біоетанолу); пробіг транспорту, що працює на паливі марки Е85 на одиницю об'єму палива складає приблизно 75% від пробігу на бензині. Звичайні двигуни внутрішнього

згоряння не можуть працювати на E85 без конструкційних змін, проте можуть використовувати паливо E10 (суміш 10% біоетанолу і 90% бензину). Щоб автомобіль чи інший транспортний засіб можна було заправляти паливом, що містить більше 10% біоетанолу, необхідна модернізація двигуна. Комп'ютер, що керує впорскуванням палива в двигун повинен визначати концентрацію спирту і підбирати відповідні режими роботи. Оскільки спирт містить воду, модернізації вимагає і паливна магістраль. Крім того, якщо автомобіль експлуатується в холодних умовах, треба підігрівати паливо перед запуском. На чистому етанолі можуть працювати тільки спеціальні двигуни для біоетанолу або двигуни класу «Flex-Fuel» чи FFV, тобто багатопаливні, які можуть також працювати на звичайному паливі.

Багатопаливні двигуни FFV, які могли працювати на біоетанолі стали комерційно доступні в кінці 1990-х років.

У Сполучених Штатах автомобілі на двокомпонентному паливі, також називають "автомобілі на E85". У Бразилії FFV широко відомі як "total flex" або просто "flex" автомобілі. В Європі FFV, також відомі як "Flexi-fuel" авто. Автовиробники, особливо в Бразилії і на європейському ринку, для вказівки в маркуванні моделі FFV застосовують один з варіантів слова «flex». Наприклад "Volvo Flexifuel", або "Volkswagen Total Flex", "Chevrolet FlexPower" або "Renault Hi-Flex". Компанія Форд продає свою модель Focus в Європі, як "Flexifuel", а в Бразилії як "Flex". У США тільки з 2008 року автомобілі з двигуном FFV отримали жовту наклейку на люк бензобака лейблом "E85/Gasoline", щоб відрізнити їх від автомобілів, що працюють тільки на бензині (рис. 5.3).

Із збільшенням вмісту біоетанолу в паливі для досягнення необхідної потужності потрібно подати в двигун більше палива та виконати відповідне корегування подачі повітря.

Автомобілі, що випускаються серійно для роботи на двокомпонентному паливі, використовують два основні принципи:

– у паливну систему (рис. 5.4) встановлюється Ethanol content sensor (сенсор, що визначає вміст етанолу в паливі у %) та на підставі цих даних відбувається корекція паливоподачі (використовується на автомобілях в США, в Європі – Вольво, Сааб, Форд);

– математичне обчислення вміст біоетанолу на підставі корекцій в режимі замкнутого контуру датчика кисню у вихлопних газах (closed loop), однак автомобіль з такою опцією коштує на 800-1000 євро дорожче (використовує компанія PSA Peugeot Citroen).

У світі прийнята наступна класифікація палива на основі біоетанолу. Найбільш поширенні E5, E7, E10 – суміші з низьким вмістом етанолу (5, 7 і 10% за вагою, відповідно). Таке паливо повністю придатне для використання в бензинових двигунах та дозволяє зменшити шкідливість викидів а атмосферу. Варто зазначити, що від 5 до 10% біоетанолу в паливі – це норма для більшості країн цивілізованого світу. Наприклад, у Німеччині паливо E5 продається з 2005 року, а з 2011 року йому на зміну прийшло паливо E10.



Рис. 5.3. Маркування сучасних багатопаливних автомобілів, які приданні для використання біоетанолу

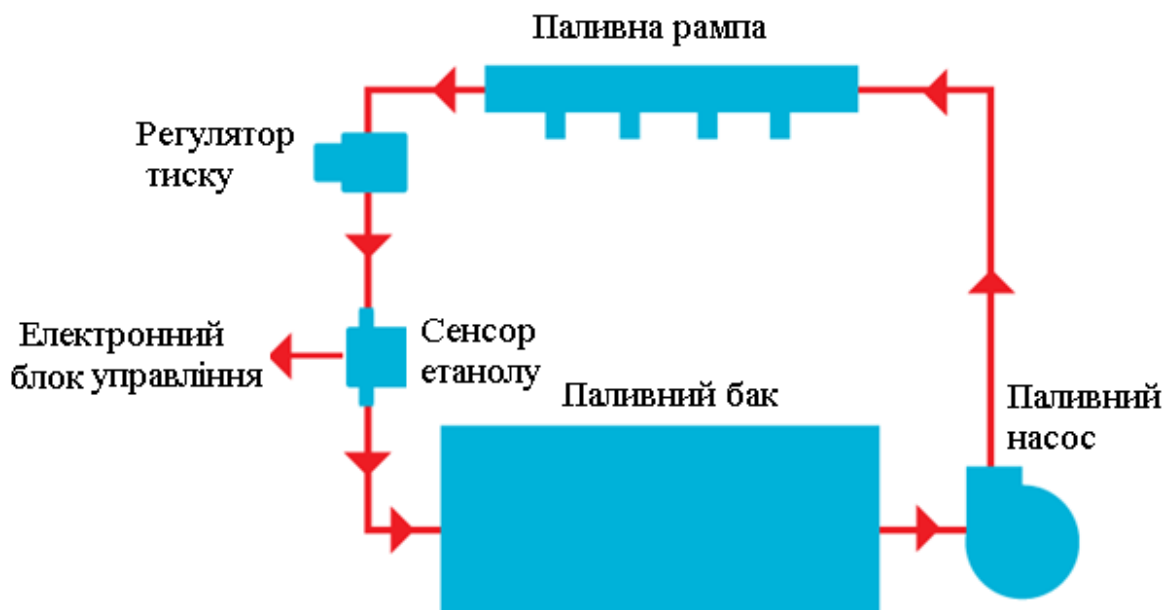


Рис. 5.4. Схема паливної системи FFV "flexible-fuel vehicle" із сенсором етанолу в паливній суміші

Стандартне паливо для автомобілів із двигунами «Flex-Fuel» це E85. Через нижчу енергоємність біоетанол коштує дешевше, ніж бензин чи дизельне паливо. Використовується також паливо E95 – суміш 95% біоетанолу і 5% паливної присадки. Наприклад, компанія Scania (Швеція) серійно виробляє дизельні автобуси та вантажівки, що працюють на 95 % біоетанолі (рис. 5.5 та 5.6).



Рис. 5.5. Автобус, що працює на паливі E95



Рис. 5.6. Біоетанольний двигун Scania потужністю 270 к.с.

У світі також ведуться розробки тракторів, що здатні працювати на біоетанолі. Так фірмою John Deere створено високотехнологічний двигун, який може працювати на різних видах палива, як мінерального, так і біологічного походження і яке може заливатися в бак окремо або в суміші з відповідними пропорціями (рис. 5.7). Декілька датчиків вимірюють різноманітні параметри палива або його суміші. Далі комп'ютер управління (ECU) корегує параметри роботи двигуна до отримання відповідних норм викидів токсичних речовин.

При використанні біоетанолу є деякі ризики. Так, експерти відзначають, що вкрай важливо, щоб біоетанол містив мінімальну кількість води, так як існує теоретичний ризик, що в двигуні суміш розділиться на бензин і водно-спиртові

кульки. Як наслідок, можуть спостерігатися: перевитрата палива, детонація та труднощі із запуском двигуна. Крім того біоетанол – це відмінний розчинник і окислювач, через що в складі бензину (у великій кількості) він може пошкодити ущільнювальні прокладки і інші пластикові деталі. Щоб цього не сталося, в конструкції двигуна необхідно використовувати нержавіючу сталь та стійкий до біоетанолу пластик.



Рис. 5.7. Багатопаливний трактор фірми John Deere

Проте переваги використання біоетанолу незаперечні. Етанол дешевше бензину, а значить, паливо з його вмістом, також дешевше. У суміші бензину і біоетанолу менше сірки, бензолу і інших шкідливих домішок. Відповідно, знижується кількість продуктів згоряння, які ведуть до підвищеного зносу агрегату і окислення мастила. Загалом, моторне масло, двигун, свічки запалювання служать довше. Біоетанол згорає ефективніше, має меншу теплопровідність і високе октанове число. Тому, двигун працює стабільніше, знижується ризик його перегріву, а камера згоряння, випускні клапани циліндрів і інші частини двигуна працюють в більш сприятливих умовах. Двигун менше нагрівається в спеку або в міських заторах. Зниження температури охолоджуючої рідини на виході з двигуна досягає 15-20°C.

5.5. Дослідження роботи двигуна MeM3-245 на паливних сумішах з біоетанолом

Виконані дослідження роботи двигуна MeM3-245 автомобіля ЗАЗ-1102 з додаванням 10% та 20% біоетанолу до бензину А-95 показали, що необхідно виконувати збільшення кута випередження палива (рис. 5.8.). При використанні

сумішей відбувається збільшення годинної витрати палива (рис. 5.9) та спостерігається покращення екологічних показників роботи двигуна (табл. 5.2)

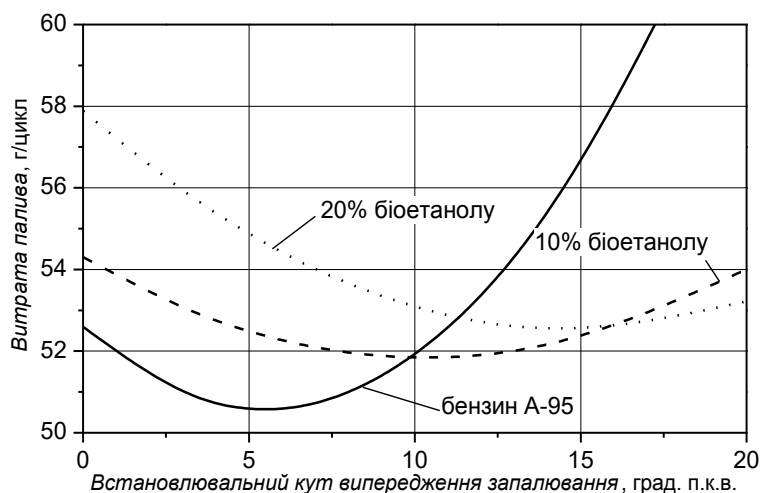


Рис. 5.8. Витрата палива автомобілем ЗАЗ-1102 залежно від кута випередження запалення при використанні бензину А-95 та його сумішей з додавання біоетанолу

Встановлено, що мінімальна витрата бензину А-95 відповідає встановленому куту випередження запалення (ВКВЗ) близько 5 град. повороту колінчастого вала, що рекомендовано заводом-виробником. Мінімальна витрата бензину із 10% добавкою біоетанолу має місце при ВКВЗ близько 10 град., а з 20% – близько 14 град. повороту колінчастого вала.

Аналіз паливних характеристик (рис. 5.9) показав, що при живленні автомобіля ЗАЗ-1102 "Таврія" бензином А-95 із 10% добавкою біоетанолу при штатному ВКВЗ перевитрата палива по відношенню до штатного бензину склала від 2 до 9,3% залежно від швидкісного режиму. У такому ж режимі та із 20% добавкою біоетанолу перевитрата склала від 4 до 10,5%, що викликано зменшенням теплоти згорання бензину з додаванням біоетанолу та погіршенням процесу згорання горючої суміші. Оптимізація ВКВЗ шляхом збільшення значень ВКВЗ на 5 та 9 град. повороту колінчастого вала відносно штатного значення за умови живлення двигуна бензином із 10 та 20% добавками біоетанолу, відповідно, покращує паливну економічність з наближенням значень витрати бензинів з добавками біоетанолу до витрати бензину.

У табл. 5.2 наведено результати паливної економічності та екологічні показники автомобіля ЗАЗ-1102 "Таврія" при використанні бензинів з добавками біоетанолу. Екологічні показники оцінено за масовими викидами оксиду СО та діоксиду СО₂ вуглецю, вуглеводнів С_мН_н, оксидів азоту NO_х та сумарними масовими викидами, зведеними до СО. Аналіз показує, що у разі штатного ВКВЗ 5 град. повороту колінчастого вала з використанням бензину із 10% добавкою біоетанолу, збільшення витрати палива відносно штатного бензину склало 3,7%, із 20% – 8,5%. При оптимальному значенні ВКВЗ – 10 град. повороту колінчастого вала, за умови живлення автомобіля бензином із

10% добавкою біоетанолу перевитрата палива порівняно з штатним бензином склала 2,5%. При використанні бензину з 20% добавкою біоетанолу і оптимальним ВКВЗ 14 град. повороту колінчастого вала, збільшення витрати палива порівняно з штатним бензином склало 3,9%.

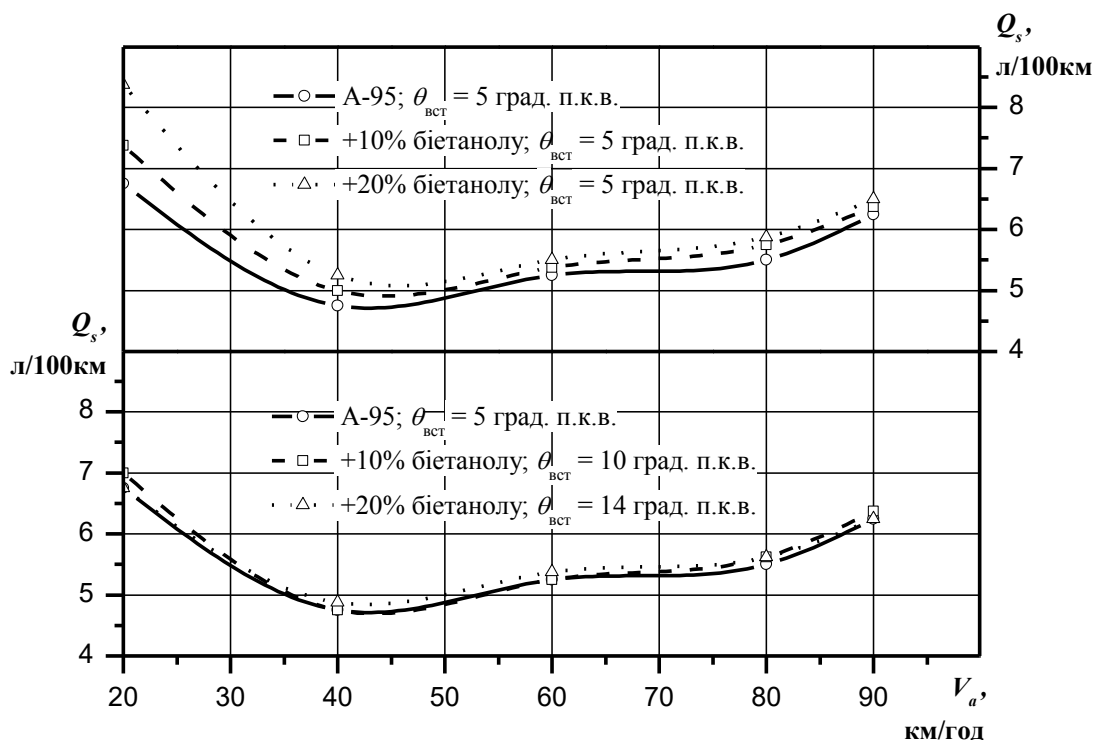


Рис. 5.9. Паливні характеристики усталеного руху автомобіля ЗАЗ-1102 при використанні бензину А-95 та його сумішей з додавання 10 % та 20 % біоетанолу

Таблиця 5.2. Вплив величини ВКВЗ на витрату палива та екологічні показники автомобіля ЗАЗ-1102 "Таврія"

Паливо		A-95	10% біоетанолу		20% біоетанолу	
ВКВЗ, град. п.к.в.		5	5	10	5	14
Витрата палива	г/цикл	50,60	52,49	51,85	54,88	52,56
	л/100 км	6,57	6,80	6,71	7,08	6,78
	МДж/100 км	219,8	218,8	216,1	219,1	209,8
Масові викиди, г/цикл	СО	4,98	3,63	3,51	3,23	2,91
	C _m H _n	0,504	0,398	0,415	0,411	0,466
	NO _x	0,877	0,577	0,782	0,309	0,575
	СО ₂	208,2	201,9	195,9	205,8	195,8
	зведені до СО	42,64	28,58	36,96	17,25	28,02

Масові викиди оксиду СО і діоксиду СО₂ вуглецю за оптимального ВКВЗ при живленні автомобіля бензином із 10% добавкою біоетанолу зменшились, відповідно, на 3,3 і 3,0% порівняно із штатним ВКВЗ, бензином з 20% добавкою біоетанолу – на 9,9 і 4,9%, відповідно. Зі збільшення ВКВЗ до оптимальних значень при живленні двигуна автомобіля бензинами з добавками

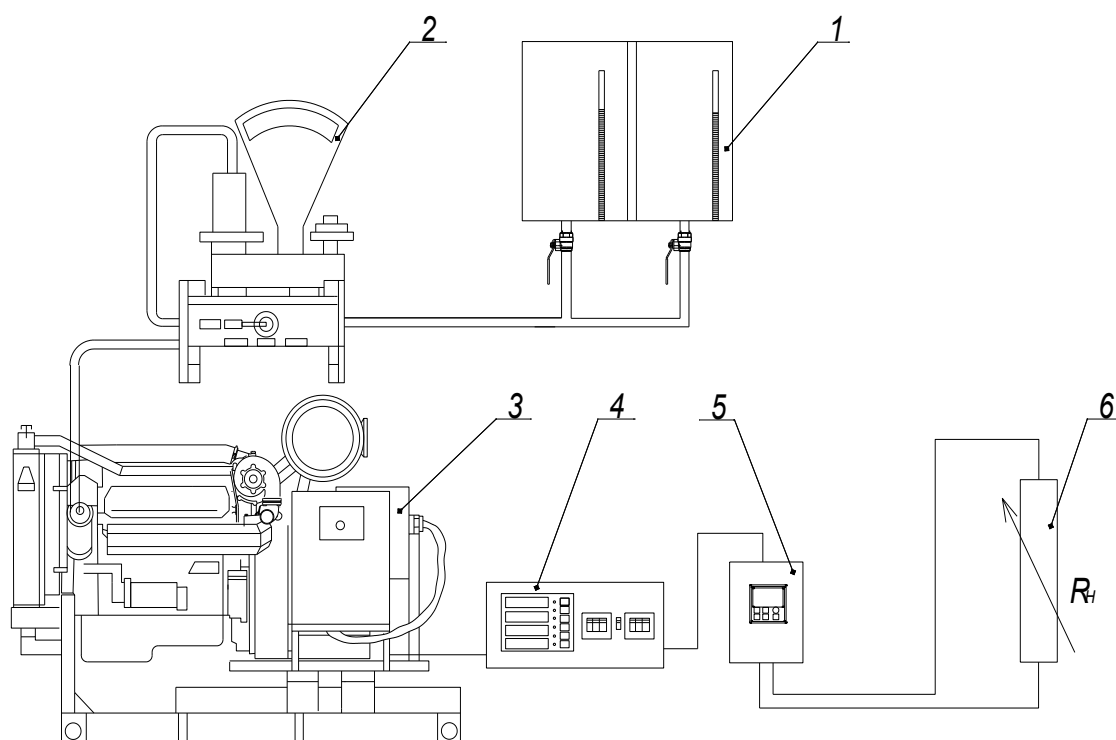
біоетанолу покращує процес згоряння паливо-повітряної суміші (збільшення температури в циліндрі двигуна), що призводить до збільшення вмісту оксидів азоту NO_x на 35,5% при 10% добавці біоетанолу і 86,1% – при 20% добавці біоетанолу, а також на 4,3 і 13,4% вуглеводнів C_mH_n . Але масові викиди C_mH_n та NO_x за роботи на оптимальних ВКВЗ не перевищують значень при живленні бензином. При цьому сумарні масові викиди, зведені до CO , при живленні бензином з 10% добавкою біоетанолу менші порівняно з бензином на 13,3% і на 34,3% порівняно з 20% добавкою біоетанолу.

Лабораторна робота 5: Визначити витрату палива при роботі ДВЗ на суміші бензину із біоетанолом (E10).

Мета роботи: Ознайомитись із конструкцією експериментального обладнання, визначити витрати сумішевого палива при роботі бензинового двигуна.

Прилади та обладнання: бензинова електростанція, ваги, секундомір, тиристорний регулятор навантаження.

Для проведення досліджень лабораторне обладнання монтується згідно схеми приведеної на рис. 5.10.



1 – бак з паливом; 2 – ваги для палива; 3 – бензинова електростанція;
4 – тиристорний регулятор навантаження; 5 – ватметр, 6 – електричне навантаження

Рис. 5.10. Схема стенда для визначення впливу концентрації біоетанолу на роботу бензинового двигуна

При проведенні вимірювання вибраний тип палива надходить з бака до двигуна бензинової електростанції. Вимірювання витрати палива здійснюється

за допомогою вагів для палива. На одній чашці вагів встановлюють прозору ємність, на іншу – ставиться вантаж, що її врівноважує. При положенні крану "Замір" паливо подається із прозорої ємності в паливну систему двигуна. За допомогою тиристорного регулятора здійснюється зміна завантаження електрогенератора електростанції. Рівень завантаження вимірюється ватметром, електричне навантаження перетворює електричну енергію в теплову.

Порядок виконання роботи: після запуску та прогріву двигуна, електростанція виводиться на номінальні робочі оберти, після чого здійснюють замір часу витрати 50 грамів палива на холостому ході при роботі без навантаження; після цього за допомогою тиристорного регулятора та електричного навантаження завантажують електрогенератор та заміряють потужність навантаження; змінюючи навантаження визначають час витрати 50 грамів палива. Результати заносять в таблицю 5.3.

Таблиця 5.3. Результати вимірювання показників двигуна

N_E , кВт	N_D , кВт	Δt , с	ΔG_T , г	G_T , кг/год.	G_E , г/(кВт год.)
Бензин А-95					
0	хх	360,0	50	0,5	–
1	1,04	265,4	50	0,678	0,651
1,5	1,56	237,0	50	0,759	0,486
2	2,08	209,2	50	0,860	0,413
2,8	2,92	172,9	50	1,041	0,357
Суміш бензину із біоетанолом (Е10)					
0	хх	342,9	50	0,525	–
1	1,04	255,2	50	0,705	0,677
1,5	1,56	227,7	50	0,791	0,506
2	2,08	201,0	50	0,896	0,430
2,8	2,92	165,9	50	1,085	0,372

Потужність двигуна визначають за виразом:

$$N_D = \frac{N_E}{\eta_r} = \frac{N_E}{0,98}$$

де: N_E – показники електричної потужності за ватметром, кВт; η_r – коефіцієнт корисної дії електрогенератора, $\eta_r = 0,98$ від. од.

Годинну витрату палива визначають за виразом:

$$G_T = 3,6 \frac{\Delta G}{\Delta t}$$

де: G_T – годинна витрата палива двигуном, кг/год.; ΔG – маси витраченого палива, г; Δt – час, за який двигун витрачає задану дозу палива ΔG , с.

На основі розрахунків будується графік залежності годинної витрати палива від потужності двигуна (рис. 5.11) для бензину А-95 та суміші бензину із біоетанолом (Е10).

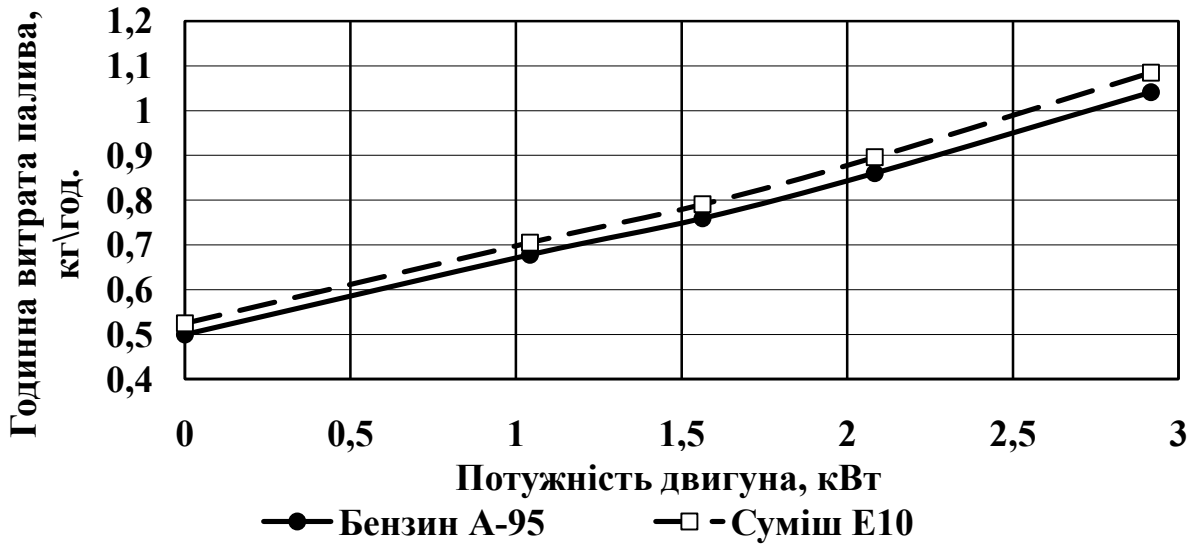


Рис. 5.11. Залежність годинної витрати палива від потужності двигуна

Питому витрату палива визначають за виразом:

$$g_E = \frac{G_T \cdot 10^3}{N_D}$$

де: g_E – питома витрата палива г/кВт год.

На основі розрахунків будується графік залежності питомої витрати палива від потужності двигуна (рис. 5.12) для бензину А-95 та суміші бензину із біоетанолом (Е10).

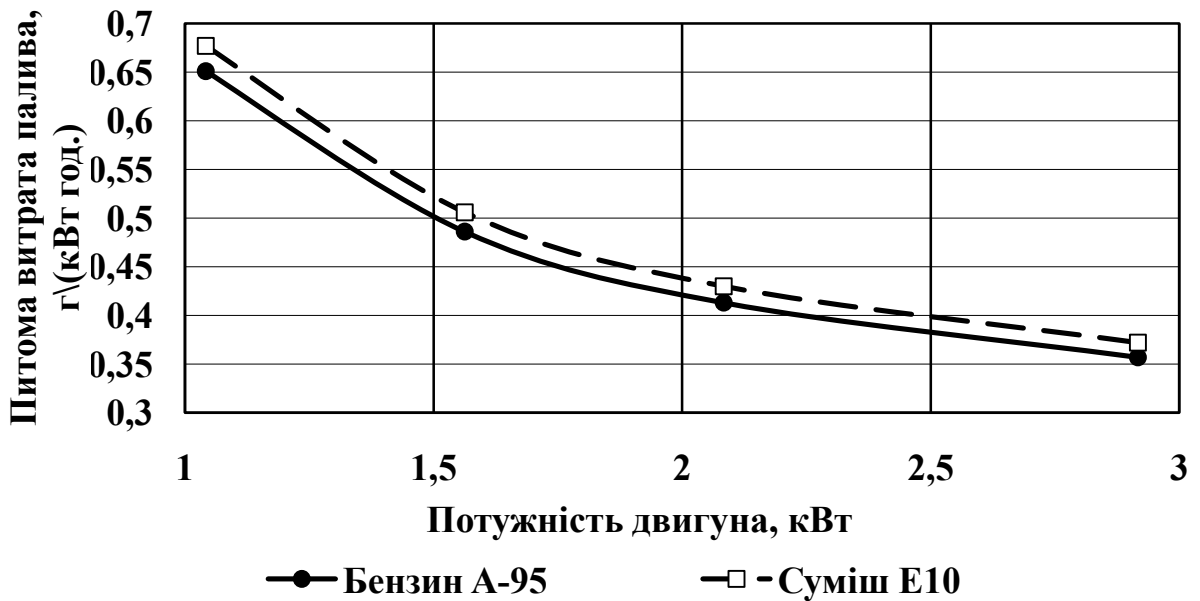


Рис. 5.12. Залежність питомої витрати палива від потужності двигуна

Таким чином, на основі аналізу експериментальних даних роботи бензинового двигуна встановлено, що при застосуванні суміші з вмістом 10%

біоетанолу відбувається збільшення годинної та питомої витрати палива на величину від 4,0 до 4,2 % в залежності від завантаження двигуна.

Практична робота 5: Розрахувати економічну ефективність заміщення бензину біоетанолом.

Вихідні дані: Сировина для виробництва біоетанолу – кукурудза, урожайність $U_K = 7$ т/га; собівартість вирощування кукурудзи $B_K = 12755$ грн./га, ціна бензину $C_B = 20,74$ грн./кг; ціна кукурудзи $C_K = 2700$ грн./т, ціна вологої барди $C_B = 200$ грн./кг; річний об'єм використання бензину в господарстві $N_B = 25500$ кг; нижча теплотворна здатність бензину $Q_B = 42$ МДж/кг; нижча теплотворна здатність біоетанолу $Q_{BE} = 27$ МДж/кг; густина біоетанолу $\rho_{BE} = 0,8$ кг/м³; загальні дані процесу виробництва біоетанолу необхідні для проведення розрахунків наведені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4. Показники процесу виробництва біоетанолу із зерна кукурудзи

Показник	Позначення	Значення
Вихід біоетанолу, л/т	k_B	416
Частка виробничих витрат віднесена до ціни сировини, від. од.	k_{BB}	0,5
Вміст бензину в денатурованому біоетанолі, %	k_B	5
Співвідношення обсягів барди та зерна кукурудзи, л/кг	k_{BA}	2,82

Розрахунки виконуються в наступному порядку. Спочатку визначається теплотворна здатність денатурованого біоетанолу. Враховуючи, що згідно законодавства, для використання в якості палива біоетанол повинен пройти обов'язкову денатурацію (додавання 5% бензину) теплотворна здатність денатурованого біоетанолу буде становити:

$$Q_{ED} = \left(1 - \frac{k_B}{100}\right) Q_{BE} + \frac{k_B}{100} Q_B = \left(1 - \frac{5}{100}\right) 27 + \frac{5}{100} 42 = 27,75 \text{ МДж/кг.}$$

Річна потреба в денатурованому біоетанолі становитиме:

$$N_{ED} = \frac{N_B Q_B}{Q_{ED}} = \frac{25500 \cdot 42}{27,75} = 38594,6 \text{ кг,}$$

а в чистому біоетанолі –

$$N_{BE} = \left(1 - \frac{k_B}{100}\right) N_{ED} = \left(1 - \frac{5}{100}\right) 38594,6 = 36664,9 \text{ кг.}$$

Враховуючи необхідний річний об'єм біоетанолу, потреба у зерні кукурудзи для його отримання становитиме:

$$m_K = \frac{N_{BE}}{\rho_{BE} k_B} = \frac{36664,9}{0,8 \cdot 416} = 110,2 \text{ т.}$$

Необхідна площа для вирощування даної кількості кукурудзи становитиме:

$$S_K = \frac{m_K}{U_K} = \frac{110,2}{7} = 15,75 \text{ га.}$$

Затрати на вирощування кукурудзи становитимуть:

$$Z_K = S_K B_K = 15,75 \cdot 12755 = 200891,25 \text{ грн.}$$

Побічним продуктом виробництва біоетанолу є барда, яка може бути використана в якості корму в тваринництві. Її обсяги при отриманні заданої кількості біоетанолу становитимуть:

$$V_B = m_K k_{BA} = 110,2 \cdot 2,83 = 311,9 \text{ т.}$$

Виручка від реалізації вологої спиртової барди становитиме:

$$P_B = V_B C_B = 311,9 \cdot 200 = 62380 \text{ грн.}$$

Затрати на денатурацію біоетанолу становлять:

$$Z_D = N_{ED} \frac{k_B}{100} C_B = 38594,6 \cdot \frac{5}{100} \cdot 20,74 = 40022,6 \text{ грн.}$$

Загальні витрати на виробництво біоетанолу становитимуть:

$$Z_B = m_K C_K k_{BB} = 110,2 \cdot 2700 \cdot 0,5 = 148770 \text{ грн.}$$

Економія коштів від використання біоетанолу на заміну бензину становитиме:

$$\begin{aligned} P_{BB} &= N_B C_B - (Z_K + Z_D + Z_B - P_B) = \\ &= 25500 \cdot 20,74 - (200891,25 + 40022,6 + 148770 - 62380) = 201566,15 \text{ грн.} \end{aligned}$$

Збільшення надходжень коштів від виробництва біоетанолу у порівнянні з реалізацією зерна кукурудзи становить:

$$\begin{aligned} E &= P_{BB} - (m_K C_K - Z_K) = \\ &= 201566,15 - (110,2 \cdot 2700 - 200891,25) = 104917,4 \text{ грн.} \end{aligned}$$

Таким чином, проведені розрахунки показали, що для заміщення 25,5 т бензину біоетанолом необхідно задіяти під вирощування кукурудзи 15,75 га. Економія коштів від використання біоетанолу на заміну бензину становить 7,9 грн. із розрахунку на один кг бензину, що використовувався в господарстві. Збільшення надходжень коштів від виробництва біоетанолу у порівнянні з реалізацією зерна кукурудзи становить 952,06 грн./т.

Запитання для самоконтролю:

1. Про що свідчить аналіз фізико-хімічних властивостей біоетанолу?
2. Які основні переваги використання біоетанолу в якості моторного палива?
3. Які основні переваги використання біоетанолу в якості добавки до бензину?
4. Які основні недоліки використання біоетанолу в двигунах?
5. Чим обумовлені перспективи використання біоетанолу у світі?
6. У яких країнах біоетанол найбільш розповсюджений і чому?
7. Що Ви знаєте про використання біоетанолу в США?

8. Що Ви знаєте про використання біоетанолу в Бразилії?
9. Що Ви знаєте про використання біоетанолу в країнах Євросоюзу?
10. Які особливості багатопаливного двигуна системи FFV?
11. Чи є перспективи використання біоетанолу в Україні?
12. На яких сумішах бензину з біоетанолом можуть працювати звичайні двигуни внутрішнього згоряння?
13. Що потрібно змінити порівняно з роботою на бензині при збільшенні вмісту біоетанолу в паливній суміші?
14. Розкрийте особливості використання біоетанолу в двигунах внутрішнього згоряння?
15. Які види палива із вмістом біоетанолу Ви знаєте? Назвіть їх марки.
16. Які особливості двигунів, що використовують біоетанол?
17. Які способи подолання недоліків використання біоетанолу в двигунах?
18. Які переваги використання біоетанолу в двигунах?
19. Які є ризики при використанні біоетанолу в якості моторного палива?
20. При яких значеннях кута випередження запалення досягається мінімальна витрата бензину із 10% та 20% добавкою біоетанолу?
21. Яка перевитрата палива порівняно з штатним бензином при оптимальному значенні кута випередження запалення за умови живлення автомобіля бензином із 10% та 20% добавкою біоетанолу?
22. Наскільки сумарні масові викиди, зведені до CO, при живленні бензином з 10% та 20% добавкою біоетанолу менші порівняно з бензином?
23. Наскільки збільшується годинна та питома витрата палива при застосуванні суміші з вмістом 10% біоетанолу?

Література:

1. Мельничук О.І. Проблеми та перспективи розвитку спиртової галузі України в контексті виробництва біопалива/ О.І. Мельничук // Економіка і держава – 2012. – № 2. – С. 15-21.
2. Система використання біоресурсів у новітніх біотехнологіях отримання альтернативних палив [Блюм Я.Б., Григорюк І.П., Дмитрук К.В. та ін.] – К.: Аграр Медіа Груп, 2014. – 360 с.
3. <https://uk.wikipedia.org/wiki/біоетанол>.
4. Pryshliak N. V. Perspectives of bioethanol production of sugar beets in Ukraine / N. V. Pryshliak // Економіка АПК : міжнародний науково-виробничий журнал. – 2014. – № 3. – С. 126-131.
5. Пришляк Н. В. Біоетанол з цукрових буряків та ефективність його виробництва в Україні / Н. В. Пришляк // Вісник Харківського національного аграрного університету ім. В. В. Докучаєва. Сер.: Економічні науки. – 2014. – № 7. – С. 280-288.
6. Пришляк Н. В. Аналіз розвитку ринку біоетанолу у Бразилії / В. М. Пришляк, Л.Г. Михальчишина, Н.В. Пришляк // Економічний аналіз : зб. наук, праць Тернопільського національного економічного університету. – Тернопіль : Економічна думка, 2012. – Випуск 10. – Частина 1. – С. 340-342.

7. Пришляк Н. В. Аналіз стану та перспектив розвитку ринку біоетанолу в США / Н. В. Пришляк, Л. В. Гуцаленко // Інноваційна економіка : всеукраїнський науково-виробничий журнал. – 2013. – № 6 [44]. – С. 154-157.
8. Захарченко М. О. Покращення паливної економічності та екологічних показників автомобілів раціональним використанням бензинів з добавками біоетанолу: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.20 – «Експлуатація та ремонт засобів транспорту». – Київ:, 2008. – 28 с.
9. Карпов С.А. Автомобильные топлива с биоэтанолом / С.А. Карпов, В.М. Капустин, А.К. Старков – М.: Колос, 2007. – 216 с.
10. Технологія спирту. В.О. Маринченко, П.Л. Шиян, П.С. Циганков, І.Д. Жолнер. / Під. ред. проф. В.О. Маринченка . – Вінниця: "Поділля-2000", 2003. – 496 с.
11. Коденська М.Ю. Обґрунтування необхідності розробки інвестиційних проектів у розвиток біоетанолової галузі на базі продукції цукровобурякового виробництва / М.Ю. Коденська. – К.: ННЦ «ІАЕ», 2010. – 12 с.
12. Міністерство сільського господарства США [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ers.usda.gov/media/521667/corndatatable.htm>.
13. Перспективи розвитку біоенергетики в Україні / [М.В. Роїк, В.Л. Курило, О.М. Ганженко та ін.] // Цукрові буряки. – № 2-3 (86-87), 2012. – С. 6.
14. Присяжнюк О.І. Аспекти використання біоетанолу як альтернативного джерела енергії / О.І. Присяжнюк, І.Л. Шевченко // Цукрові буряки. - №3, 2009. – С. 14-15.
15. Сергеева Н. Працюємо на перспективу. Аграрний тиждень. Україна. 17 липня 2015 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://a7d.com.ua/machines/21566-pracyuemo-na-perspektivu.html>.
16. Спиртовмісні палива /Є.В. Полункін, С.О. Зубенко, О.О. Гайдай, О.В. Кузнецова // Вісник НАУ. – 2010. – №2. – С. 137-141.
17. Ткаченко Н.М. Шляхи подолання кризових явищ у цукровій промисловості / Н.М. Ткаченко, О.О. Ткаченко // Науковий журнал «Економіка АПК». – 2009. – № 8.
18. Третяк В. Трактори. Що вигідно і що є. Аграрний тиждень. Україна. 18 березня 2015 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://a7d.com.ua/machines/16271-traktori-scho-vigdno-scho-ye.html>.
19. Туркільян Т. «Укрспирт» врятує виробництво біоетанолу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ecotown.com.ua/news/Ukrspirt-vryatuye-vyrobnytstvo-bioetanolu-/>.
20. Biofuels Annual report [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.usda-france.fr/media/Biofuels%20Annual_The%20Hague_EU-27_6-25-2012.pdf.
21. Bastos M.V. Brazil's Ethanol Program – An Insider's View /Milton Briquet Bastos // Energy Tribune. Retrieved 2008-08-14.

6. ОСНОВИ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ

6.1. Сучасні тенденції розвитку технологій видалення та використання гною

Одним з елементів безвідходного виробництва сільськогосподарської продукції є переробка і використання гною. Низькі дози внесення органічних добрив не забезпечують компенсації втрат гумусу, що призводить до погіршення біологічних властивостей ґрунту і його деградації.

У зв'язку з цим, виникає необхідність в переробці гною великої рогатої худоби (ВРХ) та свиней, питома вага яких в загальній кількості гною найбільша, в повноцінні органічні добрива з використанням технологій біогазового зброджування і компостування.

В процесі переробки гній фермських підприємств є джерелом для отримання газоподібного палива на основі біометану, а також компостів на основі підстилкового гною і гноївки після метанового зброджування, які повинні бути основним видом органічних добрив у рослинництві.

Гноївка – рідина, яка виділяється із гною при його видаленні та зберіганні. Її використовують для виробництва компостів, як рідке органічне добриво і в якості біосировини в біогазових технологіях.

Одним з найважливіших принципів виробництва компосту є додавання у вихідну суміш вуглецевих матеріалів, які є основним компонентом дихання і живлення мікроорганізмів і які здійснюють процес аеробного зброджування. При закладці матеріалів на компостування потрібно витримувати певне співвідношення між азотом і вуглецем. Для підтримки заданого балансу, багаті азотом матеріали насичують вуглецевими матеріалами, зокрема до гною додають відповідну норму підстилки. Для того, щоб процес компостування йшов у потрібному напрямку, компостна суміш повинна мати вуглець і азот у співвідношенні $C:N = 20-30:1$ (C – кількість вуглецю, N – кількість азоту).

При використанні гною для виробництва біогазу виділяють дві технології: рідкофазну і твердофазну. При твердофазній технології виникають труднощі, пов'язані із забезпеченням оптимальних умов протікання мікробіологічних процесів ферментації біомаси. У першу чергу це стосується завантаження і гомогенізації біомаси яка надходить на зброджування. Застосування рідко фазної ферментації є більш поширеним у практиці використання біогазових установок. При цьому, забезпечують безперервне введення невеликими порціями вхідної біомаси в метантенк, який представляє собою ємність-змішувач, де підтримується задана вологість і температура без доступу повітря.

Температурний оптимум процесу метанового зброджування лежить в межах від 35 до 55⁰С, крім того у рідкому гної міститься значна кількість мінеральних включень наявність яких не бажана при внесенні гною до біогазової установки, так як вони не беруть участі у метановому зброджуванні.

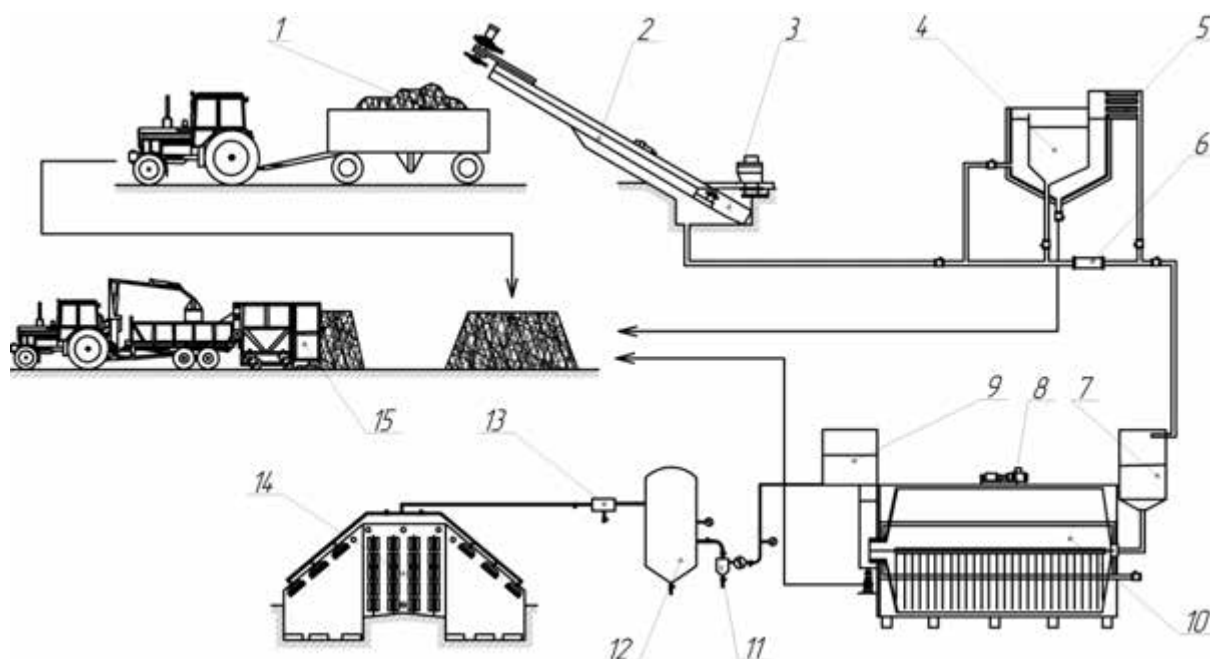
Система видалення гною з приміщень для тварин і добовий обсяг гною істотно позначаються на обсягах гноєсховищ, а отже, на капітальних витратах,

необхідних для їх спорудження. Крім того, при накопиченні сировини необхідно враховувати ту обставину, що з часом гній втрачає азот та органічну речовину, що багато в чому визначає ефективність наступного етапу його використання для виробництва компосту та отримання біогазу.

Слід зазначити, що метанове зброджування не забезпечує знезараження гною, який піддається ферментації в біогазових установках, крім того у разі відкритого зберігання відходів зброджування виділяється метан. Так, наприклад, відповідно до законів Німеччини про поновлювані джерела енергії, підвищена увага приділяється закритим сховищам для зберігання біомаси після зброджування. Розміри таких сховищ, як правило, споруджують об'ємом, який забезпечував би утримання зброженої біомаси не менш ніж 180 днів.

При вирішенні задачі збору і нагромадження вихідної сировини варто враховувати прийняту в конкретному господарстві систему видалення гною із приміщень для тварин, добовий обсяг гною і його склад.

Нами запропоновано технологію (рис. 6.1), яка передбачає збір суміші гною і підстилки вздовж зони утримання тварин, її поділ на гноївку і підстилковий гній, видалення їх з тваринницького приміщення та подальше використання гноївки для анаеробного зброджування з отриманням біогазу, а підстилкового гною, який містить підстилку, для компостування і подальшого використання отриманого компосту як органічного добрива.



1 – підстилковий гній; 2 – похилий транспортер-розділювач; 3 – гнієзбірник; 4 – підігрівач-витримувавч; 5 – теплообмінник; 6 – насос; 7 – теплообмінник; 8 – привідна станція біореактора; 9 – інокулятор; 10 – біореактор; 11 – вологовіділювач; 12 – газгольдер; 13 – газовий редуктор; 14 – теплиця; 15 – майданчик і обладнання для компостування.

Рис. 6.1. Удосконалена технологічна схема видалення та переробки гною

Запропонована технологічна схема дозволяє: розділяти гній на гноївку і підстилковий гній транспортером-розділювачем; підготувати гноївку до метанового бродіння у підігрівачі-витримувачі за рахунок аеробної ферментації та підігріву; провести анаеробне зброджування гноївки і завершити процес переробки шляхом компостування підстилкового гною та збродженої гноївки, після чого отримані продукти використати в якості органічних добрив.

Із збільшенням дози внесення підстилки спостерігається зменшення виходу гноївки при незмінному значенні вологості. Нами отриманого графік залежності виходу гноївки від виду тварин при внесенні різної дози підстилки при величині максимальної водоутримуючої здатності на рівні 80% (рис. 6.2).

Із графіка видно, що зі збільшенням дози внесення підстилки спостерігається зменшення виходу гноївки. Так, наприклад, при добовому використанні підстилки в кількості 4 кг/гол., вихід гноївки становитиме 15,1 кг/гол. за добу для ВРХ та 9,1 кг/гол. за добу для свиней, а при збільшенні дози підстилки до 6 кг/гол., відповідно – 8,4 та 2,5 кг/гол. за добу.

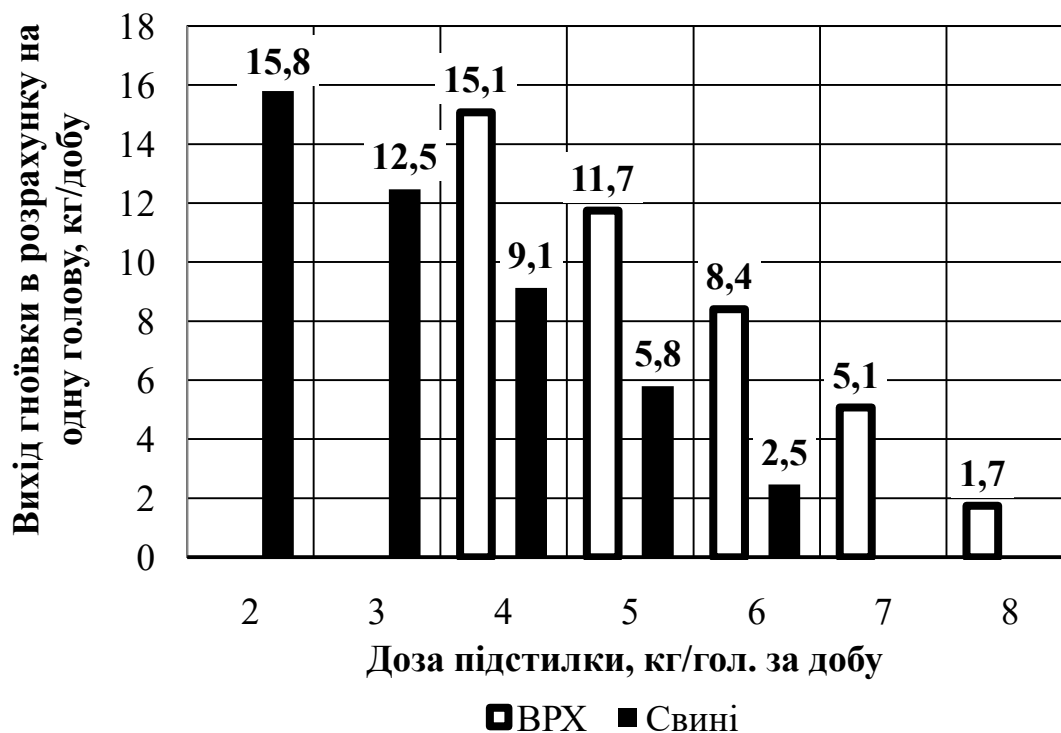


Рис. 6.2. Залежність виходу гноївки від дози підстилки

Розрахунки показують (рис. 6.3), що зменшення внесення підстилки для ВРХ з 7 до 5 кг/гол. за добу призводить до збільшення виходу кількості біогазу вдвічі з 20 до 40 л/гол. за добу, натомість вихід компосту за умови повернення збродженої гноївки після метантенка при цьому практично не змінюється і знаходиться в межах від 37 до 38 кг/гол. за добу. Для свиней вихід біогазу при зменшенні дози підстилки з 6 до 5 кг/гол. за добу збільшується з 10 до 23 л/гол. за добу, а вже при зменшенні внесення підстилки з 3 до 2 кг/гол. за добу вихід біогазу становив 43 та 50 л/гол. за добу відповідно, а вихід компосту за вищезазначених умов знаходиться в межах від 22 до 24 кг/гол. за добу.

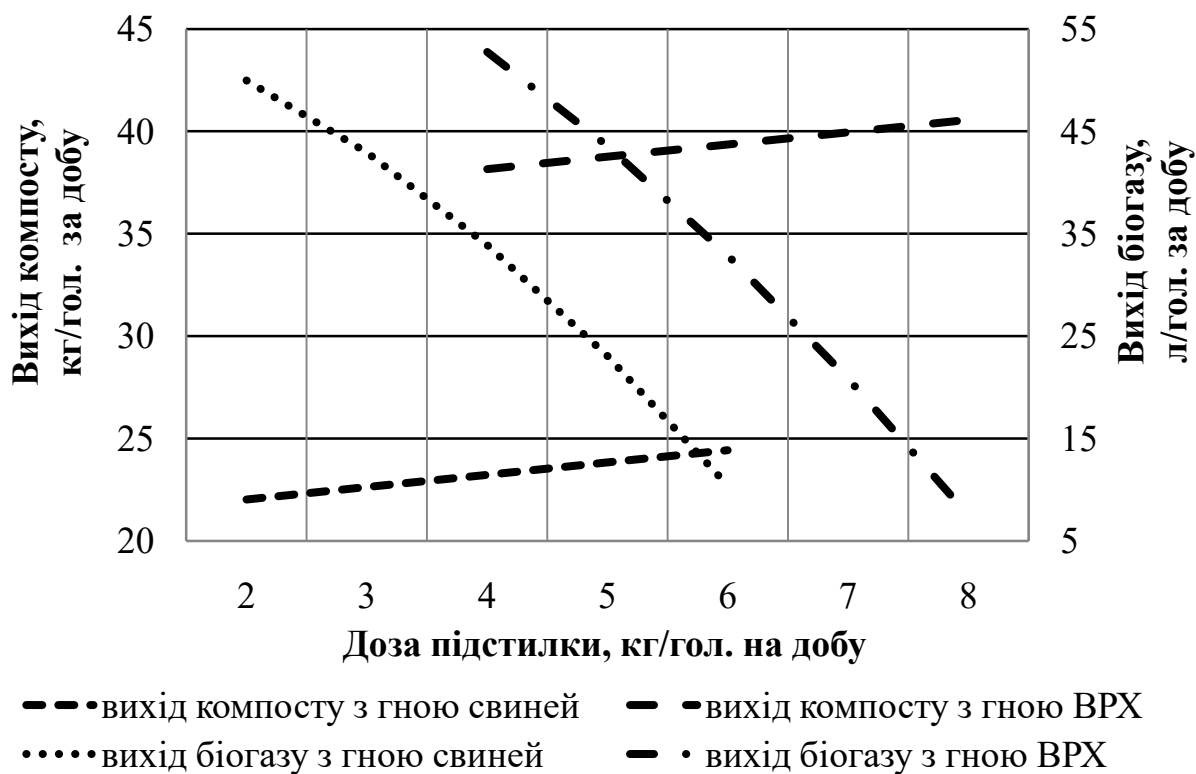


Рис. 6.3. Вплив дози підстилки на вихід біогазу та компосту

Таким чином, змінюючи дозу підстилки можна здійснювати управління процесом видалення гною з плануванням обсягів подальшого розподілу підстилкового гною на аеробну ферментацію та гноївки на анаеробне зброджування в біогазових установках з подальшим її поверненням у процес компостування підстилкового гною.

6.2. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок

Необхідність переробки гною та посліду відкрила новий перспективний напрямок у конструюванні техніки та обладнання для агропромислового комплексу. Ще у XVII столітті Ян Баптист Ван Гельмонт виявив, що біомаса, яка розкладається, виділяє займисті гази. Алессандро Вольта в 1776 році прийшов до висновку про існування залежності між кількістю біомаси яка розклалася і кількістю газу, що виділився. У 1808 році сер Хемфрі Деві виявив метан в біогазі. Перша задокументована біогазова установка була побудована в Бомбеї (Індія) в 1859 році. У цьому ж році біогаз почав застосовуватися у Великобританії для вуличного освітлення.

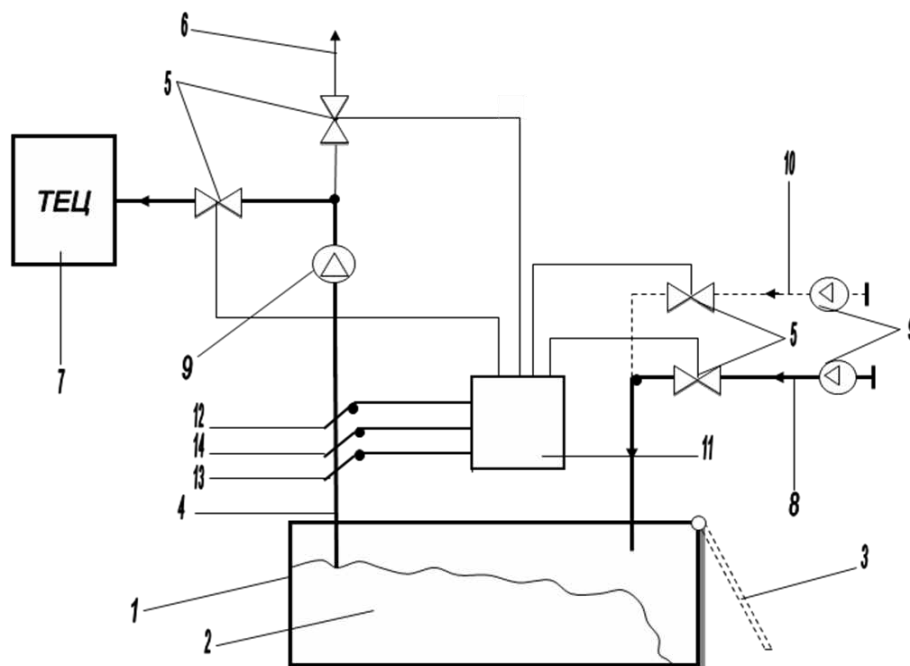
Ринок біогазу на сьогоднішній час найбільш розвинений у Європі, це пояснюється тим, що саме розвинені країни ЄС першими впровадили програми переходу до альтернативних джерел енергії та планомірно підтримували ініціативи, спрямовані на впровадження нових біогазових технологій.

Сьогодні перше місце за кількістю діючих біогазових комплексів належить Німеччині – в 2010 році їх налічується понад 9 тисяч. Тільки 7%

виробленого цими підприємствами біогазу надходить в газопроводи, решта – використовується для потреб виробника. У перспективі 10-20% природного газу, який використовується в країні, може бути замінений біогазом. З точки зору масштабів застосування біогазу лідирує Данія: даний вид палива забезпечує майже 20% енергоспоживання країни.

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

Твердофазне бродіння являє собою серію послідовних операцій (рис. 6.4). Вихідна сировина, наприклад, біологічні відходи, гній, шлам, жири або зелена маса, поміщаються в герметично закритий ферментер і, як правило, нагріваються та перемішуються. При цьому, внаслідок анаеробних процесів, утворюється біогаз. У даний час біогаз застосовується, в основному, для комбінованого виробництва електроенергії і тепла в блокових міні-ТЕЦ. Газову суміш очищають від сірководню (H_2S) і подають до газопоршневого двигуна, який приводить в обертання генератор. Вироблений таким чином електричний струм надходить в мережу.



1 – ферментер; 2 – біомаса; 3 – завантажувально-розвантажувальний отвір; 4 – вихід біогазу; 5 – клапан; 6 – газопровід; 7 – блок ТЕЦ; 8 – лінія відпрацьованого газу ТЕЦ; 9 – вентилятор; 10 – лінія свіжого повітря; 11 – пульт управління; 12 – датчик метану; 13 – датчик концентрації вуглекислого газу; 14 – датчик для визначення об'ємної витрати біогазу

Рис. 6.4. Схема твердофазної біогазової установки

Тепло із системи охолодження двигуна і тепло вихлопних газів відводяться за допомогою теплоносія для подальшого використання. Частина цього тепла (15-30%) необхідна для підігріву біосировини та підтримання

вибраної температури ферментації, так як 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 ефективні установки з цілорічним використанням тепла. В деяких проектах біогаз збагачується і закачується в газопровід. Таким чином зростають шанси для будівництва біогазової установки в тих зонах де відсутні споживачі тепла. Збагачений біогаз також може бути використаний як паливо в автотранспорті. Після метанового зброджування залишковий субстрат практично не має неприємного запаху і застосовується як органічне добриво у сільськогосподарському виробництві.

Встановлено (рис. 6.5), що питомий вихід біогазу збільшується при збільшенні вологості гною та температури і експозиції зброджування. Так при експозиції ферментації гною 15 діб та при вологості зброджуваної маси гною ВРХ $W=77\%$ і температурі зброджування $T=35^{\circ}\text{C}$ питомий вихід біогазу не перевищував 1 л/кг сухої маси за добу, а при вологості зброджуваної маси $W=87\%$ та температурі зброджування $T=53^{\circ}\text{C}$ питомий вихід біогазу знаходився в межах 4-5 л/кг сухої маси за добу.

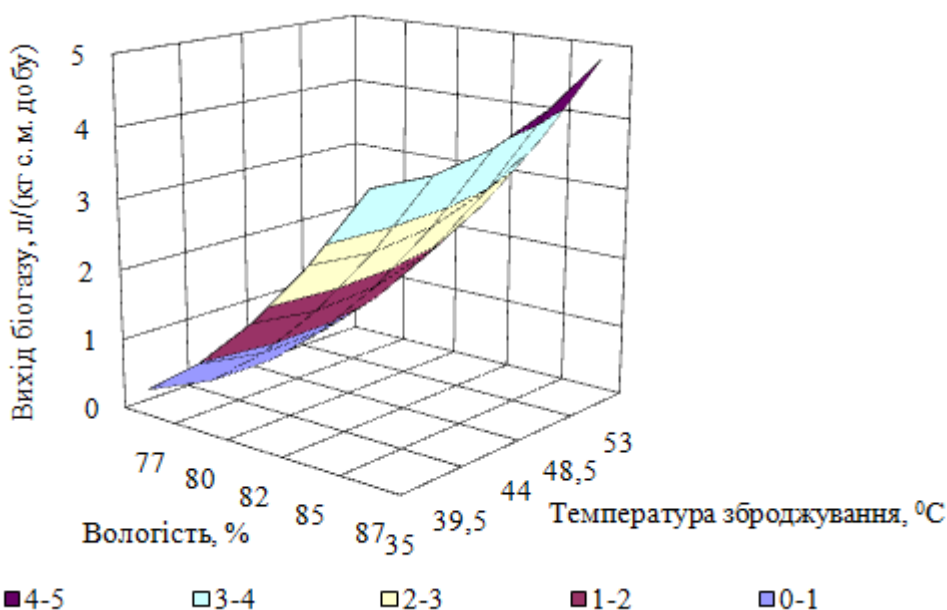
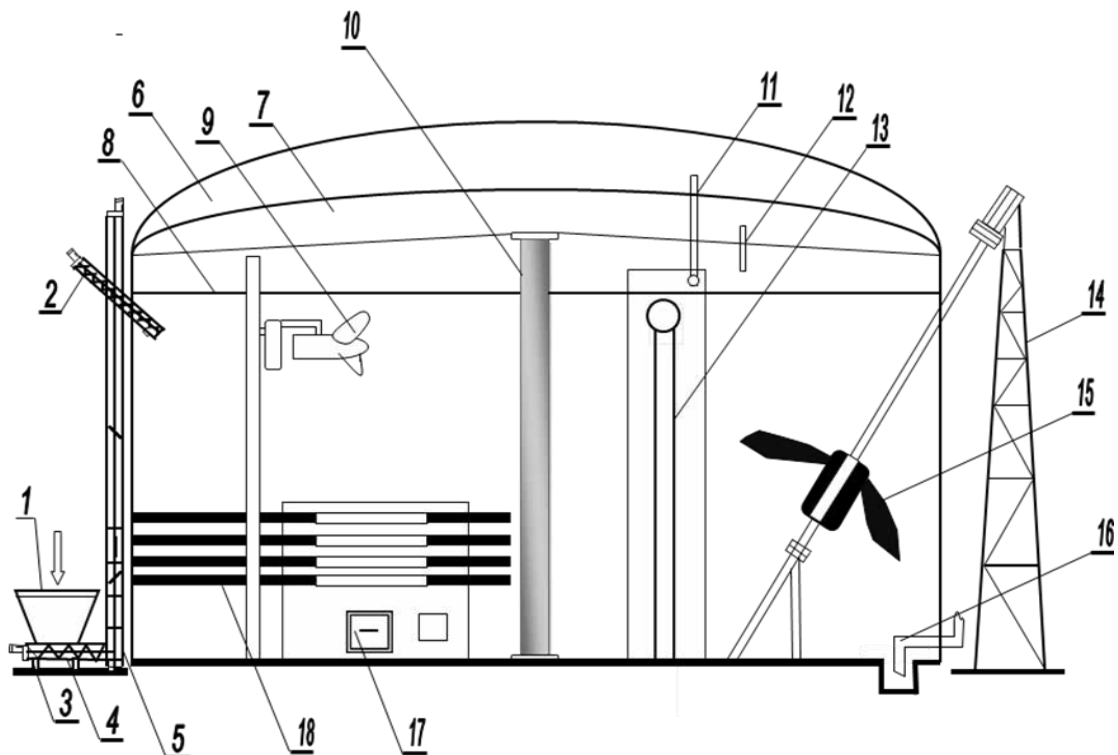


Рис. 6.5. Залежність виходу біогазу від температури зброджування і вологості біомаси

У питанні розвитку технологій твердо фазного зброджування необхідно приділяти увагу удосконаленню мікробіологічних процесів ферментації біомаси та пошуку ефективних конструктивно-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.

Поширеним методом виробництва біогазу є анаеробне зброджування рідкої біомаси ($W=88-95\%$) 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 представляє собою місткість-змішувач без доступу повітря де підтримується задана вологість і температура. Схема біореактора яким в основному комплектують зарубіжні БГУ, представлена на (рис. 6.6).



1 – бункер для сипкого субстрату; 2 – подавальний гвинтовий транспортер; 3 – вагова платформа; 4 – гвинтовий нижній транспортер; 5 – піднімаючий гвинтовий транспортер; 6 – повітряний купол; 7 – біогазовий купол; 8 – рівень наповнення; 9 – вертикальна рухома мішалка; 10 – центральна опора; 11 – труба для подачі повітря; 12 – патрубок для біогазу; 13 – труба для подачі рідкого гною; 14 – опора для мішалки; 15 – похила мішалка; 16 – патрубок для відведення біомаси; 17 – система регулювання температури; 18 – система підігріву біомаси

Рис. 6.6. Схема рідкофазної біогазової установки

Такі реактори виконуються із залізобетону або сталі і мають антикорозійне покриття. Спеціальні мішалки забезпечують переміщення 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 систему очищення і подається до споживачів (котел або когенераційна установка).

У конструкціях біогазових установок закладений принцип модульності, що дозволяє при необхідності нарощувати їх продуктивність.

На ринку Західної Європи присутня значна різноманітність біогазових установок різної потужності та конструкцій: великих (більше 1000 кВт), середніх (від 500 до 1000 кВт) та малих установок (до 500 кВт). У діючих БГУ переважають реактори циліндричної форми. У таких реакторах з певною ефективністю можна перемішувати субстрат, вивантажувати зброджений субстрат, видаляти біогаз і руйнувати поверхневу кірку. При будівництві реакторів використовують бетон, залізобетон, сталевий лист, склопластик. Місткість бродильної камери не повинна мати доступу повітря, а корпусу мати теплоізоляцію і корозійну стійкість. У середині бродильної камери має підтримуватися постійна температура, для чого вона обладнана пристроями для термостабілізації. Слід зазначити, що представлений варіант біореактора як і більшість існуючих, мають теплоізоляцію і забезпечують працездатність взимку не тільки в районах південної і центральної Європи з м'яким кліматом, а і країнах континентальним кліматом. Варіанти реалізації таких установок на території України приведені на рис. 6.7, а їх основні показники в табл. 6.1.



Рис. 6.7. Варіанти реалізації рідкофазних біогазових установок на території України

Недоліком такого типу біогазових реакторів є те, що за рахунок недостатнього та нерівномірного прогрівання різних частин суміші, коливання температур в об'ємі субстрату стають значними. Це порушує технологічні

вимоги та зменшує продуктивність щодо виходу біогазу порівняно з теоретичним. За рахунок невідповідностей вертикального градієнту температур у нижній зоні утворюється холодний малорухомий шар, а верхня зона перегрівається. До недоліків таких реакторів можна віднести великі площі теплообмінників, що призводить до значного зростання вартості спорудження реактора. Технологія бродіння в біогазових установках потребує дотримання визначених прийнятних меж температурного режиму, та стабілізації теплообміну між нагрівником і субстратом.

Таблиця 6.1. Показники діючих біогазових установок на території України

Підприємство	Рік введення в експлуатацію	Вид сировини	Об'єм, м ³	Потужність, МВт
Свиноферма "Запоріжсталь"	1993	Гній свиней	600	–
Свиноферма "Агро-Овен" Дніпропетровська обл.	2003	Гній свиней	2×1000	2×0,06
Зелений гай Херсонська обл.	2008	Силос кукурудзи	1150	2×0,125
"Еліта" Київська обл.	2009	Гній ВРХ та свиней	1500	0,25
"УМК" Київська обл.	2009	Гній ВРХ	3×2400+ 1×1000	0,625
Свиноферма "Даноша" Івано-Франківська обл.	2013	Гній свиней та силос кукурудзи	2×5500	1
Птахофабрика "Орель-Лідер" Дніпропетровська обл.	2013	Послід та силос сорго	10×3500	5
Глобинський цукровий завод Полтавська обл.	2014	Жом та силос	6×8000	16

При використанні проточних реакторів існує можливість того, що незначна частина поданої в реактор свіжої біомаси зразу ж буде вивантажена із реактора. Найкраще це питання вирішується за рахунок подачі в реактор невеликих порцій субстрату декілька разів на день, а також використання декількох реакторів, що працюють, як паралельно так і послідовно.

Досвід експлуатації таких рідкофазних реакторів вказує на 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 вимогам технологічного процесу гомогенізації та потребам підводу 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 з різною питомою вагою.

У результаті накопичення мінеральної складової біомаси в нижній частині реактора в процесі експлуатації БГУ продуктивність реакторів падає і через 2-3 роки складає 50% в відношенні до проектної, значно погіршуючи експлуатаційні і економічні показники виробництва біогазу. Звільнення від баластних шарів є трудомісткою операцією, яку необхідно виконувати у шкідливих умовах.

Технологічні процеси виробництва біогазу постійно удосконалюються в напрямку підвищення енергетичної ефективності біогазових установок.

Найбільш повно досвід використання біогазових установок проаналізовано Агентством відновлюваних ресурсів Німеччини. Автори аналізу вказують, що при відсутності перемішування біомаси в реакторі, через деякий час спостерігається розділення біомаси з утворенням шарів за рахунок різниці в щільності окремих мінеральних та органічних компонентів, а також за рахунок флотації частинок при газовиділенні. При цьому більша частина біомаси анаеробних бактерій знаходиться в нижній частині реактора, а органічна частина біомаси субстрату накопичується у верхній частині реактора. Наслідком цього є те, що зона контакту анаеробних бактерій із біомасою субстрату обмежена пограничним шаром вказаних частин реактора. Плаваюча кірка із твердих органічних речовин також блокує вихід біогазу. Сприяння контакту анаеробних бактерій із біомасою субстрату забезпечується за рахунок перемішування субстрату, однак при цьому інтенсивного перемішування слід уникати, оскільки це може призвести до припинення анаеробного зброджування за рахунок порушення симбіозу ацетогенних та метаногенних бактерій. На практиці компроміс досягається за рахунок повільного обертання мішалок або їх роботи упродовж короткого часу.

Частина твердих мінеральних включень, які містяться в субстратах на основі гною, звільняється в процесі біологічного розкладу в реакторі. Мінеральний осад призводить до зменшення корисного об'єму реактора. Досвід експлуатації реакторів біогазових установок показав, що уже зустрічаються реактори наполовину заповнені мінеральним осадом, який можливо видалити лише екскаватором після повної зупинки процесу зброджування.

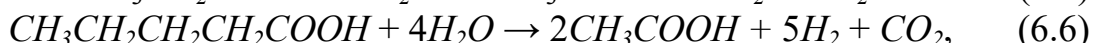
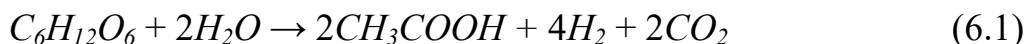
Плаваючі шари, особливо на основі волокнистих субстратів, часто утворюють кірку і якщо її не розмішати, то реактор також необхідно зупинити для її видалення. Вказані недоліки біогазових установок відмічалися в багатьох наукових роботах.

Таким чином, зброджування гною дає змогу вирішити економічні, екологічні та санітарно-епідеміологічні проблеми, що виникають в наслідок накопичення великої кількості відходів тваринництва. Виробництво біогазу є однією з безвідходних технологій, яка виконує природоохоронну і

ресурсозберігаючу функцію, адже воно не лише не призводить до утворення будь яких відходів, а і утилізує відходи сільськогосподарського, спиртового, харчового та інших виробництв. І разом з тим, частково дозволяє вирішувати проблему збереження традиційних енергоносіїв. Удосконалення роботи біогазових реакторів шляхом забезпечення перемішування шарів біомаси субстрату може бути досягнуто за рахунок обертання реактора у завислому стані зануреним у воду.

6.3. Аналіз метаноутворення в біогазових установках

Відомо, що на першій стадії анаеробного зброджування під дією бактерій відбувається гідроліз субстрату з утворенням органічних кислот, спиртів, простих вуглеводів. На другій стадії утворюється оцтова кислота, водень та вуглекислий газ. Ці стадії анаеробного зброджування можуть бути узагальнені наступними рівняннями:



де $C_6H_{12}O_6$ – глюкоза; CH_3CH_2OH – етанол; $CH_3CH(OH)COOH$ – лактат; $CH_3CH_2CH_2COOH$ – масляна кислота; CH_3CH_2COOH – пропіонова кислота; $CH_3CH_2CH_2CH_2COOH$ – валеріанова кислота; H_2O – вода; CH_3COOH – оцтова кислота; H_2 – водень; CO_2 – вуглекислий газ.

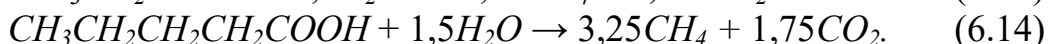
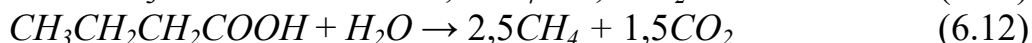
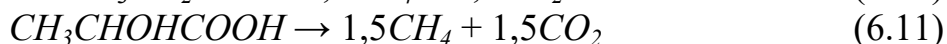
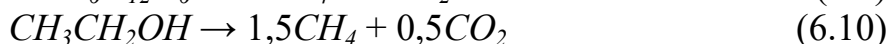
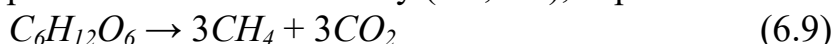
У подальшому, метаногенез відбувається за рахунок діяльності мікроорганізмів, які відновлюють вуглекислий газ до метану, а також таких, що розкладають в кінцевому підсумку оцтову кислоту на метан і вуглекислий газ. Рівняння біохімічних реакцій стадії метаногенезу анаеробної ферментації мають наступний вигляд:



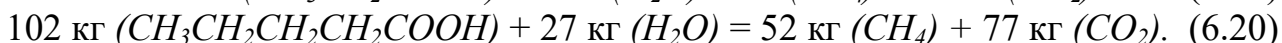
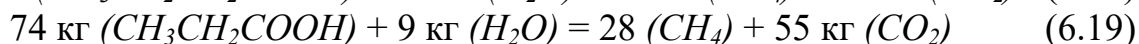
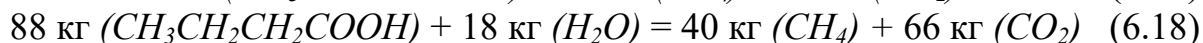
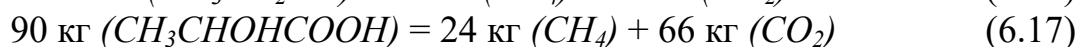
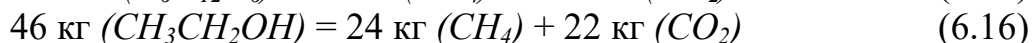
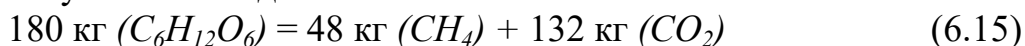
де CH_4 – метан.

Опубліковані джерела свідчать про наявність різних методик визначення питомого виходу біогазу при роботі біогазових установок, проте є необхідність проведення поглибленого аналізу факторів, що зумовлюють виробництво біометану, а також обґрунтування напрямів інтенсифікації цього процесу.

Поєднавши рівняння стадії утворення оцтової кислоти, водню та вуглекислого газу (6.1-6.6) з рівняннями метаногенезу (6.7, 6.8), отримаємо:



Розрахунковий матеріальний баланс анаеробної ферментації вищенаведених органічних речовин біомаси у відповідності із рівнянням (6.9-6.14) буде мати наступний вигляд:



Дані розрахунку матеріального балансу (табл. 6.2) показують, що при анаеробній ферментації від 60 до 80 % метану утворюється за рахунок розщеплення оцтової кислоти і від 20 до 40 % за рахунок використання водню для відновлення вуглекислого газу до метану, а із 1 кг розкладеної біомаси утворюється 1,1 кг біогазу.

Таблиця 6.2. Показники виходу біометану при анаеробній ферментації

№ п/п	Складова частина біомаси	Вихід біометану, %:		Масовий вихід в перерахунку на 1 кг розкладеної біомаси	
		за рахунок розщеплення CH_3COOH	за рахунок відновлення CO_2	CH_4	CO_2
1	$C_6H_{12}O_6$	66,7	33,3	0,267	0,733
2	CH_3CH_2OH	66,7	33,3	0,522	0,478
3	$CH_3CHOHCOOH$	66,7	33,3	0,267	0,733
4	$CH_3CH_2CH_2COOH$	80	20	0,455	0,75
5	CH_3CH_2COOH	57,1	42,9	0,378	0,743
6	$CH_3CH_2CH_2CH_2COOH$	61,5	38,5	0,51	0,755
	В середньому	66,45	33,55	0,4	0,7

Таким чином, мікробіологічний розклад під час анаеробної ферментації 1 кг органічної речовини супроводжується виділенням в середньому 0,4 кг метану та 0,7 кг вуглекислого газу.

Приймаючи допущення, що біогаз складається тільки із двох газів – газу метану і вуглекислого газу, для визначення щільності біогазу за нормальних умов скористаємося співвідношенням:

$$\rho_{БГ}^H = \rho_{CH_4}^H k_{CH_4} + \rho_{CO_2}^H (1 - k_{CH_4}) \quad (6.21)$$

де $\rho_{CH_4}^H$ – щільність метану за нормальних умов, $кг_{CH_4}/м^3_{CH_4}$; $\rho_{CO_2}^H$ – щільність вуглекислого газу за нормальних умов, $кг_{CO_2}/м^3_{CO_2}$; k_{CH_4} – об'ємний вміст біометану в біогазі, $м^3_{CH_4}/м^3_{БГ}$.

Щільність метану та вуглекислого газу за нормальних умов визначимо з урахуванням допущення, що біогаз є сумішшю ідеальних газів. Згідно рівняння стану ідеального газу при нормальних умовах можна записати:

$$\rho_{CH_4}^H = \frac{p_{BG}^H M_{CH_4}}{R_M T_{BG}^H}, \quad \rho_{CO_2}^H = \frac{p_{BG}^H M_{CO_2}}{R_M T_{BG}^H}, \quad (6.22)$$

де p_{BG}^H – тиск біогазу в реакторі, Па; M_{CH_4} – молярна маса метану, яка дорівнює відносній масі молекули метану, кг/кмоль; M_{CO_2} – молярна маса вуглекислого газу, яка дорівнює відносній масі молекули вуглекислого газу, кг/кмоль; $R_M = 8314,41 \frac{Дж}{кмоль К}$ – універсальна газова постійна; T_{BG}^H – температура біогазу в реакторі, К.

Приклад розрахунку щільності метану, вуглекислого газу та біогазу при умовах роботи біогазового реактора та за нормальних умов приведено у таблиці 6.3.

Таблиця 6.3. Розрахунок щільності біогазу

Показник	Од. виміру	CH ₄	CO ₂
Розрахунок при умовах роботи біогазового реактора			
Універсальна газова постійна	Дж/(кмоль К)	8314,41	
Молярна маса	кг/кмоль	16	44
Тиск біогазу	Па	102551	
Температура біогазу	°С	37	
Щільність газу	кг/м ³	0,636	1,750
Об'ємний вихід на 1 кг розкладеної біомаси	м ³ /кг	0,628	0,399
Концентрація газу в біогазі	%	61,1	38,9
Вага газу в 1 м ³ біогазу	кг/м ³ _{БГ}	0,389	0,680
Щільність біогазу	кг_{БГ}/м³_{БГ}	1,069	
Розрахунок при нормальних умовах			
Тиск біогазу	Па	101325	
Температура біогазу	°С	0	
Щільність газу	кг/м ³	0,714	1,963
Вага газу в 1 м ³ біогазу	кг/м ³ _{БГ}	0,436	0,763
Щільність біогазу	кг_{БГ}/м³_{БГ}	1,199	

Прийнявши допущення про те, що кількість утвореного біогазу визначається інтенсивністю розкладу органічної речовини під час зброджування органічної біомаси, вихід біогазу при зброджуванні у перерахунку на нормальні умови може бути визначений наступним чином:

$$V_{BG} = \rho_{BM} \left(1 - \frac{W_{BM}}{100} \right) k_{OM} k_{OM}^P \frac{m_{BG}}{\rho_{BG}^H}, \quad (6.23)$$

де V_{BG} – питомий вихід біогазу із реактора за нормальних умов, м³_{БГ}/м³_{БМ} за добу; ρ_{BM} – щільність біомаси, кг_{БМ}/м³_{БМ}; W_{BM} – вологість біомаси, %;

$\left(1 - \frac{W_{BM}}{100}\right)$ – вміст сухої речовини по відношенню до загальної кількості біомаси, k_{CM} / k_{BM} ; k_{OM} – вміст органічної маси по відношенню до загальної кількості сухої маси у біомасі, що зброджується, k_{OM} / k_{CM} ; k_{OM}^P – кількість розкладеної за добу органічної маси по відношенню до загальної кількості органічної маси, k_{POM} / k_{OM} за добу; m_{BG} – вихід біогазу в розрахунку на одиницю розкладеної органічної маси, k_{BG} / k_{POM} ; ρ_{BG}^H – щільність біогазу за нормальних умов, k_{BG} / M_{BG}^3 .

Схематичне зображення виходу біометану та біогазу із розкладеної органічної маси приведено на рис. 6.8. Залежність між інтенсивністю розкладу органічної маси та питомим виходом біометану і біогазу, а також часом зброджування, буде мати вигляд приведений на рис. 6.9. Вихід біогазу та біометану зростає пропорційно із підвищенням рівня розкладу органічної біомаси в реакторі, а час зброджування до досягнення 30 % рівня зброджування при цьому знижується за експонентою.



Рис. 6.8. Схематичне зображення виходу біометану та біогазу із розкладеної органічної маси

Основним напрямком інтенсифікації процесу зброджування біомаси гною є підвищення рівня розкладу органічної маси за рахунок створення відповідних умов для розвитку анаеробної мікрофлори. Це може бути забезпечено за рахунок створення стабільних заданих температурних умов зброджування та, що особливо важливо, забезпеченням якісного перемішування біомаси, яке з

одної сторони не повинно порушувати симбіоз ацетогенних та метаногенних бактерій, а з іншої не допускати розшарування біомаси в реакторі на мінеральний осад та плаваючий органічний шар.

6.4. Кінетика зброджування органічної маси в біогазових установках

Оскільки розклад органічної речовини обумовлений розвитком мікроорганізмів, ріст яких описується кінетичними рівняннями, а також вважаючи, що швидкість розкладу органічної речовини під час біогазової ферментації пропорційна кількості нерозкладеної органічної речовини, що ще може бути розкладена, кінетичне рівняння анаеробної ферментації органічної біомаси в диференційній формі буде мати вигляд:

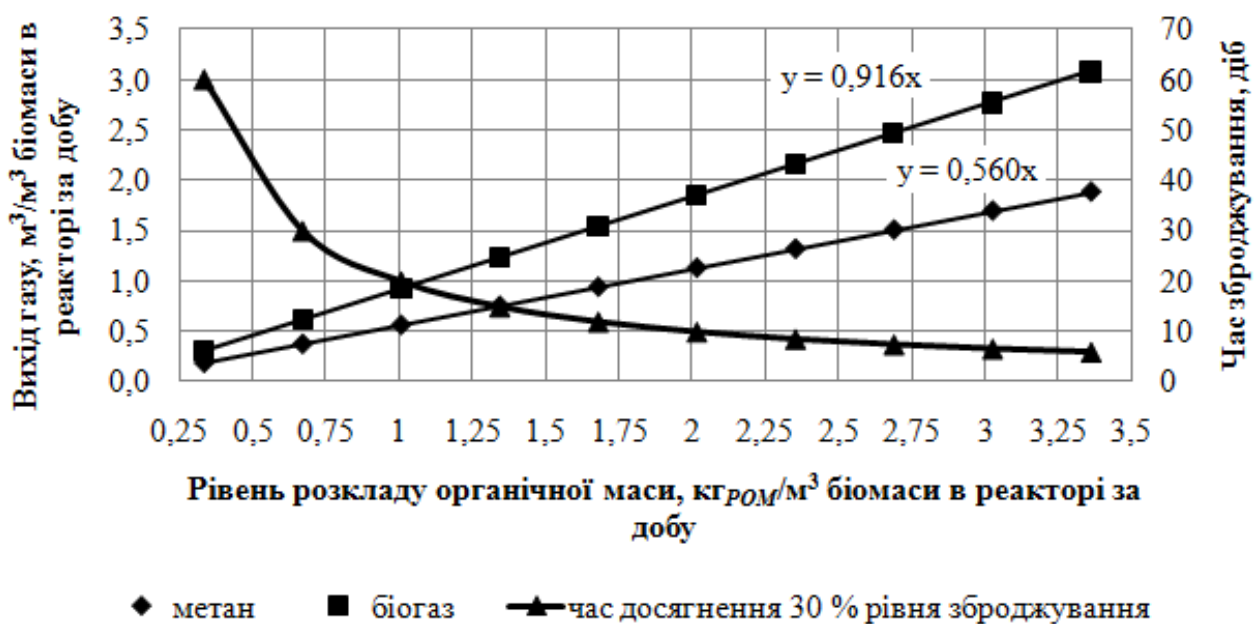


Рис. 6.9. Вплив інтенсивності розкладу органічної маси на питомий вихід біометану, біогазу та час зброджування

$$\frac{dM}{d\tau} = -k(M - M^*), \quad (6.24)$$

де M – вміст органічної речовини біомаси, що не розклалася на поточний момент часу біогазової ферментації, кг; M^* – уміст органічної речовини біомаси, яка не розкладається під час біогазової ферментації, кг; k – параметр процесу біогазової ферментації, який характеризує її швидкість, діб⁻¹; τ – час біогазової ферментації, діб.

Провівши математичні перетворення та інтегрування диференційного рівняння у межах умісту органічної речовини від початкового значення до поточного, одержимо однопараметричне рівняння процесу анаеробної ферментації, яке визначає вміст органічної речовини, що не розклалася на поточний момент часу:

$$M = M^* + (M_0 - M^*) \exp(-k\tau), \quad (6.25)$$

де M_0 – загальний уміст органічної речовини біомаси на початок біогазової ферментації, кг.

В той же час кількість органічної речовини біомаси, яка розклалася на поточний момент часу, становить:

$$M_0 - M = (M_0 - M^*) [1 - \exp(-k\tau)]. \quad (6.26)$$

Привівши кількість органічної речовини, що розклалася на поточний момент часу, до загального вмісту органічної речовини на початок біогазової ферментації, одержимо формулу для визначення рівня розкладу органічної речовини на поточний момент часу

$$\alpha = \alpha_0 [1 - \exp(-k\tau)], \quad (6.27)$$

де $\alpha_0 = \frac{M_0 - M^*}{M_0}$ – максимальний рівень розкладу органічної речовини в

процесі анаеробної ферментації, відносних од.

Враховуючи те, що максимальний рівень розкладу органічної сировини біомаси при довгостроковій експозиції під час анаеробної ферментації становить для біомаси зеленої маси трав – 45 %, а для кукурудзяного силосу – 59 %, кінетичне рівняння процесу анаеробної ферментації рослинної біомаси буде мати вигляд:

– для зеленої маси трав

$$\alpha = 0,45 [1 - \exp(-k_{ЗМТ}\tau)]; \quad (6.28)$$

– для кукурудзяного силосу

$$\alpha = 0,59 [1 - \exp(-k_{КС}\tau)]. \quad (6.29)$$

Розрахунок параметра процесу анаеробної ферментації, який характеризує її швидкість, проведемо на основі експериментальних даних за загальновідомою формулою:

$$k = \exp \left[N^{-1} \left(\sum \ln \left(\ln \frac{\alpha_0}{\alpha_0 - \alpha_i} \right) - \sum \ln \tau_i \right) \right], \quad (6.30)$$

де N – кількість вимірів;

Для розрахунку швидкості процесу анаеробної ферментації біомаси зеленої маси трав та кукурудзяного силосу, скористаємося експериментальними даними.

Розрахунки показали, що для процесу анаеробної ферментації швидкість розкладу органічної речовини становить: для зеленої маси трав – $k_{ЗМТ} = 0,095 \text{ діб}^{-1}$; для кукурудзяного силосу – $k_{ЗМТ} = 0,119 \text{ діб}^{-1}$.

Таким чином, кінетичні рівняння процесу анаеробної ферментації біомаси зеленої маси трав та кукурудзяного силосу будуть мати наступний вигляд:

– для зеленої маси трав

$$\alpha = 0,45 [1 - \exp(-0,095\tau)]; \quad (6.31)$$

– для кукурудзяного силосу

$$\alpha = 0,59 [1 - \exp(-0,119\tau)]. \quad (6.32)$$

У графічному вигляді кінетичні рівняння (6.31, 6.32) приведені на рисунку 6.10.

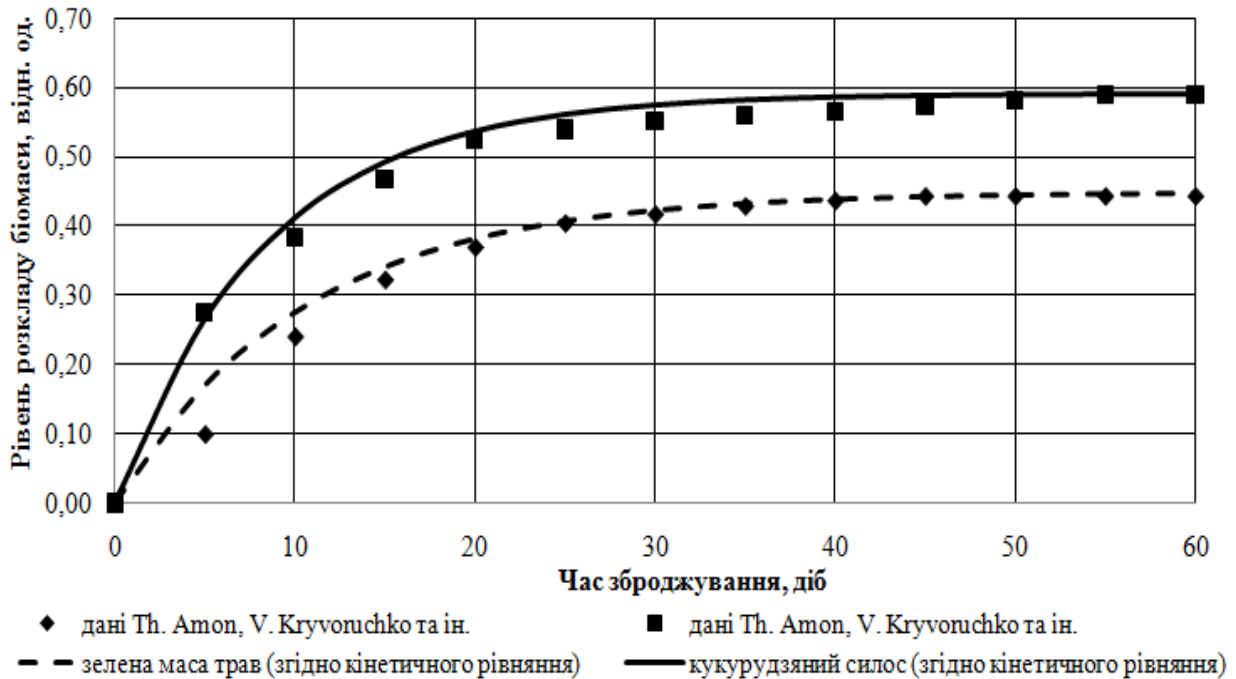


Рис. 6.10. Кінетика процесу біогазової ферментації органічної сировини

Таким чином, швидкість процесу анаеробної ферментації кукурудзяного силосу на чверть перевищує швидкість процесу анаеробної ферментації біомаси зеленої маси трав.

6.5. Розрахунок питомого виходу біометану

Розрахунок проведемо із урахуванням виходу біометану за нормальних умов на основі біогазового реактора, що працює на гноївці скотарських та свинарських ферм. Приймаємо вихід гноївки густиною $1050 \text{ кг}_{\text{БМ}}/\text{м}^3_{\text{БМ}}$ та вологістю 92 % – 1 т за добу. Вміст органічної маси в сухій масі біомаси гноївки – 80 %. Інтенсивність розкладу органічної біомаси гноївки – 3 % за добу. Вихід біогазу із розрахунку на одиницю розкладеної органічної маси – $1,1 \text{ кг}_{\text{БГ}}/\text{кг}_{\text{РОМ}}$. Максимальний рівень розкладу органічної біомаси – 30%. Параметри біомаси гноївки приведені у таблиці 6.4.

Вихід біогазу при зброджуванні у перерахунку на нормальні умови може бути визначений наступним чином:

$$\begin{aligned}
 V_{\text{БГ}} &= \rho_{\text{БМ}} \left(1 - \frac{W_{\text{БМ}}}{100} \right) k_{\text{ОМ}} k_{\text{ОМ}}^P \frac{m_{\text{БГ}}}{\rho_{\text{БГ}}^H} = \\
 &= 1050 \left(1 - \frac{92}{100} \right) 0,8 \cdot 0,02 \frac{1,1}{1,199} = 1,23 \text{ м}^3_{\text{БГ}} / \text{м}^3_{\text{БМ}} \text{ за добу,}
 \end{aligned}$$

де $V_{БГ}$ – питомий вихід біогазу із реактора за нормальних умов, $м^3_{БГ}/м^3_{БМ}$ за добу; $\rho_{БМ}$ – щільність біомаси, $кг_{БМ}/м^3_{БМ}$; $W_{БМ}$ – вологість біомаси, %; $\left(1 - \frac{W_{БМ}}{100}\right)$ – вміст сухої речовини по відношенню до загальної кількості біомаси, $кг_{СМ}/кг_{БМ}$; $k_{ОМ}$ – вміст органічної маси по відношенню до загальної кількості сухої маси у біомасі, що зброджується, $кг_{ОМ}/кг_{СМ}$; $k_{ОМ}^P$ – кількість розкладеної за добу органічної маси по відношенню до загальної кількості органічної маси, $кг_{РОМ}/кг_{ОМ}$ за добу; $m_{БГ}$ – вихід біогазу в розрахунку на одиницю розкладеної органічної маси, $кг_{БГ}/кг_{РОМ}$; $\rho_{БГ}^H = 1,199 кг_{БГ}/м^3_{БГ}$ – щільність біогазу за нормальних умов.

Таблиця 6.4. Параметри біомаси гноївки

Показник	Од. виміру	Значення
Густина біомаси (БМ) гноївки	$кг_{БМ}/м^3_{БМ}$ ($т_{БМ}/м^3_{БМ}$)	1050 (1,05)
Вологість	%	92
Вміст води (В)	$кг_{В}/кг_{БМ}$	0,92
	$кг_{В}/т_{БМ}$	920
Вміст сухої маси (СМ)	% від БМ	8
	$кг_{СМ}/кг_{БМ}$	0,08
	$кг_{СМ}/т_{БМ}$	80
Вміст органічної маси (ОМ)	% від ОМ	80
	$кг_{ОМ}/кг_{СМ}$	0,8
	$кг_{ОМ}/т_{БМ}$	64
Інтенсивність розкладу органічної біомаси гноївки	% ОМ за добу	2,0
	$кг_{РОМ}/кг_{ОМ}$ за добу	0,02
Максимальний рівень розкладу органічної біомаси	%	30

У той же час питомий вихід біометану становитиме (табл. 6.5):

Таблиця 6.5. Розрахунок виходу біогазу та біометану

Концентрація метану в біогазі	%	61,1
Вихід біогазу із розкладеної органічної маси за нормальних умов	$кг_{БГ}/кг_{РОМ}$	1,1
	$м^3_{БГ}/кг_{РОМ}$	$1,1/1,199=0,92$
Вихід біогазу із реактора за нормальних умов	$м^3_{БГ}/м^3_{БМ}$ за добу	1,23
	$м^3_{БГ}/т_{БМ}$ за добу	$1,23/1,05=1,17$
Вихід біометану за нормальних умов	$м^3_{СН_4}/м^3_{БМ}$ за добу	$1,23 \times 0,611=0,752$
Час зброджування	діб	$30/2=15$
Загальний вихід біогазу	$м^3_{БГ}/м^3_{БМ}$	$1,23 \times 15=18,45$

$$V_{CH_4} = V_{БГ} k_{CH_4} = 1,23 \cdot 0,611 = 0,752 \text{ м}^3_{БГ} / \text{м}^3_{БМ} \text{ за добу},$$

де V_{CH_4} –питомий вихід біометану із реактора за нормальних умов, $\text{м}^3_{CH_4} / \text{м}^3_{БМ}$ за добу; $k_{CH_4} = 0,611 \text{ м}^3_{CH_4} / \text{м}^3_{БГ}$ –об'ємний вміст біометану в біогазі.

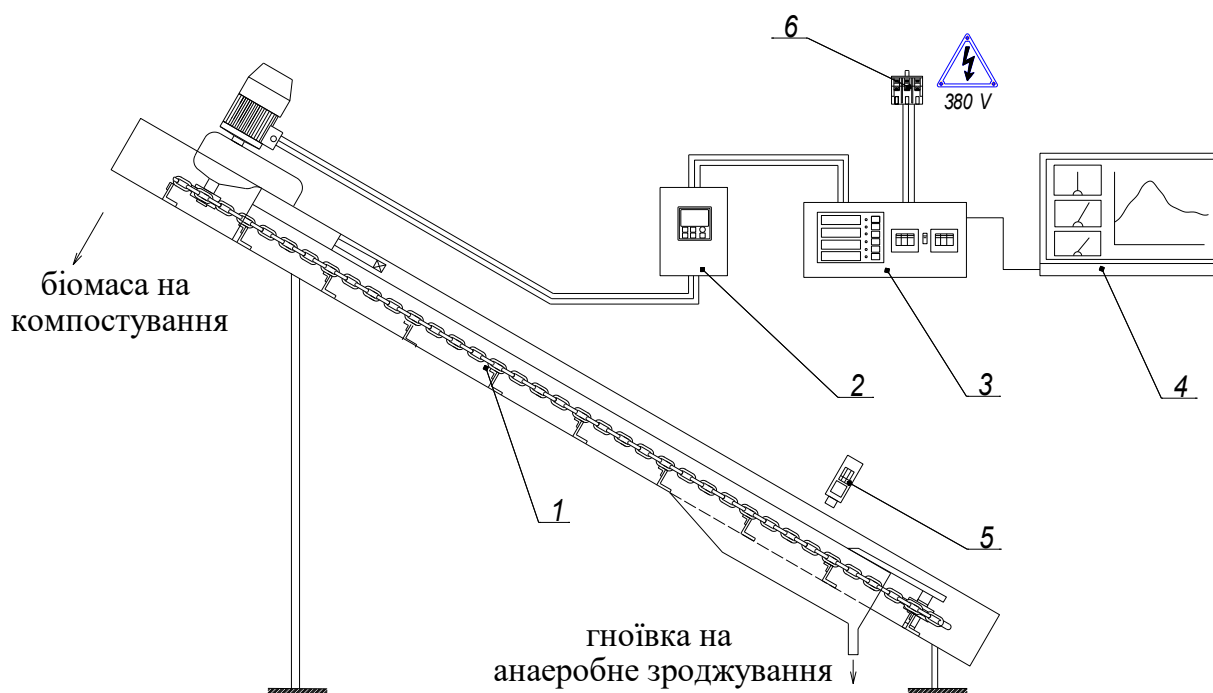
Таким чином, основним напрямком інтенсифікації процесу зброджування гною є підвищення рівня розкладу органічної маси за рахунок створення відповідних умов для розвитку анаеробної мікрофлори.

Лабораторна робота 6: Визначення параметрів похилого транспортера для зневоднення біомаси при підготовці до аеробного та анаеробного зброджування

Мета роботи: Ознайомитись із принципом дії похилого транспортера при зневодненні біомаси. Визначити споживану потужність транспортера в залежності від його швидкості руху.

Прилади та обладнання: похилий транспортер, частотний перетворювач струму, аналізатор параметрів мережі, комп'ютер з програмним забезпеченням, лазерний вимірювач швидкості руху, секундомір.

Після ознайомлення з конструкцією похилого транспортера для зневоднення біомаси та необхідним обладнанням, згідно схеми (рис. 6.11) монтується обладнання та підключається необхідні прилади.



1 – похилий транспортер; 2 – частотний перетворювач струму; 3 – аналізатор параметрів мережі; 4 – комп'ютер з програмним забезпеченням; 5 – лазерний вимірювач швидкості руху; 6 – трифазна електрична мережа

Рис. 6.11. Схема підключення приладів для визначення параметрів похилого транспортера

Вимірювання проводяться у наступному порядку. Спочатку на похилому транспортері відміряється відстань проходження скребка ланцюгово-скребкового транспортера. Після цього за допомогою секундоміра визначається час за який скребок подолає цю відстань при різних значеннях частоти струму (вимірювання проводяться у трьох повторностях для кожного значення частоти струму), одночасно за допомогою аналізатора параметрів мережі знімаються значення величини споживаної потужності.

Результати вимірів заносяться в таблицю 6.6.

Таблиця 6.5. Результати вимірювань параметрів похилого транспортера для зневоднення біомаси

Назва параметру	Частота струму	Відстань руху скребка	Час руху (три повторності)	Швидкість руху	Середня споживана потужність
Позначення	f	s	t	V	P
Од. виміру	Гц	м	с	м/с	Вт
дослід 1	50	3	4,6; 4,5; 4,6	0,65	420
дослід 2	40	3	5,6; 5,8; 5,7	0,53	380
дослід 3	30	3	7,5; 7,5; 7,6	0,40	340
дослід 4	20	3	11,2; 10,9; 11,0	0,27	290

Результати дослідів у графічному вигляді приведені на рис. 6.11.

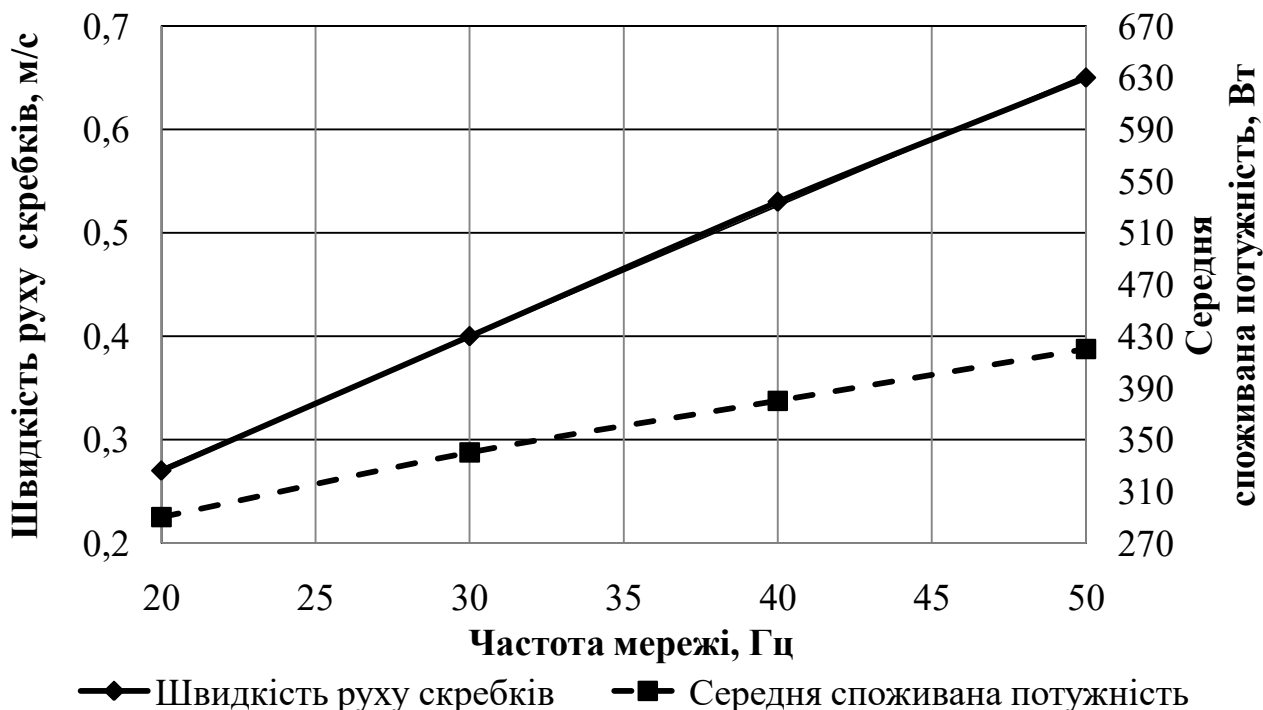


Рис. 6.11. Залежність швидкості руху скребків та середньої споживаної потужності від частоти струму

Таким чином встановлено, що для похилого транспортера зі збільшенням частоти електричної мережі від 20 до 50 Гц відбувається збільшення швидкості

руху скребків з 0,28 до 0,64 м/с, а середнє значення спожитої потужності збільшується із 350 до 380 Вт.

Практична робота 6: Розрахувати основні технологічні параметри біогазової установки для зброджування гною.

Вихідні дані: Поголів'я свиноматок – $n_{CM} = 37$ гол., поголів'я дійних корів – $n_{DK} = 44$ гол. Добова кількість гноївки для свинарника та корівника становить $Q_{ГНС} = 561$ кг/добу та $Q_{ГНК} = 282$ кг/добу. Вихід біогазу при зброджуванні у перерахунку на нормальні умови та на одиницю об'єму біомаси $V_{BG} = 1,23 \text{ м}^3_{BG} / \text{м}^3_{BM}$ за добу, питомих вихід біометану – $V_{CH_4} = 0,752 \text{ м}^3_{BG} / \text{м}^3_{BM}$ за добу. Густина гноївки, $\rho_{ГН} = 1050 \text{ кг}_{BM} / \text{м}^3_{BM}$.

Встановлено, що анаеробне зброджування має два температурні оптимуми: для мезофільного процесу – 33°C і для термофільного – 54°C . Не дивлячись на те, що процес розкладу органіки в термофільних умовах проходить в 14 разів інтенсивніше, ніж в мезофільних, а кількість отриманого біогазу на 25-30 % вища, ці процеси мають меншу стабільність, ніж мезофільні, а допустимі коливання температури значно знижуються. При мезофільному режимі вони становлять $\pm 2,8^\circ\text{C}$, а при термофільному режимі – не повинні перевищувати $\pm 0,3^\circ\text{C}$. У зв'язку з цим, на практиці, як правило використовується мезофільний або термотолерантний (38°C) режим анаеробного зброджування.

Загальний вихід гноївки за добу $Q_{ГН}$ та її об'єм $V_{ГН}$ становлять:

$$Q_{ГН} = Q_{ГНС} + Q_{ГНК} = 561 + 282 = 843 \text{ кг/добу};$$

$$V_{ГН} = \frac{Q_{ГН}}{\rho_{ГН}} = \frac{843}{1050} = 0,8 \text{ м}^3/\text{добу}.$$

Біогазова установка повинна належати до ферми, де наявна сировинна база для її роботи. Навіть, якщо необхідно прокласти декілька метрів газових труб – це дешевше ніж транспортування сировини.

Для переробки сировини при мезофільному режимі рекомендується використовувати дозу добового завантаження, що дорівнює 7% від об'єму завантаженої в реактор сировини, для термотолерантного – 10%, для термофільного процесу – 15 %, а тому загальний об'єм біосировини в реакторі V_{CP} при термотолерантному процесі, становитиме:

$$V_{CP} = \frac{V_{ГН}}{0,1} = \frac{0,8}{0,1} = 8 \text{ м}^3.$$

Об'єм біомаси в реакторі на повинен перевищувати 2/3 об'єму реактора, а тому загальний об'єм реактора V_P становитиме:

$$V_P = 1,5V_{CP} = 1,5 \cdot 8 = 12 \text{ м}^3.$$

Вихід біогазу у перерахунку на нормальні умови становитиме:

$$V_{\text{Біогаз}} = V_{CP} V_{BG} = 8 \cdot 1,23 = 9,84 \text{ м}^3/\text{добу},$$

а вихід метану:

$$V_{\text{Метан}} = V_{\text{CP}} V_{\text{БГ}} = 8 \cdot 0,752 = 6,02 \text{ м}^3/\text{добу.}$$

Відносний вихід твердої фракції біомаси після зброджування $M_{\text{ТФ}}$, становитиме:

$$M_{\text{ТФ}} = \frac{W_{\text{РФ}} - W_{\text{БМ}}}{W_{\text{РФ}} - W_{\text{ТФ}}} = \frac{98 - 92}{98 - 87} = 0,545 \text{ од.},$$

де $W_{\text{РФ}}=98\%$ – вологість рідкої фракції; $W_{\text{БМ}}=92\%$ – вологість біомаси, що завантажується в реактор; $W_{\text{ТФ}}=87\%$ – вологість твердої фракції біомаси після зброджування.

Відносний вихід рідкої фракції біомаси після зброджування $M_{\text{РФ}}$, становить:

$$M_{\text{РФ}} = \frac{W_{\text{БМ}} - W_{\text{ТФ}}}{W_{\text{РФ}} - W_{\text{ТФ}}} = \frac{92 - 87}{98 - 87} = 0,455 \text{ од.},$$

Частина отриманого біогазу використовується для підігрівання процесу анаеробного зброджування біомаси. Вихід товарного біогазу залежить від кількості біогазу, який використовується для підігрівання бродіння біомаси та витрат теплової енергії при анаеробному бродінні, які у свою чергу залежать від природно-кліматичних умов розміщення господарства, режиму роботи і конструкційних особливостей біогазової установки.

Кількість теплової енергії, необхідної для підігрівання біомаси, яка зброджується у термотолерантному режимі ($T_{\text{БР}}=38^\circ\text{C}$), визначається для холодного $Q_{\text{БМХ}}$ та теплового $Q_{\text{БМТ}}$ періоду року за формулами:

$$Q_{\text{БМХ}} = Q_{\text{ГН}} c_{\text{БМ}} (T_{\text{БР}} - T_{\text{ГНХ}}) = 843 \cdot 4 \cdot (38 - 10) 10^{-3} = 94,4 \text{ МДж/добу,}$$

$$Q_{\text{БМТ}} = Q_{\text{ГН}} c_{\text{БМ}} (T_{\text{БР}} - T_{\text{ГНТ}}) = 843 \cdot 4 \cdot (38 - 20) 10^{-3} = 60,7 \text{ МДж/добу,}$$

де $c=4$ кДж/кг $^\circ\text{C}$ – питома теплоємність біомаси; $T_{\text{ГНХ}}=10^\circ\text{C}$ – температура біомаси для холодного періоду року (120 діб) та $T_{\text{ГНТ}}=20^\circ\text{C}$ – температура біомаси для теплового періоду року (245 діб).

Загальна кількість теплової енергії, необхідної для підігрівання біомаси $Q_{\text{БМ}}$, становить:

$$Q_{\text{БМ}} = 120 Q_{\text{БМХ}} + 245 Q_{\text{БМТ}} = 120 \cdot 94,4 + 245 \cdot 60,7 = 26200 \text{ МДж/рік.}$$

Кількість біогазу, необхідного для підігріву біомаси $V_{\text{ПБМ}}$, визначається за формулою:

$$V_{\text{ПБМ}} = \frac{Q_{\text{БМ}}}{\gamma_{\text{М}} q_{\text{М}}} = \frac{26200}{0,6 \cdot 36} = 1213 \text{ м}^3$$

де: $\gamma=0,6$ – вміст метану в біогазі, відн. од.; $q_{\text{М}}=36$ МДж/м 3 – теплотворна здатність метану.

Частка біогазу $\eta_{\text{БГ}}$, необхідного для підігріву біомаси, визначається за формулою:

$$\eta_{\text{БГ}} = \frac{V_{\text{ПБМ}}}{365 V_{\text{Біогаз}}} = \frac{1213}{365 \cdot 9,84} = 0,34 \text{ відн. од.}$$

На основі цього визначається коефіцієнт виходу товарного біогазу, $k_{\text{БГ}}$:

$$k_{BG} = 1 - \eta_{BG} = 1 - 0,34 = 0,66 \text{ відн. од.}$$

Річний вихід товарного біогазу V_{TBG} та товарного метану V_{TM} відповідно становитиме:

$$V_{TBG} = 365V_{\text{Біогаз}} k_{BG} = 365 \cdot 9,84 \cdot 0,66 = 2370 \text{ м}^3/\text{рік};$$

$$V_{TM} = 365V_{\text{Метан}} k_{BG} = 365 \cdot 6,02 \cdot 0,66 = 1450 \text{ м}^3/\text{рік}.$$

При використанні когенераційної установки річне виробництво електроенергії W_E та тепла W_T становитиме:

$$W_E = 365V_{\text{Метан}} q_M \frac{k_E}{k_{II}} = 365 \cdot 6,02 \cdot 36 \cdot \frac{0,38}{3,6} = 8350 \text{ кВт год./рік};$$

$$W_T = 365V_{\text{Метан}} q_M k_T = 365 \cdot 6,02 \cdot 36 \cdot 0,62 = 49044 \text{ МДж/рік}.$$

де: $k_E=0,38$ – коефіцієнт корисної дії когенераційної установки по виробництву електроенергії, відн. од.; $k_T=0,62$ – коефіцієнт виробництва тепла когенераційною установкою, відн. од.; $k_{II}=3,6$ кВт год./МДж – коефіцієнт перерахунку.

Річний вихід товарної електроенергії V_{TBG} та товарного тепла V_{TM} відповідно становитиме:

$$W_{TT} = W_E (1 - k_{BC}) = 8350 \cdot (1 - 0,2) = 6680 \text{ кВт год./рік};$$

$$W_{TT} = W_T - Q_{BM} = 49044 - 26200 = 22844 \text{ МДж/рік}.$$

де: $k_{BC}=0,2$ – коефіцієнт споживання електроенергії на власні цілі, відн. од.

Таким чином, товарний біогаз доцільно використовувати для виробництва електроенергії.

Запитання для самоконтролю:

1. Які основні способи переробки гною?
2. Яке повинно бути співвідношення вуглецю і азоту у компостній суміші?
3. Які бувають способи анаеробної ферментації?
4. Як система видалення і переробки гною впливає на обсяги гноєсховищ?
5. Що таке біогаз?
6. Завдяки якому процесу утворюється біогаз?
7. Чим біогаз вироблений із біомаси відрізняється від природного газу?
8. З якої сировини може вироблятися біогаз?
9. Охарактеризуйте сучасний стан біогазових технологій.
10. Чому виробництво біогазу є однією з безвідходних технологій?
11. Які два основні види підготовки і бродіння сировини використовуються у біогазових технологіях?
12. Охарактеризуйте мікробіологічні основи процесу виробництва біогазу.
13. Скільки груп бактерій бере участь у виробництві біогазу? Назвіть їх.
14. Дайте класифікацію метаноутворюючим бактеріям за температурним режимом.

15. Які основні елементи конструкції мають твердофазні біогазові установки?
16. Які основні показники твердофазного бродіння в існуючих біореакторах?
17. Чим обумовлена низька ефективність процесу виділення метану під час твердофазного бродіння?
18. Які основні елементи конструкції мають рідкофазні біогазові установки?
19. Які основні недоліки рідкофазних біогазових реакторів?
20. Охарактеризуйте першу та другу стадії анаеробного зброджування біомаси.
21. Який масовий вихід метану та вуглекислого газу під час анаеробної ферментації 1 кг органічної речовини?
22. Який основний напрям інтенсифікації процесу рідкофазного зброджування біомаси гною?
23. В яких межах повинна бути вологість біомаси при використанні рідкофазного анаеробного зброджування?
24. Чим обумовлена нижня межа вологості біомаси при використанні рідкофазного анаеробного зброджування?
25. Чим обумовлена верхня межа вологості біомаси при використанні рідкофазного анаеробного зброджування?
26. Які основні типи мішалок використовуються для перемішування біомаси при рідкофазному анаеробному зброджуванні?
27. Який вихід біогазу можна отримати з 1 т біомаси при рідкофазному анаеробному зброджуванні?
28. Який питомий вихід біогазу мають сучасні рідкофазні біогазові установки?
29. Який максимальний рівень розкладу органічної речовини біомаси під час рідкофазного анаеробного зброджування?

Література:

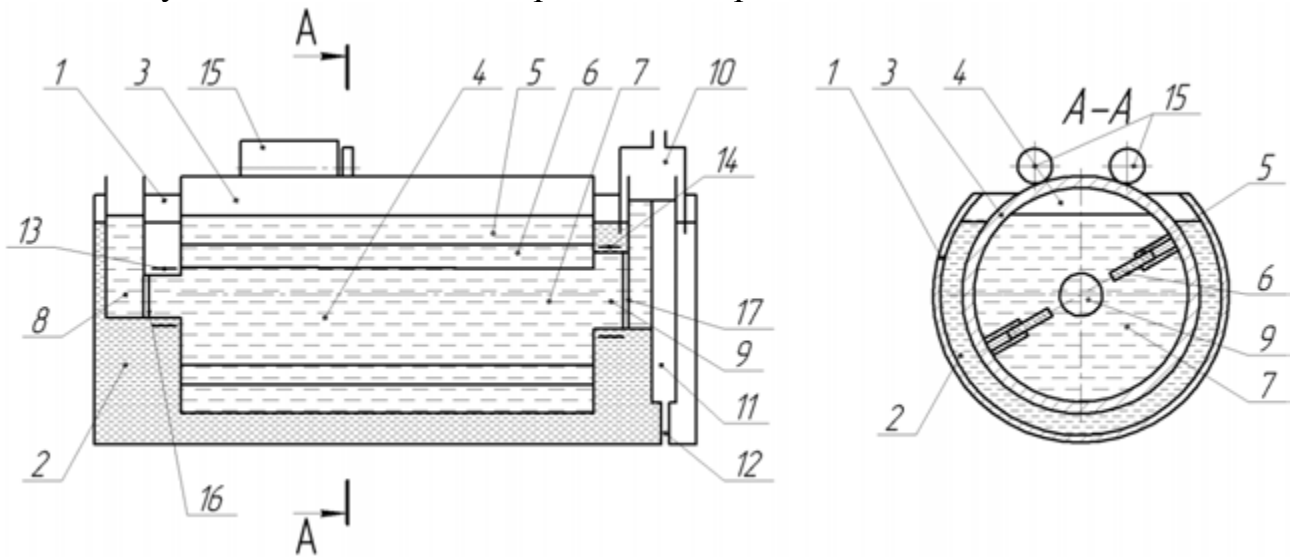
1. Голуб Г.А. Агропромислове виробництво їстівних грибів. Механіко–технологічні основи / Г.А. Голуб. – К.: Аграрна наука, 2007. – 332 с.
2. Руководство по биогазу от получения до использования/: Идентификационный номер проекта (FKZ/ИНП): 22005108/ Немецкий центр исследования биомассы Torgauer Straße 116- 04347 Leipzig [5-е полностью перераб. изд.] Гюльцов,; издано агентством по возобновляемым ресурсам (FNR) Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2010. – 214 с.
3. Системи видалення, обробки, підготовки, та використання гною: ВНТП–АПК 09.06. Офіц. видання / – К.: Міністерство аграрної політики України 2006. – 100 с.
4. Экологическая биотехнология: Пер. с англ. / Под ред. К.Ф. Форстера, Д.А. Дж. Вейза. – Л.: Химия, 1987. – 384 с.
5. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. / Кухлинг Х. // 2-е изд. – М.: Мир, 1985. – 520 с.

6. Руководство по биогазу. От получения до использования / Специальное агентство возобновляемых ресурсов (FNR). 5-е издание. – Гюльцов: Германия, 2012. – 213 с.
7. Технічне забезпечення виробництва біогазу / [Голуб Г.А., Дубровіна О.В., Рубан Б.О., Войтенко В.О.]: Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: технічні науки. – Вінниця, 2012. – Вип. 10. – 186 с. – С. 17–19.
8. Голуб Г.А. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок / [Голуб Г., Войтенко В., Рубан Б., Єрмоленко В.]: Техніка і технології АПК. – 2012. – № 2 (29). – С. 18–21.
9. Національна комісія регулювання електроенергетики України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.nerc.gov.ua/control/uk/publish/article/main?art_id=34197&cat_id=27394.
10. [Amon T., Kryvoruchko V., Amon B., Buga S., Mayer K., Zollitsch W., Pötsch E.] (2003): Biogas aus Kleegras, Feldfutter- und Dauerwiesenmischungen. Der fortschrittliche Landwirt, 22, 52–53.
11. Франс Дж. Математические модели в сельском хозяйстве / Дж. Франс, Дж. Х. М. Торнли: Пер. с англ. А.С. Калянского. – М.: Агропромиздат, 1987. – 400 с.
12. Огороднік А.І. Кінетична модель процесу компостування субстрату у рибництві / Огороднік А.І., Голуб Г.А. // Міжвідомчий тематичний науковий збірник "Механізація та електрифікація сільського господарства". – К. – 1997. – Вип. 82. – С. 67–70.
13. Холькин Ю.И. Технология гидролизных производств / Холькин Ю.И. – М.: Лесная промышленность, 1989. – 496 с.
14. Голуб Г.А. Досвід виробництва і використання біогазу в Республіці Польща / Г.А. Голуб, С.В. Лук'янець // Економіка АПК. – 2011. – № 11. – С. 157–160.
15. Кухарець С.М., Голуб Г.А. Обґрунтування енергетичних витрат на привід обертового реактора біогазової установки. – Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: Збірник наукових праць / ДНУ "УкрНДІ прогнозування та випробування техніки і технологій для с.-г. виробництва імені Леоніда Погорілого" (УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого); Редколегія: Кравчук В.І. (головний редактор) та інші – Дослідницьке, 2014. – Вип. 18 (32), книга 2. – 387 с. – С. 356-364.
16. Марус О.А., Голуб Г.А. Аналіз конструкцій реакторів для твердофазної ферментації / О.А. Марус, Г.А. Голуб, // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК / Редкол.: С.М. Ніколаєнко (відп. ред.) та ін. – К., 2016. – Вип. 241. – 396 с. – С. 380–387.
17. Голуб Г., Войтенко В., Рубан Б., Єрмоленко В. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок. – Техніка і технології АПК. – 2012. – № 2 (29). – С. 18-21.

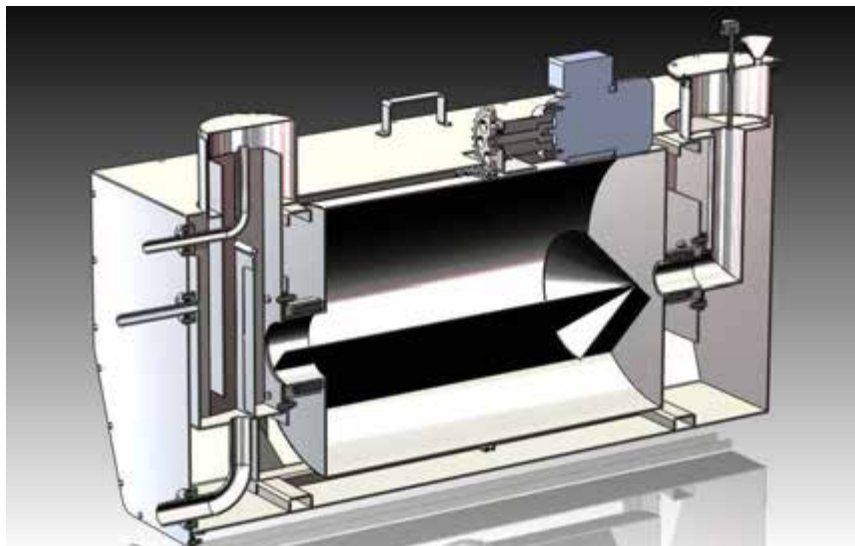
7. ВИРОБНИЦТВО ТА ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗУ НА ТЕПЛОВІ ПОТРЕБИ

7.1. Енергетичні параметри та конструкція біогазової установки з обертовим реактором

Перемішування за допомогою біогазу можливе при вмісті сухої речовини в біогазі нижче 5%. Механічне перемішування має труднощі при вмісті в сировині більше 10% сухої речовини. Тому нами була розроблена модульна біогазова установка, схема якої приведена на рис. 7.1.



а



б

1 – горизонтальний зовнішній корпус; 2 – рідина; 3 – циліндричний реактор; 4 – камера зброджування; 5 – перегородка; 6 – рухомі пластини; 7 – органічна маса; 8, 9, 12 – патрубки; 10 – газозбірник; 11 – вивантажувальна камера; 13, 14 – підшипникові вузли; 15 – зовнішній привод; 16, 17 – блок-ущільнення

а – схема; б – модель

Рис. 7.1. Установка біогазова модульного типу

В конструкції розробленої модульної біогазової установки розглядаються принципово нові технічні рішення в системі перемішування реагуючого субстрату в метановому реакторі. Вони полягають у використанні зміни напрямку дії гравітаційних сил, що впливають на переміщення органічної і мінеральної фракцій біомаси, які заповнюють внутрішній корпус. Корпус біореактора виконано у вигляді горизонтального циліндра з діаметрально розміщеною перегородкою, який обертається навколо горизонтальної осі, опираючись на протилежно розміщені осьові цапфи. Реактор біогазової установки заповнюється інокульованою біомасою та обертається в рідині, яка знаходиться в зовнішньому корпусі. Така конструкція створює підймальну силу для обертового біореактора, розвантажуючи опорні цапфи, що зменшує сили тертя в них і відповідно зменшує енергію, яка витрачається на обертання і перемішування завантаженої біомасою конструкції. Дана конструкція біореактора забезпечує перемішування реагуючого субстрату по всьому його об'ємі і ліквідує можливість створення плаваючої органічної частини та зануреного мінерального осаду.

Для того щоб забезпечити обертання реактора необхідно прикласти крутний момент, величина якого становить:

$$M_{KP} = M_{OP} + M_{BTZ} + M_{BTV} + M_{PB} - M_{OB} + J \frac{d\omega}{dt}, \quad (7.1)$$

де M_{KP} – крутний момент для забезпечення обертання реактора, Н м; M_{OP} – момент опору підшипникових вузлів, Н м; M_{BTZ} – момент в'язкого тертя зовнішньої поверхні реактора об рідину, в яку занурений реактор, Н м; M_{BTV} – момент в'язкого тертя внутрішньої поверхні реактора об рідку біомасу, яка знаходиться в реакторі, Н м; M_{PB} – момент, необхідний для забезпечення підйому біомаси в реакторі під час його обертання, Н м; M_{OB} – момент, що створюється за рахунок потоків опускання біомаси в реакторі під час його обертання, Н м; J – момент інерції метантенка відносно осі його обертання, кг м²; $\frac{d\omega}{dt}$ – кутове прискорення обертання реактора, рад./с².

Помноживши кожен член рівняння (7.1) на кутову швидкість обертання реактора отримаємо:

$$P_{KP} = P_{OP} + P_{BTZ} + P_{BTV} + P_{PB} - P_{OB} + J\omega \frac{d\omega}{dt}, \quad (7.2)$$

де ω – кутова швидкість обертання реактора, рад./с; P_{KP} – потужність для забезпечення обертання реактора, Вт; P_{OP} – потужність опору підшипникових вузлів, Вт; P_{BTZ} – потужність в'язкого тертя зовнішньої поверхні реактора об рідину, в яку занурений реактор, Вт; P_{BTV} – потужність в'язкого тертя внутрішньої поверхні реактора об рідку біомасу, яка знаходиться в реакторі, Вт; P_{PB} – потужність для забезпечення підйому біомаси в реакторі під час його обертання, Вт; P_{OB} – потужність, потоків опускання біомаси в реакторі під час його обертання, Вт.

Потужність, яка споживається привідним електродвигуном із електричної мережі, таким чином становитиме:

$$P = \left(P_{ОП} + P_{ВТЗ} + P_{ВТВ} + P_{ПБ} - P_{ОБ} + J\omega \frac{d\omega}{dt} \right) (\eta_{ЕД} \eta_{П} \cos\varphi)^{-1}, \quad (7.3)$$

де P – потужність, яка споживається привідним електродвигуном із електричної мережі, Вт; $\eta_{ЕД}$ – коефіцієнт корисної дії електродвигуна, відн. од.; $\eta_{П}$ – коефіцієнт корисної дії приводу, відн. од.; $\cos\varphi$ – частка активної потужності у повній потужності електродвигуна, відн. од.

Аналізуючи даний вираз, який по суті є енергетичним балансом приводу обертового реактора, можна сказати, що постійне значення споживаної потужності буде лише при повному заповненні внутрішнього об'єму метантенка. Зважаючи на специфіку роботи реактора, коли частина його об'єму завжди буде заповнена біогазом, можна зробити висновок про те, що внутрішні перетоки рідини в реакторі призведуть до циклічних поштовхів, які будуть порушувати статичну рівновагу обертового реактора і призводити до циклічної зміни навантаження. Фактична зміна споживаної електричної потужності, що витрачається на привід заповненого на 96 % експериментального обертового реактора з внутрішнім об'ємом 75,55 л (діаметр 0,4 м) та його зануренні у рідину на 75 % приведена на рис. 7.2).

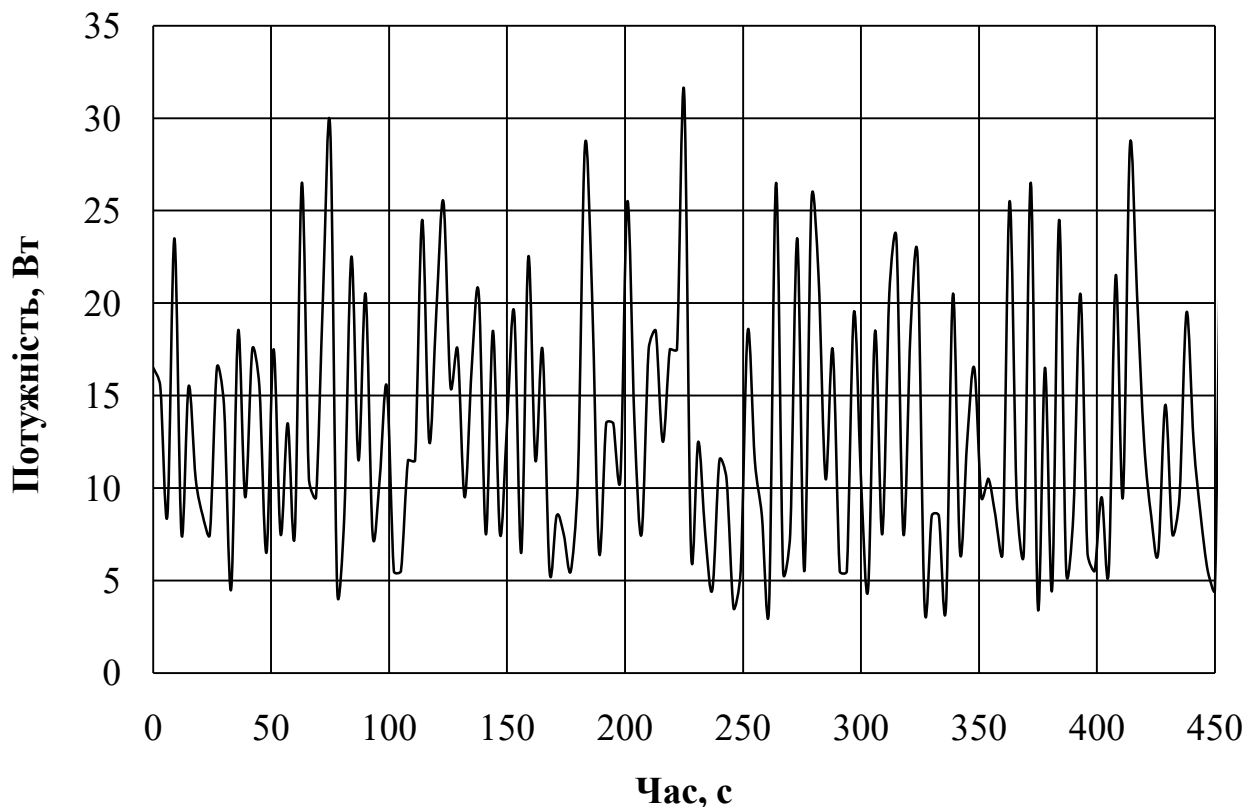


Рис. 7.2. Зміна споживаної електричної потужності під час роботи обертового реактора

Середнє значення споживаної потужності необхідної для приводу обертового реактора в залежності від його коефіцієнта занурення приведена на рис. 7.3.

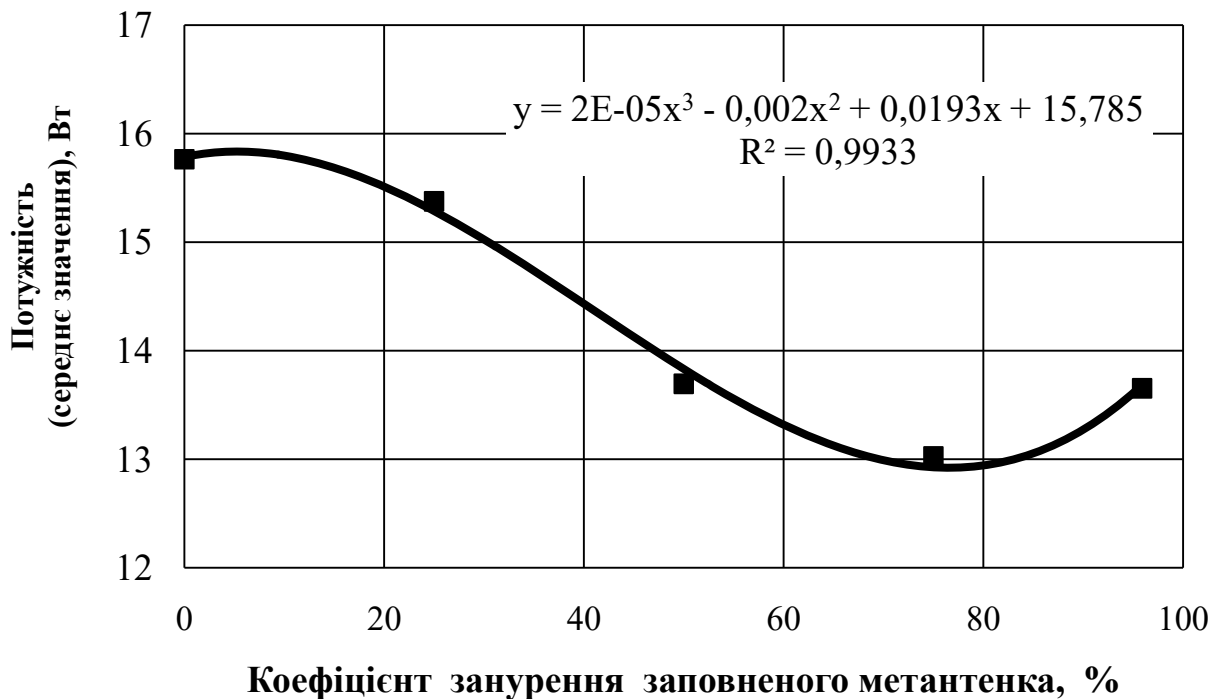


Рис. 7.3. Вплив коефіцієнта занурення заповненого обертового метантенка на потужність приводного механізму

Аналіз показує, що при збільшенні коефіцієнта занурення обертового реактора в рідину, середнє значення споживаної потужності зменшується до досягнення мінімального значення, що обумовлено зменшенням витрат на опір у підшипникових вузлах за рахунок компенсації сили ваги силою Архімеда. При подальшому збільшенні коефіцієнта занурення обертового реактора середнє значення споживаної потужності дещо збільшується за рахунок збільшення тертя в підшипниках метантенка, через перекомпенсацію сили ваги силою Архімеда. Так, наприклад, заповнений на 96 % обертовий реактор з внутрішнім об'ємом 75,55 л (діаметр 0,4 м) потребує мінімальної потужності для приводу близько 13 Вт при його зануренні у рідину на величину від 75 до 77%. При цьому питома потужність приводного механізму в розрахунку на об'єм біомаси в реакторі становитиме 0,179 кВт/м³.

Проведенні в Національному університеті біоресурсів і природокористування України дослідження дозволили встановити основні конструкційні параметри модульних метантенків (табл. 7.1).

7.2. Технологічний процес отримання біогазу за допомогою біогазової установки з обертовим біореактором

В залежності від системи утримання тварин, видалення гною з приміщень може здійснюватись скребковими транспортерами або гідравлічним змивом. В залежності від фізичного, хімічного та фракційного складу видаленого з приміщень гною, в накопичувачах використовується відповідне технологічне

обладнання. Це обладнання для перемішування (механічні лопатеві мішалки, лопатеві насоси типу НУІ-Ф-100), подрібнювачі (ріжучі дробарки, насоси-подрібнювачі типу СД-50) та насоси фекальні відцентрові.

Таблиця 7.1. Рациональні конструкційні параметри біогазових обортових реакторів

Робочий діаметр реактора, D , м	Товщина стінок реактора s , м	Діаметр зовнішнього корпусу D_3 , м	Робоча довжина L , м	Вага реактора m_p , кг	Коефіцієнт заповнення біомасою k_3	Об'єм завантаженої біомаси (максимальний) V_B , м ³	Потужність на обертання реактора $N_{кр}$, Вт
1	0,003	1,2	4	200	0,9	3,0	299
2	0,005	2,4	4	424	0,9	11,5	1197
3	0,005	3,6	4	895	0,9	26,5	2661
4	0,005	4,8	6	1979	0,9	71,0	7114

Витрати електроенергії на етапі низькотемпературної підготовки сировини складаються із витрат на подачу біосировини до пристрою розділення біомаси, на роботу розділювача, подрібнювача та на перекачку підготовленої біосировини до підігрівача-витримувача.

При проведенні аеробного етапу підготовки сировини, для нагріву біосировини до температури 38-55 °С та забезпечення заданої кислотності, в складі технологічного обладнання аеробної стадії біопроцесу використовується підігрівач-витримувач, теплоносієм в якому є вода з температурою 75-80 °С. Циркуляція біомаси при теплообміні, вивантаження та інокуляція підготовленої до анаеробного зброджування біомаси забезпечується фекальним центробіжним насосом, який подає готовий субстрат дозовано до метанового реактора через задані інтервали часу.

Для аеробної підготовки біосировини використовується підігрівач витримувач. Оптимальним в енергетичному плані та прийнятним до розрахунків при розробці конструкторської документації в пропонованому процесі виробництва біогазу є мезофільний режим (від 38 до 40°С). Підігрів біосировини в аеробному біореакторі (підігрівачі-витримувачі) проводиться шляхом теплообміну між теплоносієм (вода +70°С) і акцептором тепла – субстратом з температурним діапазоном від +5°С до +25°С. Крім теплообміну, в підігрівачі-витримувачі проводиться процес утворення органічних кислот з доведенням рН до 6,9-7,0. Цей процес вимагає періодичного перемішування шарів біомаси і проходить упродовж від 1,0 до 1,5 доби. Підготовлена

біосировина перекачується до інокуляційної камери з визначеною періодичністю і дозою.

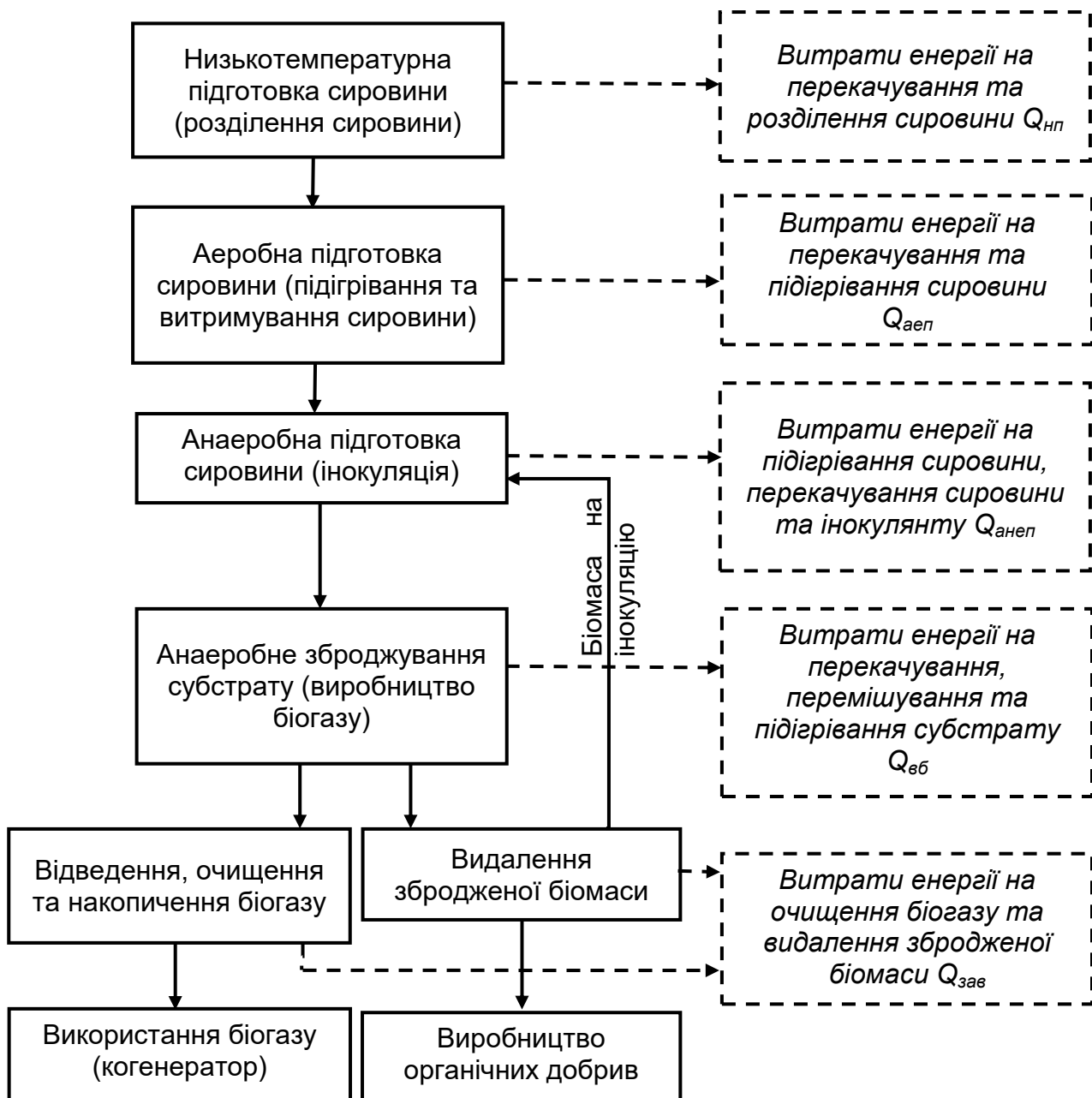


Рис. 7.4. Блок-схема технологічних етапів отримання біогазу за допомогою модульних біогазових установок

В інокуляційній камері біомаса змішується з метаноутворюючими мікроорганізмами, які надходять до камери з обертового біореактора. У цій камері проходить перша стадія метаногенезу з активним виділенням CO_2 , концентрація якого в суміші утворених газів становить більше 50%. Ці гази, будучи низькокалорійною гарячою сумішшю, відводяться і утилізуються шляхом спалювання окремо від основного газового палива. Отриманий в результаті змішування біосировини та інокулянту субстрат дозовано через

шланг подається до основної камери – анаеробного біореактора, де проходять процеси метаноутворювання.

Перемішування субстрату в обертовому біореакторі виконується за рахунок осідання важкої мінеральної складової біомаси з верхньої частини реактора в нижні шари, борботування субстрату біогазом, а також механічного перемішування при повороті біореактора на 180°. Горизонтальний рух біомаси в анаеробному реакторі забезпечується за рахунок збільшення рівня біомаси на початку руху по відношенню з гідравлічним рівнем в місці вивантаження біомаси. Така конструкція біореактора забезпечує перемішування реагуючого субстрату по всьому його об'ємі і ліквідує можливість створення плаваючої органічної частини та зануреного мінерального осаду.

Біогаз видаляється з біореактора за рахунок занурення газового об'єму в реагуючий субстрат при повороті біореактора на 180° та виходу біогазу в сторону пониженого тиску, який створюється в гідравлічному затворі під газовим ковпаком. Біогаз стабілізується по тиску величиною ваги і горизонтальною площею газового ковпака. В подальшому біогаз (CH₄ – 72 %, CO₂ – 25 % та інші) проходить очистку від CO₂ і H₂S та зберігається в газгольдерах. Стабілізований по тиску і хімічному складу біогаз іде на теплові потреби.

Зброджена біомаса видаляється з біореактора через гідрозатвор і направляється в місце її накопичення. Третина об'єму маси, що одноразово вивантажується з біореактора гвинтовим насосом, направляється на інокуляцію свіжої біомаси.

Термостабілізація біомаси в анаеробному біореакторі досягається за рахунок температури води (+42°C), в яку занурено обертовий корпус реактора. Нерухомий циліндричний корпус, який заповнений теплою водою, має трубчаті нагрівальні елементи, теплоносієм в яких є вода (+75°C). Корпус біогазової установки має зовнішню термоізоляцію.

7.3. Отримання теплової енергії на основі біогазу

Основним способом отримання теплової енергії із біомаси є його спалювання в газових котлах. Газовий котел є основним елементом опалювальної системи, тому що саме в котлах відбувається нагрів теплоносія, а також автоматичне підтримання заданої температури. Щоб підібрати оптимальний варіант виробництва тепла із біогазу слід обов'язково знати основні особливості газових котлів, їх різновиди та основні відмінності. Котли бувають для індивідуального використання (побутові), для забезпечення тепловою енергією окремої будівлі чи великого приміщення (рис. 7.5). Потужність таких котлів в основному лежить в діапазоні від 15 до 100 кВт. Також широко представлені промислові котли (рис. 7.6), потужністю до 40 МВт і навіть більше, такі котли використовують для опалення групи приміщень, підприємств чи мікрорайонів міста, села, селища.



Рис. 7.5. Побутовий газовий котел потужністю до 100 кВт



Рис. 7.6. Промисловий газовий котел потужністю до 40 МВт

Газовий опалювальний котел - це агрегат, основним призначенням якого є підігрів теплоносія для опалення приміщення, а також забезпечення гарячого водопостачання шляхом спалювання газоподібного палива. Основними видами палива для газових котлів є стиснений природний газ (метан) і зріджений пропан-бутан. Газові котли складаються із газового пальника, теплообмінника, системи димовидалення. До складу конструкції котла також може входити циркуляційний насос, запобіжний клапан, розширювальний бак, система

автоматичного контролю роботи котла, а також система захисту і блокування, для безпечної роботи котла.

Пальник - це основний елемент котла, від якого безпосередньо залежить ККД роботи всього агрегату. Головним завданням пальника є підготовка газоповітряної суміші і подача її в камеру згоряння. Теплова енергія, що утворилась в результаті роботи пальника, направляється безпосередньо в теплообмінник, де відбувається нагрів теплоносія. Далі продукти згоряння видаляються із топки за допомогою системи димовидалення.

Всі газові пальники для котлів опалення можна розділити на наступні види. Дифузний пальник - при згорянні газу відбувається його змішування з повітрям, це процес відбувається безпосередньо під час горіння. Інжекційний пальник - перед подачею в топку відбувається збагачення природного газу повітрям. Збагачення здійснюється прямо перед початком згоряння суміші. Попереднє повне змішування - газовий пальник на котел даного типу змішує повітря із газом безпосередньо перед вихідним отвором. Неповне попереднє змішування - газові атмосферні пальники для котлів. Принцип дії схожий на інжекційне обладнання, але відмінність полягає в тому, що збагачення повітрям відбувається частково. Рекуперативний пальник - схема роботи такого вузла заснована на використанні рекуператора, приладу основним призначенням якого є підігрів газу і повітря перед змішуванням. Регенеративний пальник - практично те ж саме що і рекуперативний, але нагрів відбувається за допомогою регенератора. Повітря і газ надходять в нього і досягають заданої температури, після чого надходять в топку. Пальник із наддувом - повітря надходить у топку примусово за допомогою вентилятора, після змішування.

Крім способу подачі і варіантів змішування газу і повітря існує поділ пальників за основним призначенням. Побутові газові пальники для котлів мають відносно невелику потужність, в той час, як промислові газові пальники (рис. 7.7) мають значну теплову потужність.

У порівнянні з іншими газами (табл. 7.2) біогазу потрібно менше повітря для загоряння. Для повного згоряння 1 м^3 біогазу необхідно близько $5,7 \text{ м}^3$ повітря, в той час як для бутану - $30,9 \text{ м}^3$, для пропану - $23,8 \text{ м}^3$. Отже, звичайні газові пальники і прилади потребують більш жиклерів із збільшеним поперечним перерізом для проходження біогазу. Крім того необхідно зважати на те, що переведення пальників на біогаз призводить до більш низьких рівнів тепловіддачі. Деякі практичні заходи для модифікації пальників включають: збільшення поперечного перерізу жиклерів в 2-4 рази для проходження газу, зміну об'єму подачі повітря за рахунок встановлення регулятора газоповітряної суміші. В іншому пальник для біогазу не відрізняється від пальника для природного газу.

Також можливе спалювання біогазу в кухонних плитах, проте необхідно забезпечити очищення біогазу від вісту сірчанних сполук, наприклад H_2S . Біогазові кухонні плити використовуються для приготування їжі в домашніх умовах без заміни кухонного посуду. Крім того деякі моделі можна використовувати в умовах малих підприємства громадського харчування. Та

інших господарських цілях, наприклад, нагрівання великих обсягів води для потреб сільського господарства.

Таблиця 7.2. Порівняння природного газу (метану) та біогазу

Складова	Одиниця	Природний газ	Біогаз
CH ₄	%	85...95	55...80
CO ₂	%	<1,0	20...45
N ₂	%	4...12	–
O ₂	%	<0,5	–
H ₂	%	-	<1,0
H ₂ S	мг/м ³	50...100	500...5000
Теплота згоряння	МДж/м ³	32...35	20...29

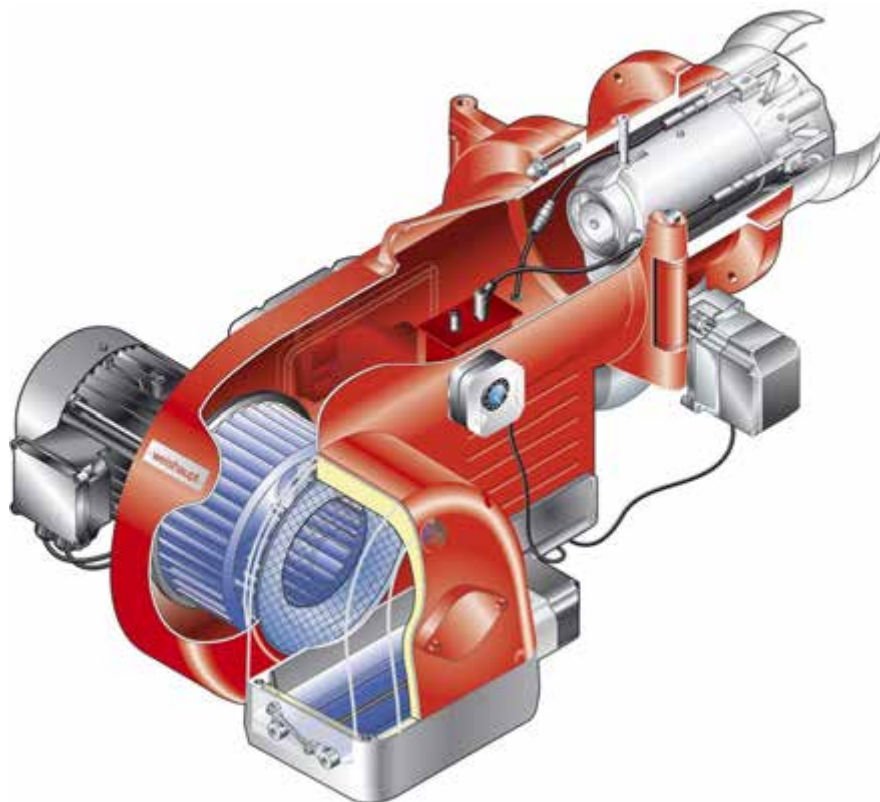


Рис. 7.7. Пальник промислового газового котла

Біогазові плити (рис. 7.8) мають зовнішню схожість з плитами, що працюють на природному газі і пропані-бутані. Однак, враховують особливості біогазу. Коли газ з великою швидкістю витікає з форсунки, то навколо струменя газу створюється розрідження і в область цього розрідження надходить повітря. Це повітря змішується в трубці пальника з газом, газоповітряна суміш потрапляє в чашку пальника і виходить назовні через сопла. Там суміш згорає. У побутовій газовій плиті відбувається попереднє змішування горючого газу в оптимальній пропорції з повітрям, тому горить вже

суміш. Звідси і виникають завдання, які потрібно вирішити, для спалювання біогазу в побутових плитах. Необхідно забезпечити правильну пропорцію газоповітряної суміші, а також швидкість потоку газу, щоб на виході з сопел пальника полум'я горіло стабільно з максимально можливим ККД у всьому діапазоні регулювання крана пальника.



Рис. 7.8. Пальник біогазової кухонної плити

Також можливе, після відповідного очищення, використання біогазу в сушарках сільськогосподарської продукції (рис. 7.9).



Рис. 7.9. Зернова сушарка із використанням біогазу

Наприклад, для сушіння однієї тони зерна пшениці від 19 до 14% вологості необхідно від 70 до 90 кВт теплової енергії, тобто необхідно спалити

від 12 до 15 м³ біогазу. Для сушіння однієї тони кукурудзи з 30 до 14% вологості потрібно від 250 до 300 кВт теплової енергії та від 42 до 50 м³ біогазу. Щоб висушити одну тону соняшника від 13 до 8% вологості потрібно від 160 до 180 кВт тепла та від 27 до 30 м³ біогазу. В сушарках 1 м³ біогазу заміщає 0,6 л дизельного палива. Дані дійсні при наступних умовах: температура навколишнього повітря + 15°C, відносна вологість повітря 65%. температура зерна + 15°C. зерно очищено від великих домішок, процес сушіння безперервний. За інших умов наведенні значення можуть відрізнятись. Сушарки, що використовують біогаз, конструкційно не відрізняються від традиційних сушарок, окрім встановлення відповідного пальника.

Значні потреби в теплоті мають також теплиці та інші сільськогосподарські споруди та будівлі. Для їх опалення також можна використовувати біогаз.

В останні роки поширюється подача біометану в мережі природного газу, оскільки за співвідношенням основних компонентів вони приблизно однакові (рис. 7.10). Станом на 2010 рік таких установок у Німеччині було біля чотирьох десятків. Уряд цієї країни має амбіційні цілі до 2020 року щорічну заміну 6 млрд. м³ природного газу біометаном.

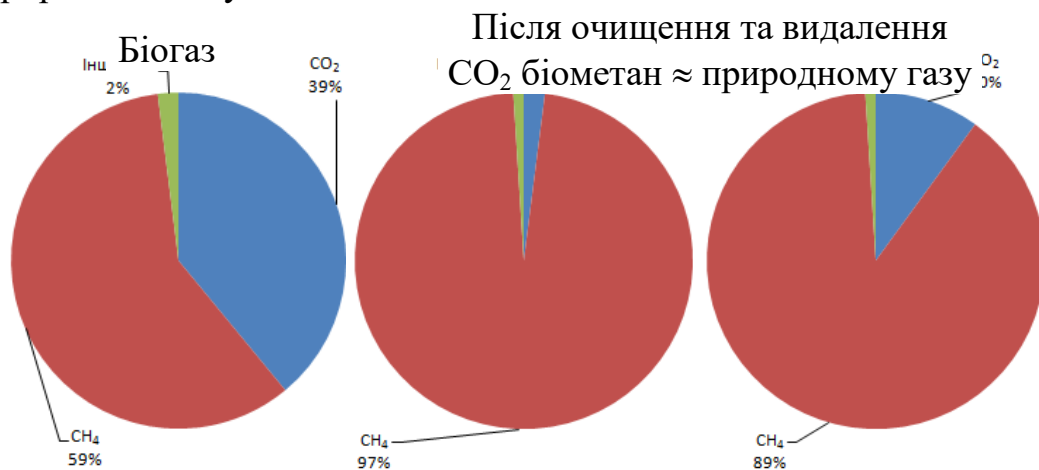


Рис. 7.10. Співвідношення компонентів біометану та природного газу

7.4. Собівартість виробництва біометану в аграрному виробництві

Ресурсною базою для виробництва біометану в сільськогосподарських підприємствах є рідкий гній. Загальновідомо, що витрати на виробництво біометану в сільськогосподарських підприємствах включають виробничі витрати на одержання біометану за вирахуванням перевищення вартості органічних добрив над вартістю гною:

$$B_{\text{БМ}} = V_{\text{БМ}} C_{\text{БМ}} = m_{\text{ГН}} C_{\text{ГН}} - m_{\text{ОД}} C_{\text{ОД}} + E_{\text{БМ}}, \quad (7.4)$$

звідки виробнича собівартість виробництва біометану, з урахуванням того, що $m_{\text{ГН}} \approx m_{\text{ОД}} = m_{\text{ПБ}}$, становить:

$$C_{БМ} = \frac{m_{ПБ}}{V_{БМ}} (\Pi_{ГН} - \Pi_{ОД}) + E_{БМ} = \frac{V_{ПБ} \rho_{ПБ}}{V_{БМ}} (\Pi_{ГН} - \Pi_{ОД}) + E_{БМ} =$$

$$= 365 \frac{V_P \rho_{ПБ}}{V_{БМ} \tau_{ЗБ}} (\Pi_{ГН} - \Pi_{ОД}) + E_{БМ} = \frac{\rho_{ПБ}}{k_{БМ} \tau_{ЗБ}} (\Pi_{ГН} - \Pi_{ОД}) + E_{БМ},$$
(7.5)

а перевищення ціни органічних добрив над ціною гною для забезпечення нульової собівартості біометану становитиме:

$$\Pi_{ОД} - \Pi_{ГН} = \frac{E_{БМ} k_{БМ} \tau_{ЗБ}}{\rho_{ПБ}},$$
(7.6)

або з урахуванням амортизаційних витрат:

$$\Pi_{ОД} - \Pi_{ГН} = \frac{(E_{БМ} + A_{БМ}) k_{БМ} \tau_{ЗБ}}{\rho_{ПБ}},$$
(7.7)

де $V_{БМ}$ – витрати на виробництво біометану, грн; $V_{БМ}$ – об'єм одержаного біометану, м³; $C_{БМ}$ – виробнича собівартість біометану, грн/м³; $m_{ГН}$ – маса рідкого гною, що надходить на зброджування, т; $m_{ОД}$ – маса органічних добрив, отриманих після зброджування, т; $m_{ПБ}$ – маса переробленої в біогазовому реакторі біомаси, т; $\Pi_{ГН}$ – ціна рідкого гною, грн/т; $\Pi_{ОД}$ – ціна органічних добрив, грн/т; $E_{БМ}$ – виробничі витрати на виробництво біометану без урахування вартості рідкого гною та органічних добрив, грн; $E_{БМ}$ – питомі виробничі витрати на виробництво біометану, грн/м³; $V_{ПБ}$ – об'єм переробленої в біогазовому реакторі біомаси, м³; $\rho_{ПБ}$ – густина переробленої в біогазовому реакторі біомаси, т/м³; V_P – об'єм біомаси в біогазовому реакторі, м³; $\tau_{ЗБ}$ – час утримання біомаси в реакторі під час зброджування, діб; $k_{БМ}$ – вихід біометану за добу із розрахунку на одиницю об'єму біогазового реактора, м³/м³ добу; $A_{БМ}$ – амортизаційні витрати на виробництво біометану, грн/м³.

Подальша деталізація виразу (9.5), шляхом розкриття структури питомих виробничих витрат на виробництво біометану, дозволяє записати:

$$C_{БМ} = \frac{\rho_{ПБ}}{k_{БМ} \tau_{ЗБ}} (\Pi_{ГН} - \Pi_{ОД}) + (1 + k_{ЗВ} + k_{ЗГ}) (ТОР_{БМ} + ЕЛ_{БМ} + ЗП_{БМ}),$$
(7.8)

де $k_{ЗВ}$ – коефіцієнт, що враховує загальновиробничі витрати, відносних од.; $k_{ЗГ}$ – коефіцієнт, що враховує загальногосподарські витрати, відносних од.; $ТОР_{БМ}$ – відрахування на технічне обслуговування і ремонт біогазової установки з виробництва біометану, грн/м³; $ЕЛ_{БМ}$ – вартість витраченої електричної енергії при виробництві біометану, грн/м³; $ЗП_{БМ}$ – фонд заробітної плати з нарахуваннями при виробництві біометану, грн/м³.

Врахувавши відносну постійність деяких складових виразу (7.8) можна записати:

$$C_{БМ} = a_{БМ} \delta \Pi_{ОД} + b E_{БМ},$$
(7.9)

де $a_{БМ} = \frac{\rho_{ПБ}}{k_{БМ} \tau_{ЗБ}}$ – потреба в біомасі для отримання 1 м³ біометану за час зброджування, т/м³; $\delta \Pi_{ОД}$ – різниця ціни отриманих органічних добрив та гною, що надходить на зброджування, грн/т; $b = 1 + k_{ЗВ} + k_{ЗГ}$ – коефіцієнт, що враховує

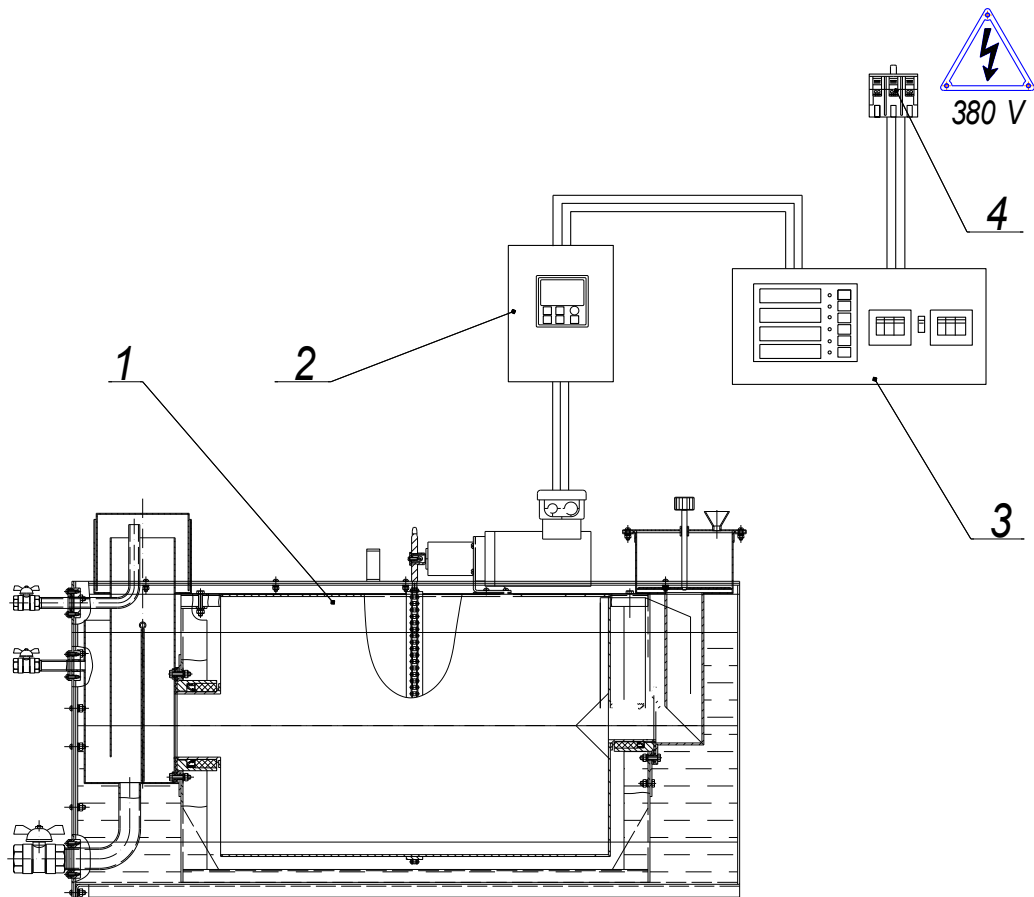
загальновиробничі та загальногосподарські витрати, відносних од.;
 $E_{БМ} = TOP_{БМ} + EЛ_{БМ} + ЗП_{БМ}$ – питомі виробничі витрати на виробництво біометану без урахування вартості органічних добрив, грн/м³.

Лабораторна робота 7: Визначення потужності обертового реактора біогазової установки в залежності від рівня занурення барабана у воду.

Мета роботи: Ознайомитись із принципом дії обертового реактора біогазової установки та визначити залежність споживаної потужності на його обертання від рівня занурення барабана в воду.

Прилади та обладнання: обертовий реактор біогазової установки, частотний перетворювач струму, аналізатор параметрів мережі.

Після ознайомлення з конструкцією обертового реактора біогазової установки та необхідним обладнанням, згідно схеми (рис. 7.11) монтується обладнання та підключається необхідні прилади.



1 – обертовий барабанний змішувач; 2 – частотний перетворювач струму; 3 – аналізатор параметрів мережі; 4 – трифазна електрична мережа
Рис. 7.11. Схема підключення приладів для визначення параметрів обертового барабанного змішувача

Вимірювання проводяться у наступному порядку. Спочатку на боковій стінці зовнішнього контуру наносяться відмітки, що визначають рівень

занурення барабана у воду. Після цього наповнюють барабан водою та заливають необхідну кількість води у зовнішній контур до визначеного рівня. Електродвигун, що обертає барабан вмикають у електричну мережу і за допомогою аналізатора параметрів мережі визначають споживану потужність необхідну для обертання барабана.

Результати вимірів заносяться в таблицю 7.3.

Таблиця 7.3. Результати вимірювань параметрів обертового реактора біогазової установки

Назва параметру	Одиниці вимірювання	дослід 1	дослід 2	дослід 3	дослід 4	дослід 5
рівень води	см	30	55	90	120	140
потужність	Вт	85,00	82,5	80	75	76,5

Результати дослідів у графічному вигляді приведені на рис. 7.12.

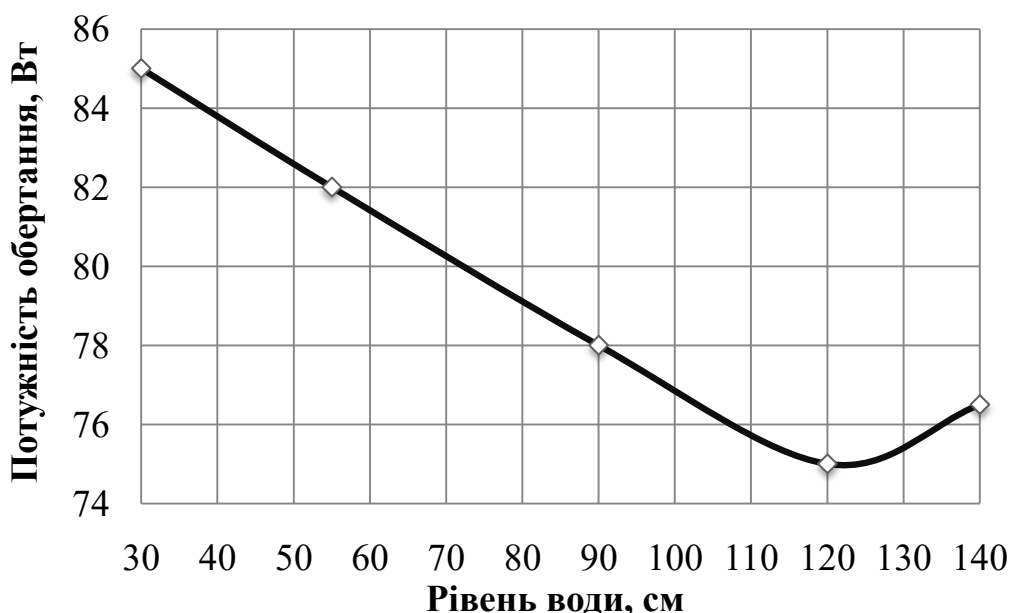


Рис. 7.12. Залежність потужності обертання барабана від його рівня занурення

Таким чином встановлено, що при рівні занурення барабана від 30 до 120 см спостерігається зменшення споживаної потужності з 85 до 75 Вт, а при подальшому зануренні барабана від 120 до 140 см спостерігається збільшення споживаної потужності на обертання барабана з 75 до 77 Вт.

Практична робота 7: Визначити собівартість виробництва біометану при анаеробному зброджуванні гноївки скотарських та свинарських ферм.

Вихідні дані: Густина біомаси вологістю 92 % для переробки в біогазовому реакторі ($\rho_{ПВ}$) – 1,05 т/м³. Вихід біометану за добу із розрахунку на одиницю об'єму біогазового реактора ($k_{БМ}$) – 0,75 м³/м³ добу. Час утримання біомаси в реакторі під час зброджування ($\tau_{ЗБ}$) – 15 діб. Теплотворна здатність

біометану (q_{BM}) – 37 МДж/м³. Коефіцієнт корисної дії дизель-генератора при отриманні електроенергії (η_T) – 0,38 відн. од.; Вихідні дані для розрахунку економічних показників виробництва біометану приведені в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3. Вихідні дані для розрахунку економічних показників виробництва біометану

Показник	Значення показника
Ціна біомаси рідкого гною до збродження в біогазовому реакторі ($C_{ГН}$), грн/т	30
Ціна органічних добрив після збродження в біогазовому реакторі ($C_{ОД}$), грн/т	40
Коефіцієнт, що враховує загальновиробничі витрати ($k_{ЗВ}$), відн. од.	0,05
Коефіцієнт, що враховує загальногосподарські витрати ($k_{ЗГ}$), відн. од.	0,1
Відрахування на технічне обслуговування і ремонт біогазової установки ($ТОР_{BM}$), грн/м ³	1,32
Вартість витраченої електричної енергії ($ЕЛ_{BM}$), грн/м ³	0,4
Фонд заробітної плати з нарахуваннями, грн/м ³	0,3

Питомі виробничі витрати на виробництво біометану становлять:

$$E_{BM} = (1 + k_{ЗВ} + k_{ЗГ})(ТОР_{BM} + ЕЛ_{BM} + ЗП_{BM}) = \\ = (1 + 0,05 + 0,1)(1,32 + 0,4 + 0,3) = 2,32 \text{ грн} / \text{м}^3.$$

З урахуванням цього, собівартість виробництва біометану становитиме:

$$C_{BM} = \frac{\rho_{ПБ}}{k_{BM} \tau_{ЗВ}} (C_{ГН} - C_{ОД}) + E_{BM} = \\ = \frac{1,05}{0,75 \cdot 15} (30 - 40) + 2,32 = 1,39 \text{ грн} / \text{м}^3,$$

а перевищення ціни органічних добрив після збродження над ціною біомаси рідкого гною до збродження в біогазовому реакторі для забезпечення нульової собівартості біометану становитиме:

$$C_{ОД} - C_{ГН} = \frac{E_{BM} k_{BM} \tau_{ЗВ}}{\rho_{ПБ}} = \frac{2,32 \cdot 0,75 \cdot 15}{1,05} = 24,86 \text{ грн} / \text{т}.$$

Таким чином, забезпечення нульової собівартості біометану буде при перевищенні ціни органічних добрив після збродження над ціною біомаси рідкого гною до збродження в біогазовому реакторі в межах від 24 до 25 грн/т.

Запитання для самоконтролю:

1. Які основні переваги та недоліки сучасних біогазових установок?
2. Які основні переваги та недоліки в роботі обертового біогазового реактора?

3. Як визначається потужність, яка споживається приводним електродвигуном обертового біогазового реактора із електричної мережі?
4. Які є методи зниження споживаної потужності на обертання реакторів?
5. Поясніть вплив коефіцієнта занурення заповненого обертового метантенка на потужність приводного механізму.
6. Чим обумовлено коливання споживаної електричної потужності під час роботи обертового реактора?
7. Як перемішування впливає на вихід біогазу?
8. Які основні елементи конструкції біогазової установки?
9. Які основні методи зниження витрат енергії при роботі біогазової установки?
10. Яка роль інокуляції біомаси при роботі біогазової установки?
11. Яким чином здійснюють інокуляцію біомаси при роботі біогазової установки?
12. Розкажіть про будову та принцип роботи біогазової установки.
13. Як визначити виробничу собівартість виробництва біометану?
14. Який основний технологічний показник виробництва визначає економічну ефективність виробництва біометану?
15. Яка собівартість виробництва біометану без урахування вартості органічних добрив?
16. Які способи отримання теплової енергії із біогазу Ви знаєте?
17. Назвіть види газових пальників.
18. Чим відрізняється пальник котла призначеного для спалювання біогазу?
19. Чим відрізняється кухонна плита, що працює на біогазі?
20. З яких основних елементів складається газовий котел?
21. Вкажіть призначення та класифікацію газових котлів?
22. Для чого призначений пальник газового котла?
23. Чим обумовлені відмінності пальників що працюють на біогазі від пальників що працюють на природному газі?

Література:

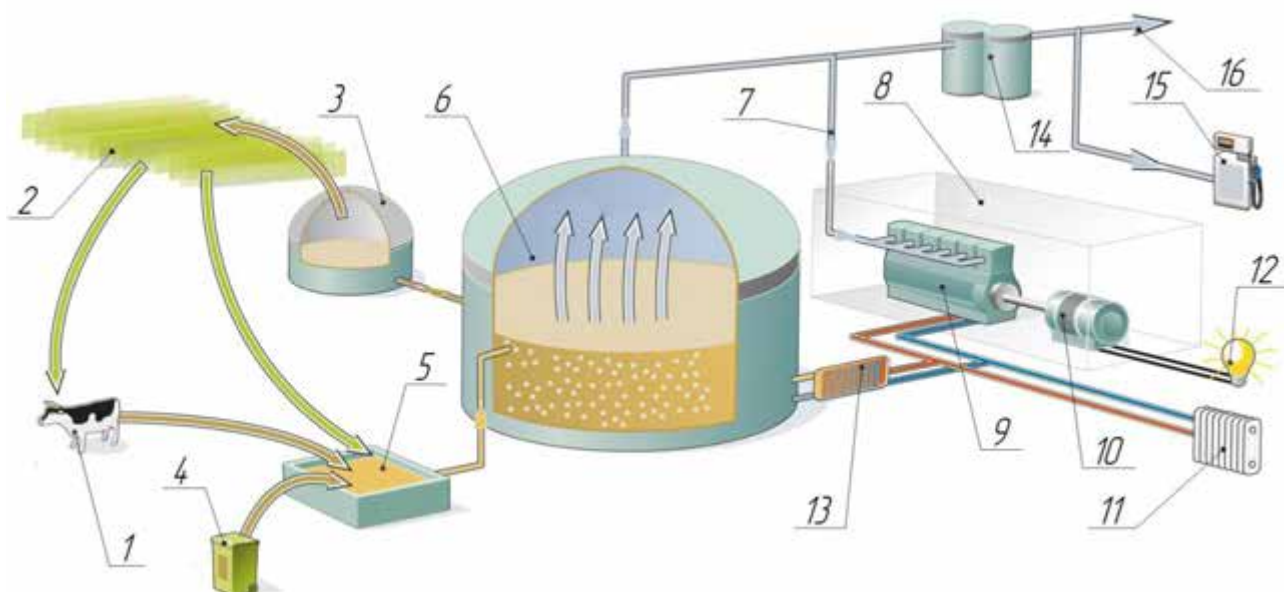
1. Сільське господарство України. Стат. зб.; за ред. Ю.М. Остапчука. – К.: Державна служба статистики України, 2011. – 370 с.
2. G. Golub, O. Dubrovina. Biomethane formation in biogas installations. – The 8th International Research and Development Conference of Central and Eastern European Institutes Proceedings: – Poznan, Puszczykowo, Poland. – Industrial Institute of Agricultural Engineering, 25-28th June, 2013. – 72 p. – P. 55-58.
3. Голуб Г.А., Дубровіна О.В., Чуба В.В., Павленко М.Ю. Експериментальне визначення питомої потужності перемішування біомаси в обертовому реакторі. – Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК / Редколегія: Д.О. Мельничук (відповідальний редактор) та інші. – К., 2013. – Вип. 185, ч. 1. – 372 с. – С. 272-277.

4. Голуб Г.А., Сидорчук О.В., Кухарець С.М., Гох В.В., Осауленко С.В., Завадська О.А., Рубан Б.О., Поліковська Н.Л., Швець Р.Л., Чуба В.В., Павленко М.Ю. Технологія переробки біологічних відходів у біогазових установках з обертовими реакторами / За ред. д-ра техн. наук, проф. Г. А. Голуба. – К.: НУБіП України, 2014. – 106 с.
5. Голуб Г.А. Визначення параметрів руху частинок біомаси під час обертання метантенка /Г.А. Голуб, С.М. Кухарець //Наук. вісн. НУБіП України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2015. – Вип. 212, ч. 2. – С. 254–264.
6. Голуб Г.А. Обґрунтування рівня занурення та коефіцієнта заповнення біомасою обертового метантенка /Г.А. Голуб, О.В. Дубровіна //Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК – 2012. – Вип. 170, ч. 2. – 387 с. – С. 55-61.
7. Голуб Г.А. Особливості конструкції модульної біогазової установки з обертовим реактором /Голуб Г., Кухарець С., Рубан Б. //Техніка і технології АПК (Науково-виробничий журнал). – 2014. – № 9 (60). – С. 10-14.
8. Голуб Г. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок /Г. Голуб, В. Войтенко, Б. Рубан, В. Єрмоленко // Техніка і технології АПК (Науково-виробничий журнал). – 2012. – № 2 (29). – С. 18-21.
9. Голуб Г.А. Технічне забезпечення виробництва біогазу /Г.А. Голуб, О.В. Дубровіна, Б.О. Рубан, В.О. Войтенко //Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Вінниця, 2012. – Вип. 10. – 186 с. – С. 17-19.
10. Кухарець С.М. Дослідження енергетичної ефективності обертових метантенків /С.М. Кухарець, В.Г. Спиридонов //Наук. вісн. НУБіП України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2015. – Вип. 212, ч. 2. – С. 248–253.
11. Кухарець С.М. Обґрунтування енергетичних витрат на привід обертового реактора біогазової установки /Кухарець С.М., Голуб Г.А. //Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: збірник наук. пр./ ДНУ УкрНДІПВТ ім. Л.Погорілого. – 2014. – Вип. 18 (32), кн. 2. – С. 356-365.
12. Пат. 110077 Україна, МПК С02F 11/04, С02F 3/28. Метантенк /Голуб Г.А., Кухарець С.М. ; заявник і патентовласник Нац. ун.-т. біоресурсів і природокористування України. – №а2014 09259; заявл. 19.08.2014; дата публікації 10.11.2015, Бюл. № 21.
13. С.М. Кухарець, Г.А. Голуб. Дослідження енергетичних показників обертового біогазового реактора. – Механізація та електрифікація сільського господарства: [загальнодержавний збірник]. – 2015. – Випуск №2 (101) / [ННЦ "ІМЕСГ"]. – Глеваха, 2015. – 348 с. – С. 200-206.
14. Голуб Г.А., Марус О.А. Механіка руху частинки по радіальній лопатці обертового барабана / Г.А. Голуб, О.А. Марус // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК / Редкол.: С.М. Ніколаєнко (відп. ред.) та ін. – К., 2016. – Вип. 241. – 396 с. – С. 350–358.

8. ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗУ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

8.1. Виробництво біометану. Очищення та збагачення біогазу

Біогаз може використовуватися децентралізованими блочними теплоелектроцентралями для електро- і теплопостачання (когенерація) або подаватися як очищений і збагачений біогаз (біометан) в існуючу газотранспортну мережу (рис. 8.1). Крім того, збагачений біогаз може використовуватися як паливо в автомобілях замість природного газу, на великих центральних когенераційних установках або для виробництва тепла у високоефективних газових конденсаційних котлах.



1 – сільськогосподарські тварини та птиця, 2 – сільськогосподарські посіви, 3 – зберігання відпрацьованого субстрату, 4 – органічні відходи, 5 – накопичувач субстрату, 6 – біогазова установка оснащена газгольдером, 7 – біогазова мережа, 8 – когенератор, 9 – двигун внутрішнього згоряння, 10 – електрогенератор, 11 – використання теплової енергії для опалення приміщень, 12 – використання електричної енергії, 13 – підігрівання біогазового реактора, 14 – установка для збагачення і очищення біогазу, 15 – заправна станція, 16 – транспортна мережа природного біогазу

Рис. 8.1. Схема використання біогазу та біометану (джерело Agentur für Erneuerbare Energien, Німеччина)

Застосування біогазу у децентралізованому енергопостачанні сприяє скороченню імпорту енергоносіїв та підвищенню надійності енергопостачання, зокрема, у сільській місцевості. В нинішній час біометан виробляється в п'ятнадцятих європейських країнах (рис. 8.2). Подача біометану в мережу природного газу відбувається в одинадцятих країнах (Австрія, Чехія, Німеччина, Данія, Фінляндія, Франція, Люксембург, Нідерланди, Норвегія, Швеція, Великобританія). В дванадцятих європейських країнах (Австрія, Чехія, Німеччина, Данія, Фінляндія, Франція, Угорщина, Ісландія, Італія,

Нідерланди, Швеція, Великобританія) біометан використовується як моторне паливо. На сьогоднішній день загальна кількість біометанових станцій в європейських країнах досягла 250 од., з яких 200 станцій подають біометан в мережу природного газу. Найбільш динамічно виробництво біометану розвивається в Німеччині. Тут перша установка з виробництва біометану почала свою роботу в 2006 р. А до 2014 року кількість біометанових станцій зросла до 169 од. При цьому загальна потужність виробництва біометану збільшилась до 900 млн. м³ в рік.



Рис. 8.2. Розташування станцій з виробництва біометану в Європі.
(джерело: Google Maps, biogaspartner)

Важливу роль в отриманні біометану відіграє збагачення і очищення біогазу. Для того, щоб вироблений біогаз можна було подавати до мережі, його очищують в декілька етапів (рис. 8.3).

Методи очистки біогазу від домішок (табл. 8.1) залежать від способів його подальшого використання. Так, наприклад, при використанні біогазу для виробництва тепла в котлах, обмеження стосуються лише концентрації H₂S (не більше 1000 млн.⁻¹). При цьому немає необхідності видаляти вологу та вуглекислий газ. У випадку застосування біогазу в кухонних плитах існують більш високі вимоги до очистки від H₂S. При спалюванні біогазу в двигунах внутрішнього згорання, також існують певні вимоги до вмісту H₂S (не більше 200 млн.⁻¹) та силіоксанів, а також до надмірного вмісту вологи (не допускається утворення конденсату). Найбільш суворі вимоги до очистки біогазу висувуються у випадку його подачі в мережу природного газу та при прямому використанні в якості моторного палива. В цьому випадку треба збагачувати біогаз до якості природного газу.

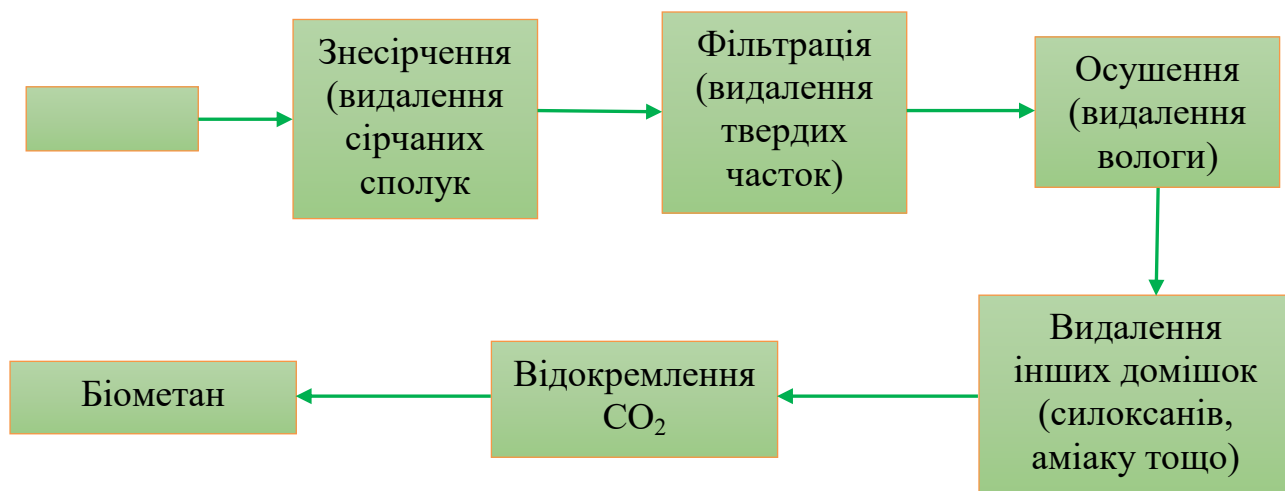


Рис. 8.3. Етапи очищення та збагачення біогазу

Таблиця 8.1. Вміст домішок у біогазі

Назва сполуки (домішки)	Формула сполуки (домішки)	Можлива концентрація, млн. ⁻¹	Допустима концентрація, млн. ⁻¹
Сірководень	H ₂ S	50000	10
Толуол	C ₆ H ₅ CH ₃	210	100
Ксілол	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	120	100
Етилбензол	C ₆ H ₅ C ₂ H ₅	55	100
Тетрахлоретилен	Cl ₂ C-CCl ₂	35	35
Гексан	C ₆ H ₁₄	30	100
Ізопропілбензол	C ₆ H ₅ C ₃ H ₇	30	50
Бензол	C ₆ H ₆	25	10
Діхлорметан	CH ₂ Cl ₂	15	200
Нонан	C ₉ H ₂₀	15	-
Хлорбензол	C ₆ H ₅ Cl	12	75
Трихлоретан	Cl ₂ HC-CH ₂ Cl	10	10
1,1-Діхлоретан	CH ₃ CH ₂ Cl ₂	10	10
1,2-Діхлоретан	ClCH ₂ CH ₂ Cl ₂	8	50
Пентан	C ₅ H ₁₂	7	600
Ізооктан	C ₈ H ₁₈	5	300
Індол	C ₈ H ₇ N	5	-
1,1-Діхлоретілен	Cl ₂ C ₂ -CH ₂	2	10
Нафталін	C ₁₀ H ₈	0,2	10
Трихлоретилен	Cl ₂ C-CHCl	0,2	35

Значна частина домішок міститься у біогазі в концентраціях значно менших допустимих. І навіть якщо їх концентрації перевищують допустимі (бензол, толуол, ксілол), домішки не становлять небезпеки, оскільки не

перебувають у прямому контакті з людьми при роботі з біогазом, а при його спалюванні розкладаються. Отже, екологічна небезпека використання біогазу дуже мала. Виняток становить H_2S , так як сірководень навіть у малих дозах є небезпечним для людини і призводить до швидкого зношення і корозійних пошкоджень обладнання, газових труб, газоводяних теплообмінників, клапанів. Тому знесірчення має найвищий пріоритет в процесі очищення.

Очищення біогазу від сірководню є серйозною проблемою. Якщо мова йде про видалення H_2S з біогазу без зміни змісту CO_2 або про розділення компонентів біогазу з подальшим використанням CO_2 , то необхідно використовувати хімічні методи зв'язування H_2S . Якщо поставлено завдання зниження змісту всіх домішок в біогазі, включаючи CO_2 , то можливе одночасне поглинання CO_2 і H_2S методами фізичної адсорбції.

Добре відомі і технічно розроблені методи і технології очищення газів (зокрема, біогазу) від сірчистих з'єднань за допомогою твердих хімічних поглиначів. У якості таких поглиначів сірководню найчастіше використовуються оксиди заліза, цинку, міді, алюмінію. Одним з найбільш простих і дешевих методів є поглинання H_2S оксидом заліза. При цьому Fe_2O_3 реагує з H_2S , утворюючи FeS_3 , який розкладається киснем повітря з утворенням елементарної сірки. На практиці зазвичай використовують оксид заліза, нанесений на дерев'яну стружку, тирсу для розширення поверхні взаємодії хемосорбента з біогазом. Більш сучасними є пристрої для очищення газів від H_2S з рідким поглиначем. Найбільший практичний інтерес представляють методи рідинної адсорбції, при яких газова суміш пропускається через розчин поглинача, який після насичення його сірководнем всередині пристрою надсилається на регенерацію.

Біогаз з біореакторів і метантенків має відносну вологість близько 100%, а оскільки він виходить з реактора при барботуванні через шар рідини, то часто містить велику кількість краплинної вологи. Використання вологого біогазу в топках котлів і камерах згорання двигунів негативно позначається на роботі цих пристроїв, знижує їх ККД і підвищує рівень шкідливих викидів, призводить до корозії устаткування. При подальших операціях з підготовки біогазу, зокрема, які використовують криогенні технології наявність вологи в біогазі недопустима. У лінії підготовки біогазу до використання рекомендується встановлювати віддільники й відбійники краплинної вологи. Їх конструкції різноманітні і аналогічні звичайним вологовіддільникам в системах використання будь-яких газів, наприклад, природного газу.

На практиці, готуючи великі обсяги газу до транспортування в трубопроводах, застосовують методи абсорбції і адсорбції. Осушення газу методом абсорбції ґрунтується на використанні спеціальних рідких реагентів, що поглинають із газу воду. Це відбувається при безпосередньому контакті всередині спеціальної установки. В якості реагентів, що поглинають вологу, при цьому методі найчастіше застосовуються розчини діетиленгліколю або триетиленгліколю. При абсорбції осушуваний газ спочатку взаємодіє з розчином поглинача, після чого з нього спочатку виділяється газ, що був поглинутий, а потім етиленгліколь підігрівається і прямує на регенерацію, де з

нього видаляється поглинена волога. Далі цикл повторюється. До незаперечних практичних переваг абсорбційного методу відноситься той факт, що він дозволяє видаляти вологу з газової суміші, що містить шкідливі речовини (в першу чергу сірководень). Крім цього, він легко піддається автоматизації і дозволяє проводити осушення до прийнятної в більшості випадків значення «точки роси» (мінус 70⁰С).

На використанні твердих поглиначів вологи побудована інша поширена технологія осушування газів - метод адсорбції. В цьому методі поглинання вологи здійснюється твердими гранульованими речовинами. В якості таких адсорбентів можуть виступати, зокрема, оксид алюмінію, цеоліти, а також силікагель. Волога згодом видаляється з пор адсорбентів із застосуванням зовнішньої дії. Метод адсорбції має ряд переваг. Зокрема, він дозволяє домогтися набагато нижчої «точки роси» (мінус 90⁰С). Однак можливість вибору цього методу, а також конкретного адсорбенту, сильно залежить від складу осушуваного газу, так як у ньому, можуть перебувати компоненти, що негативно впливають на тверді реагенти установки.

У Європі розрізняють природний газ «Н» (High, газ високої якості) і природний газ «L» (Low, газ низької якості). Природний газ «Н» складається на 89...98 % з метану. Дещо нижчою є якість природного газу «L». Вміст метану в ньому складає приблизно 85 %. Іншими складниками природного газу є алкани (етан, пропан, бутан, пентан) та інертний газ. Таким чином, якість природного газу може відрізнятися в залежності від регіону. Тому тільки тоді, коли вимоги відповідного оператора газотранспортної мережі до якості газу задовольняються, біогаз може подаватися в загальну газову мережу.

Поряд із знесірченням і осушенням біогазу важливим кроком є відокремлення вуглекислого газу в процесі збагачення біогазу до біометану (рис. 8.4). При цьому частка вуглекислого газу (CO₂) в біогазі може становити до 45%. Завдяки своїм фізичним властивостям вуглекислий газ впливає на теплотворну здатність і теплоту згорання газу, а також на його щільність. На ці показники потрібно звертати особливу увагу при подачі біометану до газотранспортної мережі.

Для збагачення біогазу до якості природного газу в Європі застосовуються способи очищення вологим способом під постійним тиском та адсорбція під змінним тиском. Крім того, розвиваються і випробовуються інші технології.

У процесі очищення вологим способом під тиском біогаз без попереднього знесірчення стискується приблизно до 1 МПа і пропускається через наповнену водою ємність високого тиску. Вуглекислий газ (CO₂), що міститься в біогазі, абсорбується водою. При цьому частково видаляються сірководень (H₂S) і аміак, а також різноманітні домішки та мікроорганізми. Водяна пара у біогазі після очищення вологим способом зріджується. Таким способом можна досягти вмісту CH₄ понад 96%.

У технології адсорбції під змінним тиском попередньо знесірчений і висушений біогаз піддається дії змінного тиску (до 1 МПа). При цьому вуглекислий газ (CO₂) адсорбується відновлюваним активованим вугіллям.

Крім вуглекислого газу адсорбуються гази, що містяться в домішках. Таким способом також можна досягти вмісту CH_4 до 96%.



Рис. 8.4. Установа для очищення та збагачення біогазу в Швандорфі, Німеччина

Крім вищеназваних способів існують ще й інші технології, які можуть застосовуватися на практиці для відокремлення CO_2 . Очищення амінами є процесом, що базується на хімічній абсорбції. При цьому вуглекислий газ, подібно до того, як це відбувається під час очищення вологим способом абсорбується під впливом тиску (0,1...0,5 МПа). Для того, щоб із біогазу можна було видалити більше CO_2 , очищувальна рідина збагачується хімічними речовинами. Очищувальну рідину, використану в цьому процесі, можна відновити. При цьому відновлення є енергоємним і може бути пов'язане з високими господарськими витратами. Це суттєвим чином залежить від хімічних речовин, що використовуються.

У мембранному розділенні використовується фізичний процес селективної проникності відповідної мембрани. Суттєво менші молекули CO_2 проходять через мікропори мембрани швидше, ніж більші за них молекули CH_4 . Метан, що залишається на стороні мембрани, яка знаходиться під високим тиском, збирається і може подаватися в газотранспортну мережу. Перевагою цієї технології є низькі втрати метану під час обробки біогазу. Недоліком є порівняно високі енергетичні затрати, оскільки потрібно створювати відносно високий тиск.

Використовується також криогенна сепарація. Температури кипіння

метану мінус 161,5°C, а вуглекислого газу – мінус 78,5 °C. При пониженні температури в умовах надлишкового тиску CO₂ переходить в рідкий стан, в той час коли метан знаходиться ще в газоподібному стані. При цьому CO₂ можна відносно легко відділити від метану. Виділений таким способом CO₂ є достатньо чистим та може бути товарним продуктом.

8.2. Когенераційні установки

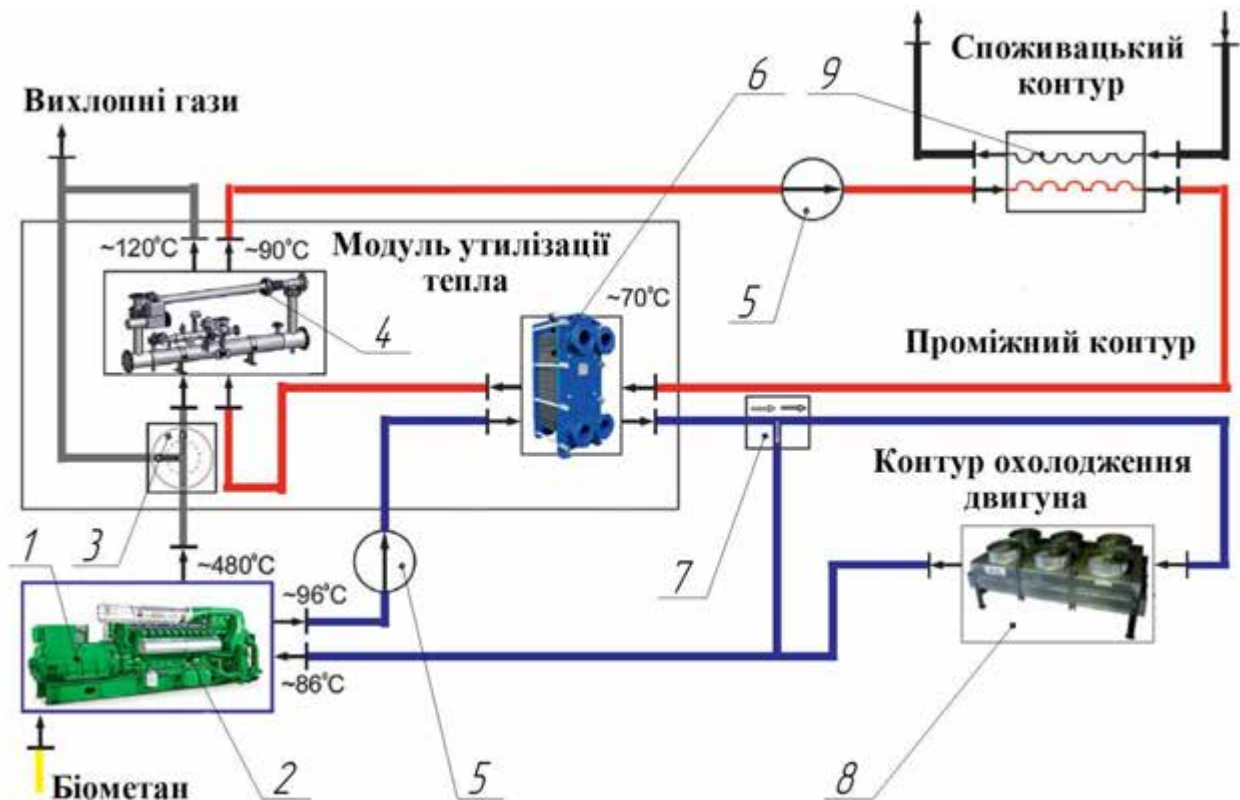
Когенерація – це комбіноване виробництво тепла та електроенергії. На електростанції із застосуванням технології когенерації паливо використовується для отримання двох форм енергії – теплової і електричної. Приставка «ко» в слові когенерація і означає комбі. Простіше кажучи когенераційна установка це тепла електростанція. Когенераційні електростанції більш ефективні в порівнянні з електростанціями, які виробляють тільки електричну енергію. Із технологією когенерації з'являється реальна можливість використовувати теплову енергію, яка зазвичай випаровується в атмосферу через градирні та разом з димовими газами. При використанні ефекту когенерації істотно зростає загальний коефіцієнт використання палива. Застосування когенерації в значній мірі скорочує витрати палива.

Когенераційна установка складається із силового агрегату, наприклад, газової турбіни чи поршневого двигуна, електричного генератора, теплообмінника і системи управління (рис. 8.5). Найбільшого розповсюдження набули установки невеликої (від 0,5 до 2 МВт) і середньої (від 30 до 50 МВт) електричної потужності. При використанні когенерації на 1 МВт електричної потужності споживач отримує від 1 до 2 МВт теплової потужності у вигляді пари і гарячої води для промислових потреб, опалення та водопостачання.

Когенераційні електростанції з надлишком покривають потреби споживачів у електричній і дешевій тепловій енергії. Надлишкова тепла енергія може направлятися на парову турбіну, для максимізації вироблення електроенергії або в абсорбційно-холодильні машини для виробництва холоду, з наступною реалізацією в системах кондиціонування. Подібна технологія має власне визначення – тригенерація.

Провідними світовими виробниками когенераційних установок на основі поршневих двигунів і турбін на сьогоднішній день є: Alstom, Capstone, Calnetix-Elliott Energy Systems, Caterpillar, Cummins, Deutz AG, Generac, General Electric, GE Jenbacher, Honeywell, Kawasaki, Kohler, Loganova, MAN B&W, MAN TURBO AG, Mitsubishi Heavy Industries, Rolls-Royce, SDMO, Siemens, Solar Turbines, Turbomach, Vibro Power, Wartsila, Waukesha Engine Division, FG Wilson, Perkins.

Розрізняють когенераційні системи на базі газотурбінних і газопоршневих установок, мікротурбін. Рідше використовуються двигуни, що працюють на дизельному паливі. Ще одним критерієм класифікації може служити вид палива. Серед інших особливо перспективними вважається біометан.



1 – електрогенератор, 2 – двигун, 3 – байпас, 4 – утилізатор вихлопних газів, 5 – насос, 6 – теплообмінник контуру охолодження двигуна, 7 – термостат, 8 – радіатор, 9 – теплообмінник системи теплопостачання (споживацького контуру)

Рис. 8.5. Схема когенераційної установки

Газотурбінні установки (рис. 8.6) здатні забезпечити найбільш широкий діапазон електричної потужності – від десяти до декількох десятків мегават. У таких установках потік газу, утворений в результаті згоряння палива, при взаємодії із лопатками турбіни, створює крутний момент і обертає ротор, який, в свою чергу, з'єднаний з електрогенератором. Електричний ККД (частка електроенергії від загальної енергії згоряння палива) систем подібного типу може досягати 39%. Газотурбінні установки, як правило, виробляють в два рази більше теплової енергії, ніж електричної (при цьому загальний ККД не перевищує 90%). Їх безперечною перевагою є можливість роботи як на рідкому (дизельне паливо, гас), так і на газоподібному паливі різного походження, в тому числі низькокалорійному (з вмістом метану менше 30%). Установки великої потужності можна використовувати разом з паровими турбінами. У цьому випадку їх електричний ККД досягає 59%. Газотурбінні установки можна використовувати у багатьох галузях народного господарства, але основні сегменти споживання – це все ж нафто- і газовидобувна сфери, металургійна промисловість, а також енергетика. У газотурбінних установках основна кількість теплової енергії відбирається із системи вихлопу. Відбір теплової енергії в газотурбінних установках простіший ніж в газопоршневих, так як вихлопні гази мають більш високу температуру.



Рис. 8.6. Газова турбіна SGT-800 виробництва Siemens потужністю 47 МВт

Мікротурбінні установки (рис. 8.7) працюють за тим же принципом, що і газотурбінні, але мають менші розміри і, відповідно, потужність. Також особливістю когенераційних установок на базі мікротурбін є компактність конструкції, що дає перевагу при реалізації проектів когенерації в обмеженому просторі, наприклад, в окремих будівлях. Вся когенераційна система компактно розташована всередині шумозахисного корпусу, назовні виведені тільки система вихлопу і теплова магістраль. Електричний ККД, як правило, не перевищує 35%, а теплової дорівнює приблизно 50%. Максимальна потужність одиничного блоку складає до 250 кВт.

Газопоршневі установки працюють від двигунів внутрішнього згоряння, паливом для яких служить газ (рис. 8.8). Електричний ККД газопоршневих установок досягає 40%, що трохи вище, ніж у газотурбінних, а ось теплової ККД нижче – 50%. Максимальна потужність таких установок становить до 9 МВт. У газопоршневих електростанціях відбір теплової енергії відбувається від масляного теплообмінника та від системи охолодження двигуна.

8.3. Техніко-економічна оцінка виробництва електроенергії на основі біометану

Витрати на виробництво електроенергії на основі біометану включають виробничі витрати на одержання біометану та електроенергії за вирахуванням перевищення вартості органічних добрив над вартістю гною:

$$B_{\text{ЕЛ}} = W_{\text{ЕЛ}} C_{\text{ЕЛ}} = m_{\text{ГН}} C_{\text{ГН}} - m_{\text{ОД}} C_{\text{ОД}} + E_{\text{ВЕЛ}}, \quad (8.1)$$

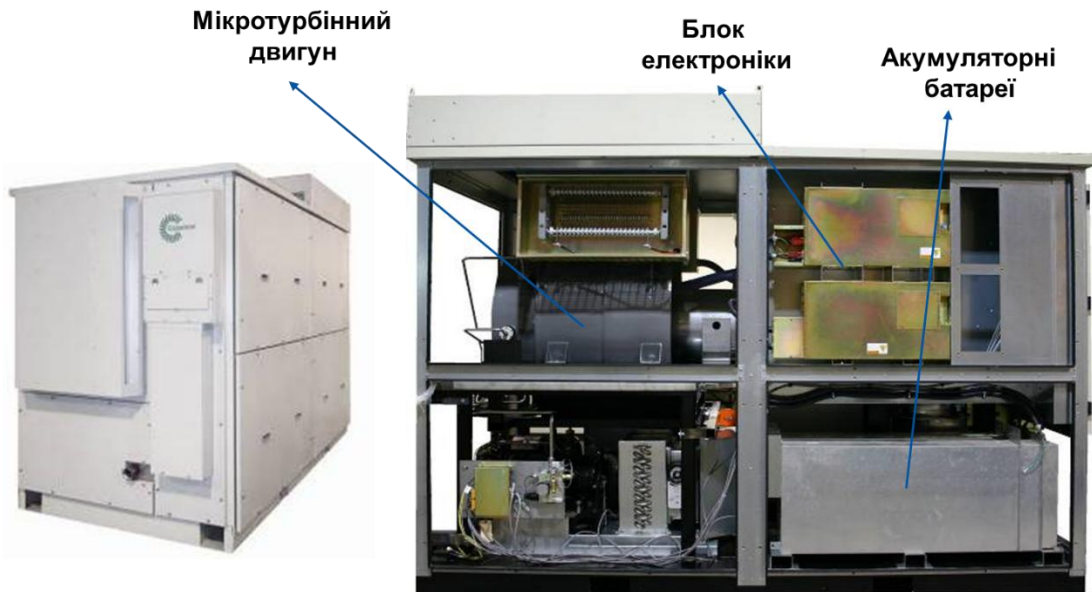


Рис. 8.7. Мікротурбінна установка Capstone C200 з електричною потужністю 200 кВт

звідки виробнича собівартість виробництва електроенергії на основі біометану, з урахуванням того, що $m_{ГН} \approx m_{ОД} = m_{ПБ}$, становить:

$$\begin{aligned}
 C_{ЕЛ} &= \frac{m_{ПБ}}{W_{ЕЛ}} (\psi_{ГН} - \psi_{ОД}) + E_{ЕЛ} = \frac{V_{ПБ} \rho_{ПБ}}{W_{ЕЛ}} (\psi_{ГН} - \psi_{ОД}) + E_{ЕЛ} = \\
 &= 365 \frac{V_P \rho_{ПБ}}{W_{ЕЛ} \tau_{ЗБ}} (\psi_{ГН} - \psi_{ОД}) + E_{ЕЛ},
 \end{aligned}
 \tag{8.2}$$



Рис. 8.8. Газопоршнева установка Perkins TRS1 електричною потужністю 310 кВт

а врахувавши, що

$$W_{ЕЛ} = \frac{V_{БМ} q_{БМ} \eta_{Г}}{3,6}, \quad (8.3)$$

отримаємо:

$$C_{ЕЛ} = 365 \frac{3,6 V_{Р} \rho_{ПБ}}{V_{БМ} q_{БМ} \eta_{Г} \tau_{ЗБ}} (\Pi_{ГН} - \Pi_{ОД}) + E_{ЕЛ} = \frac{3,6 \rho_{ПБ}}{k_{БМ} q_{БМ} \eta_{Г} \tau_{ЗБ}} (\Pi_{ГН} - \Pi_{ОД}) + E_{ЕЛ}, \quad (8.4)$$

а перевищення ціни органічних добрив над ціною гною для забезпечення нульової собівартості електроенергії на основі біометану становитиме:

$$\Pi_{ОД} - \Pi_{ГН} = \frac{E_{ЕЛ} k_{БМ} q_{БМ} \eta_{Г} \tau_{ЗБ}}{3,6 \rho_{ПБ}}, \quad (8.5)$$

або з урахуванням амортизаційних витрат:

$$\Pi_{ОД} - \Pi_{ГН} = \frac{(E_{ЕЛ} + A_{ЕЛ}) k_{БМ} q_{БМ} \eta_{Г} \tau_{ЗБ}}{3,6 \rho_{ПБ}}, \quad (8.6)$$

де $V_{ЕЛ}$ – витрати на виробництво електроенергії на основі біометану, грн; $W_{ЕЛ}$ – кількість виробленої електроенергії, кВт год.; $C_{ЕЛ}$ – виробнича собівартість електроенергії, грн/кВт год.; $E_{ВЕЛ}$ – виробничі витрати на виробництво електроенергії на основі біометану без урахування вартості рідкого гною та органічних добрив, грн; $E_{ЕЛ}$ – питомі виробничі витрати на виробництво електроенергії на основі біометану, грн/кВт год.; $q_{БМ}$ – теплотворна здатність біометану, МДж/м³; $\eta_{Г}$ – коефіцієнт корисної дії дизель-генератора при отриманні електроенергії, відн. од.; 3,6 – коефіцієнт перерахунку, МДж/кВт год.; $A_{ЕЛ}$ – амортизаційні витрати на виробництво електроенергії на основі біометану, грн/кВт год.

Подальша деталізація виразу (8.4), шляхом розкриття структури питомих виробничих витрат на виробництво електроенергії на основі біометану, дозволяє записати:

$$C_{ЕЛ} = \frac{3,6 \rho_{ПБ}}{k_{БМ} q_{БМ} \eta_{Г} \tau_{ЗБ}} (\Pi_{ГН} - \Pi_{ОД}) + (1 + k_{ЗБ} + k_{ЗГ}) (ТОР_{ЕЛ} + ЕЛ_{ЕЛ} + ЗП_{ЕЛ}), \quad (8.7)$$

де $ТОР_{ЕЛ}$ – відрахування на технічне обслуговування і ремонт біогазової установки з виробництвом електроенергії, грн/кВт год.; $ЕЛ_{ЕЛ}$ – вартість витраченої електричної енергії при виробництві електроенергії на основі біометану, грн/кВт год.; $ЗП_{ЕЛ}$ – фонд заробітної плати з нарахуваннями при виробництві електроенергії на основі біометану, грн/кВт год.

Врахувавши відносну постійність деяких складових виразу (8.7) можна записати:

$$C_{ЕЛ} = a_{ЕЛ} \delta \Pi_{ОД} + b E_{ЕЛ}, \quad (8.8)$$

де $a_{ЕЛ} = \frac{3,6 \rho_{ПБ}}{k_{БМ} q_{БМ} \eta_{Г} \tau_{ЗБ}}$ – потреба в біомасі для отримання 1 кВт год.

електроенергії за час зброджування, т/кВт год.; $E_{ЕЛ} = ТОР_{ЕЛ} + ЕЛ_{ЕЛ} + ЗП_{ЕЛ}$ – питомі виробничі витрати на виробництво електроенергії на основі біометану без урахування вартості органічних добрив, грн/кВт год.

Значення коефіцієнтів, що обумовлюють ефективність виробництва біометану та електроенергії на його основі, приведені в таблиці 8.2.

Таблиця 8.2 – Значення коефіцієнтів для розрахунку собівартості виробництва біометану та електроенергії на його основі

Показник	Позначення	Значення
Потреба в біомасі для отримання 1 м ³ біометану за час зброджування, т/м ³	$a_{БМ}$	53,2
Потреба в біомасі для отримання 1 кВт год. електроенергії за час зброджування, т/кВт год.	$a_{ЕЛ}$	13,6
Коефіцієнт, що враховує загальновиробничі та загальногосподарські витрати, відн. од.	b	1,15

За технічними і вартісними показниками обертових (потужність від 10 до 80 кВт) та емнісних (потужність від 100 до 500 кВт) біогазових установок, що пропонуються на ринку в Україні, нами визначено питомі виробничі витрати на виробництво біометану та електроенергії на його основі, без урахування вартості органічних добрив. Характерна залежність зміни величини виробничих витрат від потужності біогазових установок для умов 2011 року (вартість електроенергії 0,73 грн/кВт год., середньомісячна зарплата 1853 грн/міс) наведена на рис. 8.9, а залежність терміну окупності біогазових установок різних типів, без урахування вартості органічних добрив, на рис. 8.10.

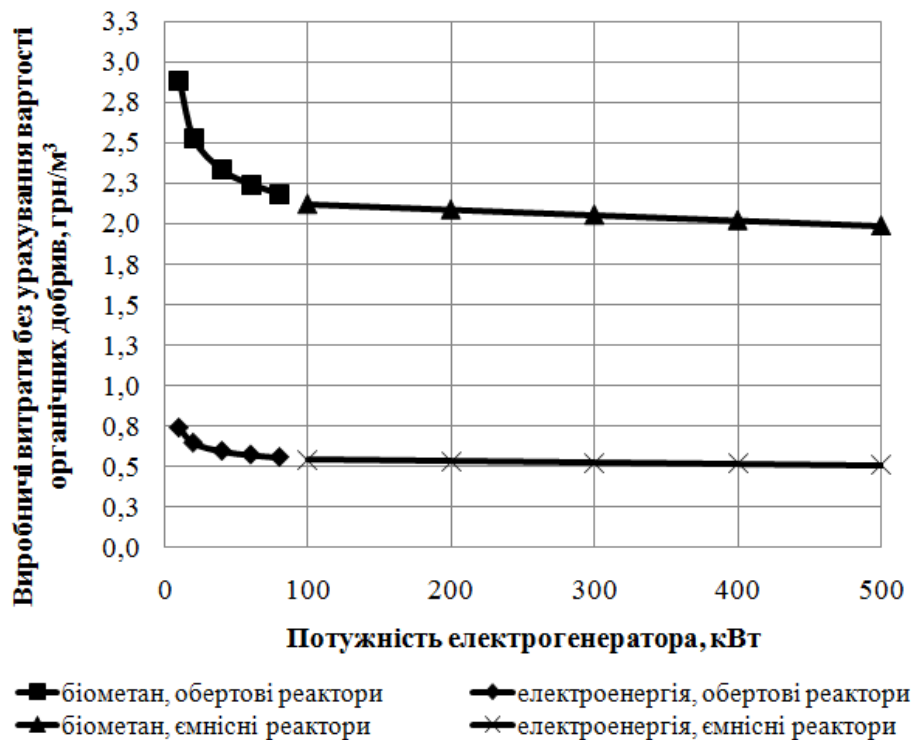


Рис. 8.9. Залежність виробничих витрат на виробництво біометану та електроенергії на його основі, без урахування вартості органічних добрив від потужності електрогенератора

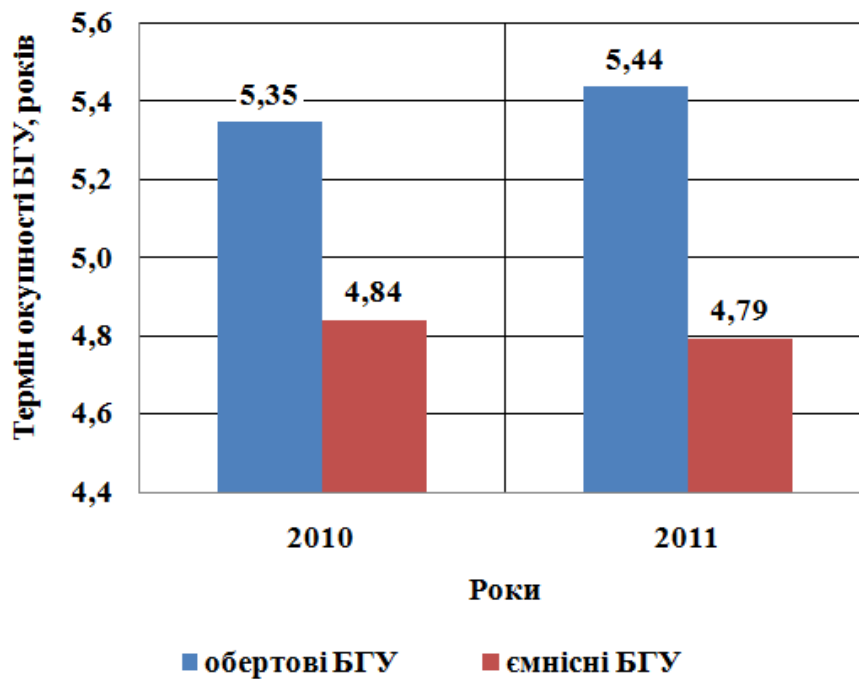


Рис. 8.10. Залежність терміну окупності біогазових установок різних типів, без урахування вартості органічних добрив

Таким чином, собівартість виробництва біометану без урахування вартості органічних добрив знаходиться в межах від 2,19 до 2,89 грн/м³ для біогазових установок з обертовими реакторами та від 1,99 до 2,12 грн/м³ для біогазових установок з ємнісними реакторами. Собівартість виробництва електроенергії на основі біометану знаходиться в межах від 0,56 до 0,74 грн/кВт год. для біогазових установок з обертовими реакторами та від 0,51 до 0,54 грн/кВт год. для біогазових установок з ємнісними реакторами.

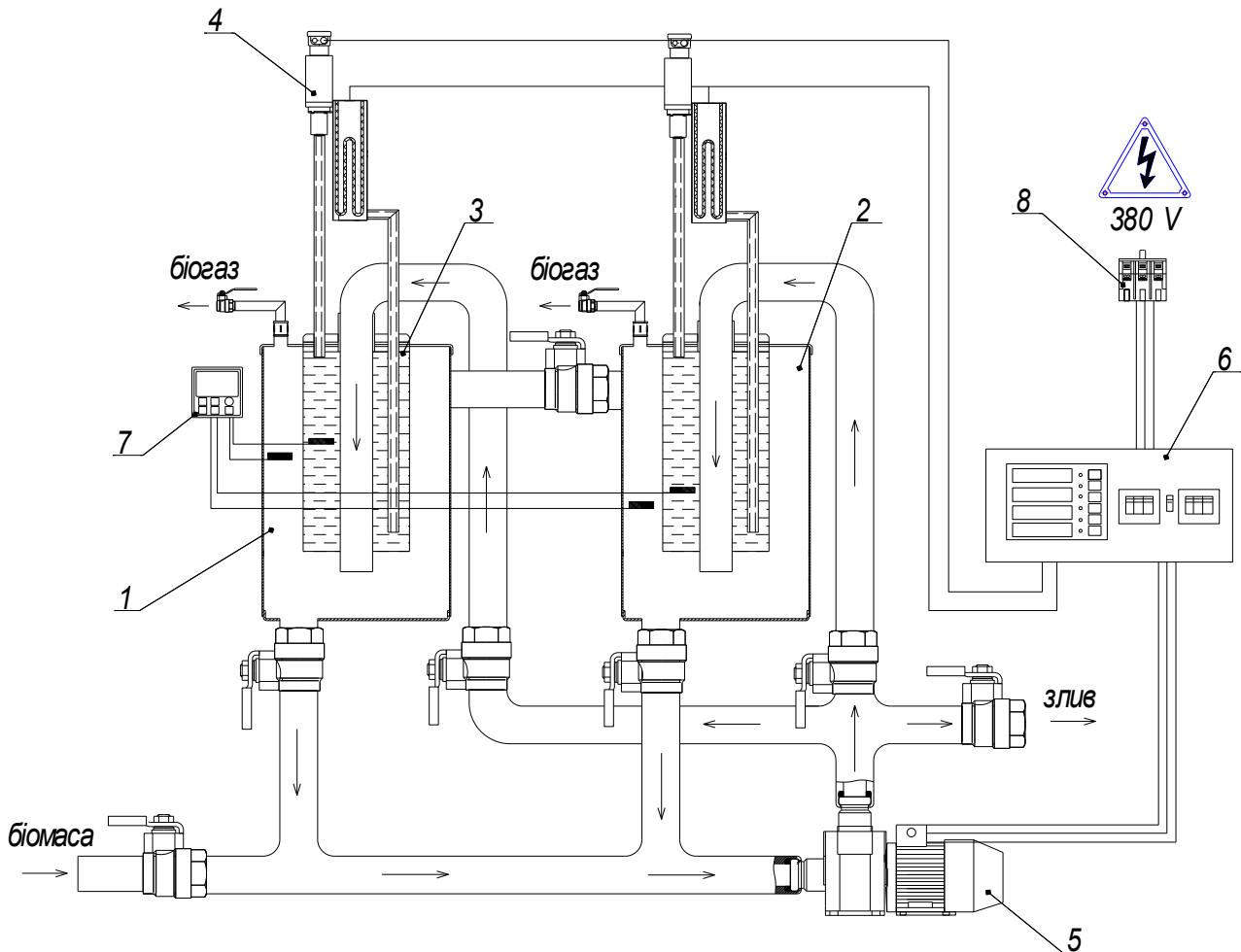
Перевищення ціни органічних добрив на виході з біогазової установки над ціною гною на вході в установку, для забезпечення нульової собівартості біометану та електроенергії на його основі, знаходиться в межах від 61 до 78 грн/т. Нагальним є також необхідність підсилення економічних механізмів інвестиційної підтримки сільськогосподарських підприємств, які впроваджують біогазові установки для виробництва біометану та електроенергії.

Лабораторна робота 8: Визначення зміни температури біомаси упродовж встановленого проміжку часу та витрат енергії на її нагрів під час аеробного та анаеробного зброджування у біогазовій установці проточного типу.

Мета роботи: Ознайомитись із принципом дії біогазової установки проточного типу та визначити залежність зміни температури біомаси упродовж встановленого проміжку часу та витрати енергії на її нагрів.

Прилади та обладнання: біогазова установка проточного типу, регулятор температури, аналізатор параметрів мережі.

Після ознайомлення з конструкцією біогазової установки проточного типу та необхідним обладнанням, згідно схеми (рис. 8.11) монтується обладнання та підключається необхідні прилади.



1 – ємність для анаеробного зброджування; 2 – ємність для аеробного зброджування; 3 – нагрівач біомаси; 4 – електроводонагрівач з насосом; 5 – насос для перекачування біомаси; 6 – аналізатор параметрів мережі; 7 – регулятор температури біомаси; 8 – трифазна електрична мережа

Рис. 8.11. Схема підключення приладів для визначення температури біомаси та витрат енергії на її нагрів

У роботу вмикається електроводонагрівач з насосом і нагріта вода надходить в нагрівач біомаси. Завдяки теплообміну між нагрівачем та біомасою відбувається нагрів біомаси. По мірі проходження часу нагріву, температура біомаси збільшується. Починаючи з початкового значення температури та через задані проміжки часу проводять вимірювання температури біомаси за допомогою регулятора температури. За допомогою аналізатора параметрів мережі визначають споживану потужність необхідну для нагрівання біомаси. Результати вимірів заносяться в таблицю 8.3.

Таблиця 8.3. Результати вимірювань температури біомаси та витрат енергії на її нагрів у біогазовій установці проточного типу

Час нагріву, год.	Температура біомаси, °C	Витрати електроенергії, кВт год.
0	10,74	0
0,57	11,75	0,5
1,27	17,56	1
2,10	23,25	1,5
2,98	28,06	2
3,88	31,87	2,5
4,80	35	3
5,77	37,38	3,5
6,77	39,19	4
7,75	40,5	4,5
8,72	41,44	5
9,72	42,06	5,5
9,88	42,19	5,55

Результати дослідів по динаміці температури у графічному вигляді приведені на рис. 8.12.

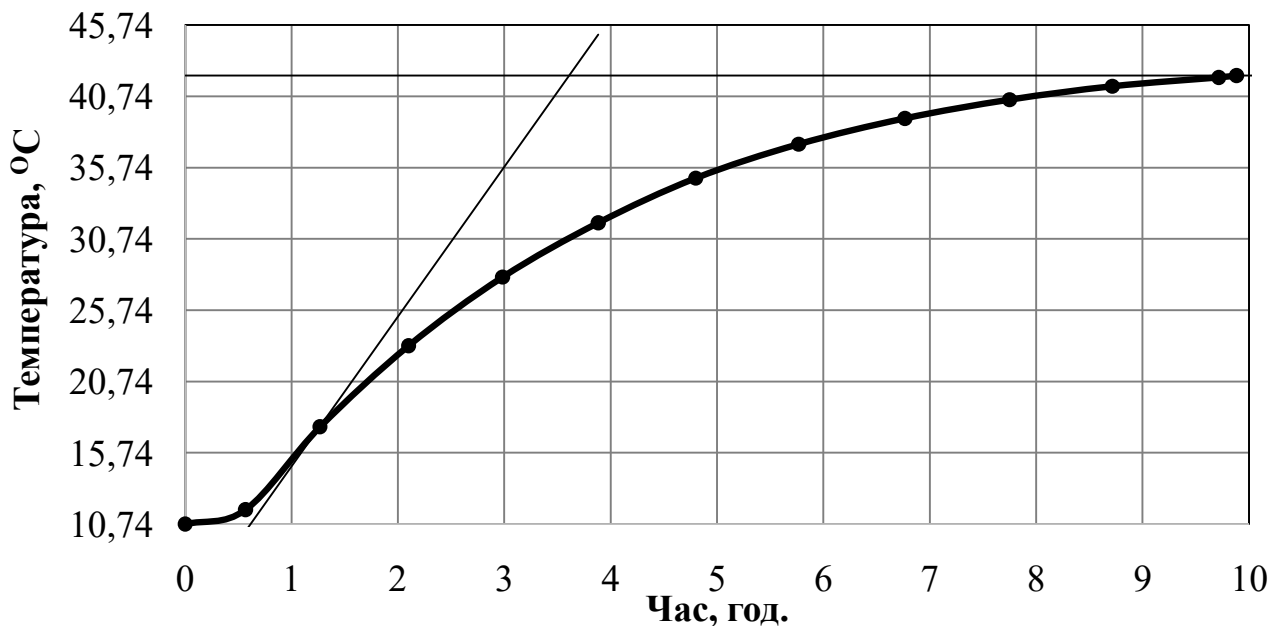


Рис. 8.12. Залежність температури біомаси від часу нагріву

Із графіка можна встановити, що після включення нагріву температура біомаси змінюється не миттєво, а через деякий час. Цей час має назву "час запізнення". У даному випадку час запізнення становить $\tau_z=0,613$ год. Максимальне значення температури біомаси, яке була досягнуто під час нагріву становило $T_c=42,19^\circ\text{C}$. Це значення при подальшому нагріві залишається незмінним і має назву "усталене значення температури". Постійна часу

біогазової установки визначається як час, за який температура досягає значення 63% від усталеної температури за вирахуванням часу запізнення. Згідно графіка на рис. 8.12, постійна часу становить $T \approx 3$ год. Коефіцієнтом передачі у даному випадку є відношення усталеного значення температури біомаси до

Таким чином встановлено, що при рівні занурення барабана від 30 до 120 см спостерігається зменшення споживаної потужності з 85 до 75 Вт, а при подальшому зануренні барабана від 120 до 140 см спостерігається збільшення споживаної потужності на обертання барабана з 75 до 77 Вт.

Практична робота 8: Визначити собівартість виробництва електроенергії на основі біометану при анаеробному зброджуванні гноївки скотарських та свинарських ферм.

Вихідні дані: Густина біомаси вологістю 92 % для переробки в біогазовому реакторі ($\rho_{ПБ}$) – 1,05 т/м³. Вихід біометану за добу із розрахунку на одиницю об'єму біогазового реактора ($k_{БМ}$) – 0,75 м³/м³ добу. Час утримання біомаси в реакторі під час зброджування ($\tau_{ЗБ}$) – 15 діб. Теплотворна здатність біометану ($q_{БМ}$) – 37 МДж/м³. Коефіцієнт корисної дії дизель-генератора при отриманні електроенергії ($\eta_{Г}$) – 0,38 відн. од.; Вихідні дані для розрахунку економічних показників виробництва біометану приведені в таблиці 8.3.

Таблиця 8.3 – Вихідні дані для розрахунку економічних показників виробництва біометану та електроенергії на основі біометану

Показник	Значення показника
Ціна біомаси рідкого гною до зброджування в біогазовому реакторі ($C_{ГН}$), грн/т	30
Ціна органічних добрив після зброджування в біогазовому реакторі ($C_{ОД}$), грн/т	40
Коефіцієнт, що враховує загальновиробничі витрати ($k_{ЗВ}$), відн. од.	0,05
Коефіцієнт, що враховує загальногосподарські витрати ($k_{ЗГ}$), відн. од.	0,1
Відрахування на технічне обслуговування і ремонт біогазової установки ($ТОР_{БМ}$), грн/м ³	0,34
Вартість витраченої електричної енергії ($ЕЛ_{БМ}$), грн/м ³	0,1
Фонд заробітної плати з нарахуваннями, грн/м ³	0,07

Питомі виробничі витрати на виробництво електроенергії на основі біометану становлять:

$$E_{ЕЛ} = (1 + k_{ЗВ} + k_{ЗГ})(ТОР_{ЕЛ} + ЕЛ_{ЕЛ} + 3П_{ЕЛ}) = (1 + 0,05 + 0,1)(0,34 + 0,1 + 0,07) = 0,59 \text{ грн / кВт год.}$$

З урахуванням цього, собівартість виробництва електроенергії на основі біометану становитиме:

$$C_{ЕЛ} = \frac{3,6\rho_{ПБ}}{k_{БМ}q_{БМ}\eta_{Г}\tau_{ЗБ}}(C_{ГН} - C_{ОД}) + E_{ЕЛ} =$$

$$= \frac{3,6 \cdot 1,05}{0,75 \cdot 37 \cdot 0,38 \cdot 15}(30 - 40) + 0,59 = 0,35 \text{ грн / кВт год},$$

а перевищення ціни органічних добрив після зброджування над ціною біомаси рідкого гною до зброджування в біогазовому реакторі для забезпечення нульової собівартості електроенергії на основі біометану становитиме:

$$C_{ОД} - C_{ГН} = \frac{E_{ЕЛ}k_{БМ}q_{БМ}\eta_{Г}\tau_{ЗБ}}{3,6\rho_{ПБ}} = \frac{0,59 \cdot 0,75 \cdot 37 \cdot 0,38 \cdot 15}{3,6 \cdot 1,05} = 24,69 \text{ грн / т.}$$

Таким чином, забезпечення нульової собівартості електроенергії на основі біометану буде при перевищенні ціни органічних добрив після зброджування над ціною біомаси рідкого гною до зброджування в біогазовому реакторі в межах від 24 до 25 грн/т.

Запитання для самоконтролю:

1. Назвіть основні способи використання біометану.
2. Для чого необхідно проводити очищення та збагачення біогазу?
3. Який газ називають біометаном?
4. Назвіть основні вимоги до якості біометану.
5. Назвіть основні етапи очищення та збагачення біометану.
6. Скажіть за яких умов можливе постачання біогазу в загальну мережу природного газу?
7. Яким чином здійснюється видалення сірководню із біогазу?
8. Як відбувається осушення біогазу?
9. Який процес називають збагаченням біогазу?
10. Як відбувається збагачення біогазу?
11. Що називають когенерацією?
12. Що називають когенератором?
13. Що являє собою когенераційна установка для переробки отриманого біогазу?
14. Як визначити виробничу собівартість виробництва електроенергії на основі біометану?
15. Який показник дизель-генератора визначає економічну ефективність виробництва електроенергії на основі біометану?
16. Яка потреба в біомасі для отримання 1 м³ біометану за час зброджування?
17. Яка потреба в біомасі для отримання 1 кВт год. електроенергії за час зброджування?
18. Яка собівартість виробництва електроенергії на основі біометану?
19. Який орієнтовний термін окупності біогазових установок?

20. Що являє собою "зелений тариф" та яке він має відношення до роботи біогазових установок?

21. Яка частина теплової енергії біогазу може бути перетворена в електроенергію?

Література:

1. Баадер В. Биогаз: теория и практика (Пер. с нем. и предисловие М. И. Серебряного.) / Баадер В., Доне Е., Бренндерфер С. // – М.: Колос, 1982 – 148 с.

2. Биогаз на основе возобновляемого сырья. Сравнительный анализ шестидесяти одной установки по производству биогаза в Германии / [Геммеке Бурга, Крисста Ригер, Войланд Петер и др.]. – Гюльцов: FNR, 2010. – 118 с.

3. Гелетуха Г.Г. Перспективы виробництва та використання біометану в Україні. / Г.Г. Гелетуха, П.П. Кучерук, Ю.Б. Матвеев // Аналітична записка Біоенергетичної асоціації України №11 – 2014 г. – 42 с.

4. Куріс Ю.В. Біогазові технології. Енергетичні та екологічні аспекти / Ю.В. Куріс, І.Ф. Червоний // – Запоріжжя: ЗДІА, 2010 – 487 с.

5. Мовсесов Г.Є. Основні положення технології біогазового (анаеробного метанового) зброджування органічних відходів Рекомендації / Мовсесов Г.Є., Ляшенко О.О. // Інститут механізації тваринництва НААН України. – Запоріжжя: ІМТ НААН України, 2010. – 29 с.

6. Руководство по биогазу. От получения до использования / Специальное агентство возобновляемых ресурсов (FNR). 5-е издание. – Гюльцов: Германия, 2012. – 213 с.

7. Эдер Барбара. Биогазовые установки. Практическое пособие / Б. Эдер, Х. Шульц // - Zorg Biogas, 2008 – 268 с.

8. Шульц Рейнхард. Виробництво і використання біогазу в Україні [Шульц Рейнхард, Юрген Кооп, Жанет Хохі та ін.]– Рада з питань біогазу (Biogasrat e.V.), 2012 – 74 с.

9. O. Hacke. Biogas von A bis Z. / O. Hacke, M. Helm // – Borsig Energy GmbH, 2001. – 47 p.

10. Handreichung. Biogasgewinnung und – nutzung. / [Amon Tomas, fon Bredov Hartvig, Doeler Helmut ets.]. – Gulzow: FNR, 2010. – 234 p.

11. Tasneem Abbasi. Biogas Energy. / T Abbasi, S. Tauseet, S. Abbasi // - New York: Springer, 2012. – 169 p.

9. МЕХАНІЗАЦІЯ ЗАГОТІВЛІ СОЛОМИ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ

9.1. Загальна структура енергетичного використання соломи зернових культур

Україна щорічно виробляє від 50 до 60 млн. т зернових і зернобобових культур. При цьому, в тих самих обсягах виробляється і солома. Її в основному використовують як добриво для ґрунтів а також у тваринництві в якості підстилки та корму тварин.

Але від 20 до 30% соломи можна щорічно використовувати для альтернативного використання: прямого спалювання та використання в якості сировини для виробництва біопалива (брикети, пелети).

При спалюванні соломи в котлах можна забезпечити гаряче водопостачання та тепло для опалення приміщень. Ці процеси забезпечується автономними незалежними системами опалення. Такі системи можуть бути малими або великими та можуть використовуватись для приватних будинків, а також для великих районів або підприємств.

Солома є екологічно безпечним джерелом енергії. У процесі росту соломи поглинається така ж кількість вуглецю, яка виділяється при її спалюванні. Солома є місцевим паливом, досить розповсюдженим у сільськогосподарських районах і відносно дешевим, порівняно з традиційними. Так, верхня теплотворна здатність соломи (суха речовина) складає 4,9 кВт год./кг. Для типової вологості 15% нижня теплотворна здатність складає 4,1 кВт год./кг. Кількість енергії, що міститься в 1 м³ ущільненої тюкової соломи, складає до 450 кВт год. (щільність до 130 кг/м³). В Україні найбільш перспективними для використання в найближчі роки можна вважати соломоспалюючі фермерські котли та котли для малих тепломереж потужністю 0,1-1 МВт. Але широке використання цих технологій потребує вирішення ряду питань організації збору, пресування тюків, транспортування та зберігання соломи. Також невирішеними залишаються питання, щодо рівномірності горіння соломи в топці котла.

В Україні, найбільшою перешкодою для енергетичного використання соломи є обмеженість досвіду та необхідних інвестицій. Іншими перешкодами може бути:

- необхідність розвитку ринка соломи з привабливими цінами як для споживачів, так і для постачальників;

- у деяких випадках наявність пестицидів може призвести до збільшення вмісту хлору в соломі. Проте якщо солома витримується на полях на протязі певного періоду (зів'янення) то вміст хлору досягає низьких значень.

Ще однією важливою перешкодою для використання соломи в якості палива служить відсутність придатних для її спалювання топків. Суха (вологістю до 25%) солома добре горить у всіляких топках, однак її ККД (особливо при неповному завантаженні) досить низький і складає 45%. Проте значна неоднорідність біомаси, з точки зору хімічного складу та фізичних

властивостей, викликає певні труднощі, як в процесі спалювання, так і емісії компонентів, які є побічними продуктами процесу. Характеристика соломи в залежності від технології їх підготовки до спалювання наведена в табл. 9.1.

Таблиця 9.1. Характеристика твердих видів біопалива в залежності від технології їх приготування до спалювання

Вид соломи	Об'ємна маса (щільність), кг/м ³	Питомий об'єм, м ³ /т	Питома енергемісткість, МВт/м ³
Звичайна солома	20-50	20-50	0,7-0,16
Подрібнена солома (січка)	40-60	16-25	0,13-0,19
Великі прямокутні паки	70-130	7,7-14	0,23-0,43
Круглі паки	60-90	11-16	0,19-0,29
В'язанки	50-110	9-20	0,16-0,36
Брикети	300-450	2,2-3,3	0,99-1,48
Пеллети	350-500	1,9-3,0	1,1-1,6

Фізичні особливості соломи, як енергоносія представлені в таблиці 9.2.

Таблиця 9.2. Вплив вологості на теплоту згорання біомаси

Матеріал	Спосіб висушування	Вологість, %	Теплота згорання, МДж/кг
Солома зернових	одразу після збирання	15-20	12-15
	висушена на повітрі	14-17	14-15
Солома ріпакова	одразу після збирання	30-40	10-12
	висушена на повітрі	17-20	14-15
Стебло кукурудзи	одразу після збирання	45-60	5-8
	висушена на повітрі	15-18	15-17

Солома – складний вид палива, забезпечення котла соломою ускладнено її неомогенною структурою, відносно великою вологістю і великим об'ємом порівняно з вмістом енергії. Більш того, 70% компонентів соломи, що згоряють, містяться в летючих газах, які виділяються в процесі спалювання. Велика кількість летючих компонентів потребує спеціальної конструкції топки та організації потоку повітря в ній. Солома містить сполуки хлору, які можуть викликати проблеми з корозією при високих температурах. Температура плавлення попелу соломи низька через високий вміст лужних металів. У результаті можуть виникнути проблеми з видаленням попелу.

Для ефективного енергетичного використання соломи, перш за все необхідно оптимізувати структуру технологічного процесу конверсії (спалювання чи переробки) соломи. Даний процес може бути представлений у вигляді одного технологічного ланцюга (рис. 9.1), що містить різнонаправлені технологічні операції (фактори).



Рис. 9.1. Технологічний ланцюг використання соломи для енергетичного використання

9.2. Термінологія щодо заготівлі соломи для енергетичного використання

Солома (straw) – сухі світло-жовті стебла злакових рослин, що залишаються після обмолоту і які використовують як корм для тварин, паливо, а також для підстилки, покриття будівель і т. ін.

Твердопаливний котел (solid fuel boiler) – це пристрій для утворення і передавання теплової енергії теплоносію з метою подальшого її використання в цілях опалення, який працює на дровах, вугіллі, паливних гранулах (пелетах), рослинних рештках.

Прес-підбирач (baler) – машина для підбирання з валків просохлої трави або соломи з одночасним пресуванням її в тюки.

Тюк соломи (packs of straw) – спресована солома.

Паливні гранули (fuel pellets) – спресовані частки, що мають форму циліндра або призми і застосовуються для отримання теплової енергії.

Біопаливні гранули (biofuel pellet) – паливні гранули виготовленні з біомаси.

Брикети (briquettes) – це паливні гранули діаметром понад 25 мм з можливим внутрішнім отвором діаметром до 20 мм.

Пеллети (pellets) – це паливні гранули діаметром до 25 мм.

9.3. Технологія заготівлі соломи

Ефективність використання незернової частини урожаю в якості енергоносія значною мірою залежить від витрат при збиранні соломи. Так, збільшення витрат на 20% спричиняє зростання вартості енергоносія на 10-15%. В Україні набули поширення такі технології збирання соломи зернових

культур: подрібнення зернозбиральним комбайном, транспортування тракторними причепами, скиртування з формуванням скирти; скиртування зернозбиральним комбайном, стягування тросовою волокушою на край поля, скиртування; валкова технологія збирання соломи.

Як правило, технології збирання соломи, які базуються на подрібненні соломи зернозбиральним комбайном, транспортуванні тракторними причепами, скиртуванні з формуванням скирти, а також з скиртуванням зернозбиральним комбайном, стягуванням тросовою волокушою на край поля та подальшим скиртуванням, використовуються в технологічних процесах заготівлі кормів, з метою забезпечення тваринницьких ферм кормами та підстилковими матеріалами.

Валкова технологія збирання соломи в тюки та рулони передбачає можливість закладання її під накриття, що дозволяє підвищити якість процесу підготовки рослинного матеріалу та забезпечує зменшенням транспортних витрат при подальшому спалюванні в котлах. Так, технологія заготівлі соломи, сіна та грубих кормів у пресованому вигляді посідає домінуюче місце у країнах Західної Європи. Солому пресують у малі, середні та великі тюки циліндричної та прямокутної форми, з різним ступенем щільності (табл. 9.2, 9.3).

Малі тюки були найбільш поширеним видом тюків, які використовувались в присадибному господарстві в котлах малої потужності, протягом багатьох років, основною їх перевагою є можливість переміщення вручну, в останні роки попит на невеликі тюки істотно знизився тому відповідно зменшилось виробництво поршневих прес-підбирачів для формування таких тюків.

Середні циліндричні тюки широко використовуються в фермерських котлах нарівні з прямокутними тюками. Останнім часом значного поширення набула технологія заготівлі сіна в рулонах з використанням рулонних прес-підбирачів, їх доля на світовому ринку становить до 80% усіх продаж машин для підбирання соломи. Це пояснюється простотою конструкції рулонних прес-підбирачів і, відповідно, меншою їх вартістю порівняно з прес-підбирачами великогабаритних тюків.

Таблиця 9.2. Технологічні властивості тюків

Щільність тюка		Вологість соломи в тюку (%)	Рекомендована територіальна зона для формування тюка
вид щільності	значення (кг/м ³)		
низька	до 100	до 40%	полісся
середня	100...200	до 25%	лісостеп
висока	200...300	до 22%	степ

Великі тюки можуть використовуватися у великих котельнях централізованого теплопостачання. Водночас останнім часом поширюється технологія збирання соломи із застосуванням прес-підбирачів великогабаритних тюків, які мають незаперечні переваги перед іншими

конструкціями машин. Головні з них такі: висока продуктивність і, відповідно, менші затрати праці; збереження високої якості матеріалу за рахунок зменшення втрат під час збирання; краще використання вантажопідйомності транспортних засобів, площ складських приміщень, підвищення продуктивності навантажувачів.

Таблиця 9.3. Основні типорозміри тюків

Типорозмір тюка	Щільність тюка (кг/м ³)	Маса тюка (кг)	Поперечний розмір тюка		Довжина тюка (м)
			прямокутної форми (см×см)	круглої форми (м)	
малий	100-125	12-15	46×36	-	1,3
середній	100-140	200-300	80×80	1,2-1,8	1,2-1,7
великий	130-150	450-500	120×130	-	2,4

Для збирання соломи в тюки застосовують поршневі прес-підбирачі для формування малогабаритних тюків, рулонні преси та преси для формування великогабаритних тюків. Класифікація прес-підбирачів для формування тюків рослинного походження різної форми і типорозмірів представлена на рис. 9.2.



Рис. 9.2. Класифікація прес-підбирачів

Пресування соломи у тюки прямокутної або циліндричної форми успішно застосовується в сучасному сільськогосподарському виробництві і стає однією з головних технологічних операцій в ресурсозберігаючих технологіях збирання

і використання соломи. Завдяки пресуванню соломи значно зменшуються транспортні витрати, більш повно використовуються приміщення для зберігання, механізуються всі вантажно-розвантажувальні роботи.

Стосовно прес-підбирачів слід відмітити таких відомих виробників, як: Krone, Claas, Welger, Gehl, Fortschritt, Deutz-Fahr, New Holland, Vermeer, John Deere, Hesston, Massey Ferguson, Case IH та інші. Росія, Білорусія та Україна представлені підприємствами: ОАО “Бежецксельмаш”, ОАО “Рузхиммаш”, ОАО “Нефаз”, ОАО “Бобруйскагромаш”, ВАТ “Ірпіньмаш”, ВАТ “Чернівцісільмаш” та іншими.

Для збирання соломи в малогабаритні тюки використовують прес підбирачі поршневого типу (рис. 9.3), що знайшли широке застосування у малих та середніх аграрних підприємствах.



Рис. 9.3. Прес-підбирач поршневого типу для формування малогабаритних тюків, марки FAMAROL Z-511 (Unia Group)

Для формування тюків середнього типорозміру останнім часом широко використовують рулонні прес підбирачі (рис. 9.4). Це пояснюється простотою конструкції рулонних прес-підбирачів і, відповідно, меншою їх вартістю порівняно з прес-підбирачами великогабаритних тюків. Тому такі конструкції машин найбільш поширена серед фірм-виробників. Рулонні прес-підбирачі розподіляються на преси з камерами постійного та змінного перерізу. За своєю конструкцією формуючі камери є вальцеві, ланцюгово-планчасті та пасові. Прес-підбирачі з камерами змінного перерізу формують рулони діаметром від 0,8 до 1,8 м. Діаметр рулонів встановлюється залежно від умов зберігання. Для заготівлі кормів використовують рулони меншого діаметру, а для соломи – більшого.

Водночас дедалі більше користується попитом технологія із застосуванням прес-підбирачів великогабаритних тюків (рис. 9.5).

Після формування тюків, рулонів їх навантажують на транспортні засоби та доставляють до місць зберігання (рис. 9.6).



Рис. 9.4. Прес-підбирач рулонного типу для формування тюків середнього та великого типорозмірів, марки Rollant 250 (Claas)



Рис. 9.5. Прес-підбирач поршневого типу для формування тюків середнього та великого типорозмірів, марки Krone "BigPack VFS1290"



Рис. 9.6. Транспортний причіп для доставки тюків в місця зберігання

Зберігання тюків соломи може проводитися різними способами: у штабелях на відкритому повітрі, у відкритих коморах (дах і опори), під брезентом, під пластиковою плівкою, в закритих приміщеннях. Спосіб збереження впливає на якість соломи. При збереженні під відкритим небом біля

10% соломи стає непридатною для енергетичного використання. Зберігання в відкритих коморах приводить до погіршення якості соломи, адже вологість верхнього шару при цьому зростає до 25%.

9.4. Технології виробництва паливних гранул та брикетів

Розвиток технологій та обладнання для виробництва біопаливних гранул та брикетів започаткував створення нових типів котлів з повною механізацією процесу завантаження палива і автоматизацією контролю процесу горіння.

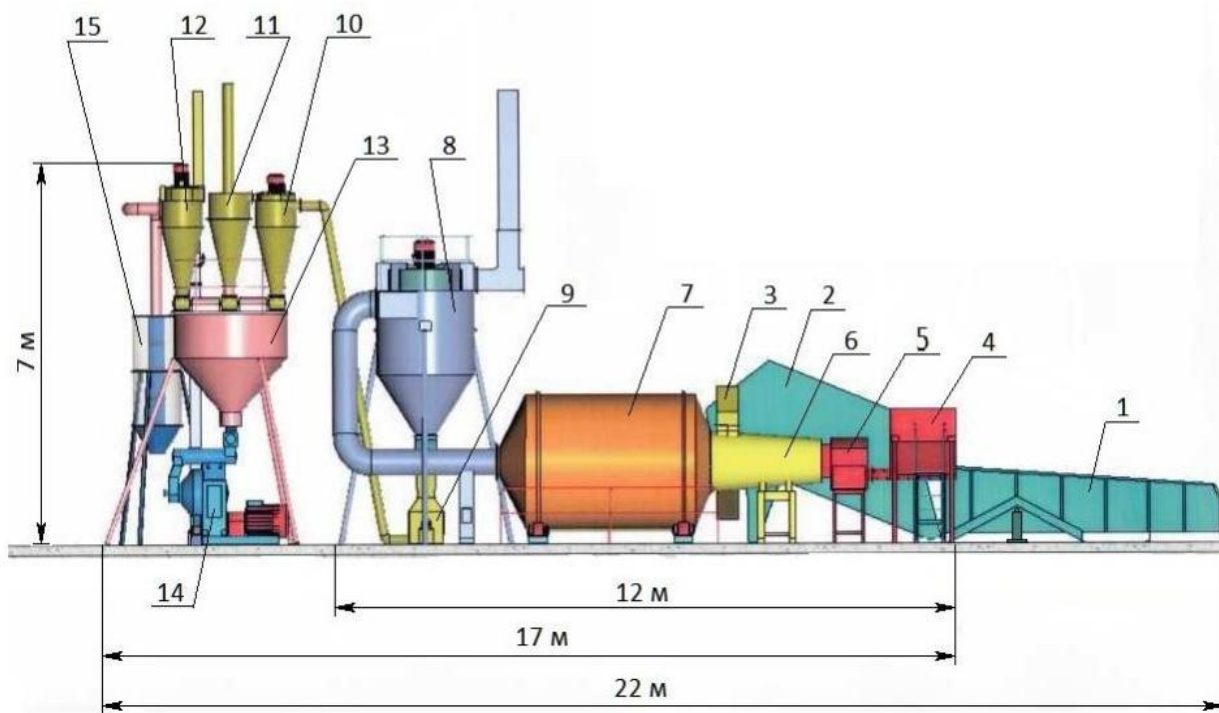
Біопаливні гранули (пеллети) та брикети легко транспортувати, вони не набирають вологу, не гниють і не втрачають свої паливні властивості під час зберігання, найбільш придатні до механізованого завантаження до енергетичної установки. Весь процес переміщення гранул від виробника до споживача здійснюється без застосування ручної праці.

Основним елементом (машиною) лінії грануляції (пресування) є гранулятор (прес), від характеристик якого залежать техніко-економічні показники всієї лінії. Після відповідної підготовки дозуючий шнек транспортує матеріал до преса. Спеціальні ролики, так звані пресувальні вальці, пресують матеріал, пропускаючи його через отвори кільцевої матриці (преса-гранулятора), що обертається. Пресувальні вальці рухаються по плоских матрицях. Шляхом зміни діаметра отворів, довжини каналу матриці преса, відстані між робочою поверхнею матриць та вальців, а також пресувального тиску можна отримати кінцевий продукт, який за якістю відповідає встановленим нормам.

Для гранулювання використовують лінії, які використовувалися у кормовиробництві (рис. 9.7), а також сучасні лінії гранулювання та брикетування біомаси для теплових потреб (рис. 9.8, рис. 9.9).

Після пропускання через матрицю пеллети ріжуться на необхідну довжину, і, оскільки в процесі пресування вони нагріваються, їх охолоджують під дією навколишнього повітря в охолоджувачі. В результаті цього вони набувають необхідної твердості та міцності. Перед пакуванням та складуванням пеллет виконується сепарація, що дозволяє відділити пил, дрібні часточки та пеллети, що не мають достатньої механічної міцності.

Пакування пеллет залежить від способу їх подальшого транспортування. Пеллети транспортують: насипом; в мішках по 10-20 кг; в мішках «Big-Bag». Насипом транспортують технологічні гранули, рідше – гранули високої якості. Упаковка в мішки по 10-20 кг є доволі зручною та призначена для власників індивідуальних котлів. Транспортують такі мішки на піддонах. Вміст одного піддона – 1 т. Мішки «Big-Bag» призначені для промислового транспортування сипких речовин. Один такий мішок містить від 1 до 1,5 т пеллет. Вони використовуються для спрощення перевезення і збереження вологості. На дільниці пакування встановлюються бункери для завантаження автотранспорту, бункери з дозувальними пристроями для заповнення мішків типу «Big-Bag» та агрегат для наповнення малих мішків.



1 – завантажувач; 2 – поживник; 3 – транспортер; 4 – бункер-наповнювач; 5 – палильня; 6 – теплогенератор; 7 – сушарка; 8, 10, 11, 12 – циклони; 9 – подрібнювач; 13 – бункер-накопичувач; 14 – гранулятор; 15 – охолоджувач

Рис. 9.7. Лінія грануляції соломи на базі ОГМ-1,5



Рис. 9.8. Лінія гранулювання біомаси ЕСО-ВІО-100 виробництва НУБІП (Чехія-Україна)



Рис. 9.9. Машина брикетувальна В-80 виробництва ВАТ «Пресмаш» Україна

Процес виробництва паливних брикетів і гранул із біомаси включає наступні технологічні операції (рис. 9.10):

1. Подрібнення сировини (для отримання фракції, яка найбільше підходить для брикетування) – за необхідності.
2. Сушіння сировини до рівня вологості 12 % та нижче – за необхідності.
3. Пресування.
4. Охолодження.

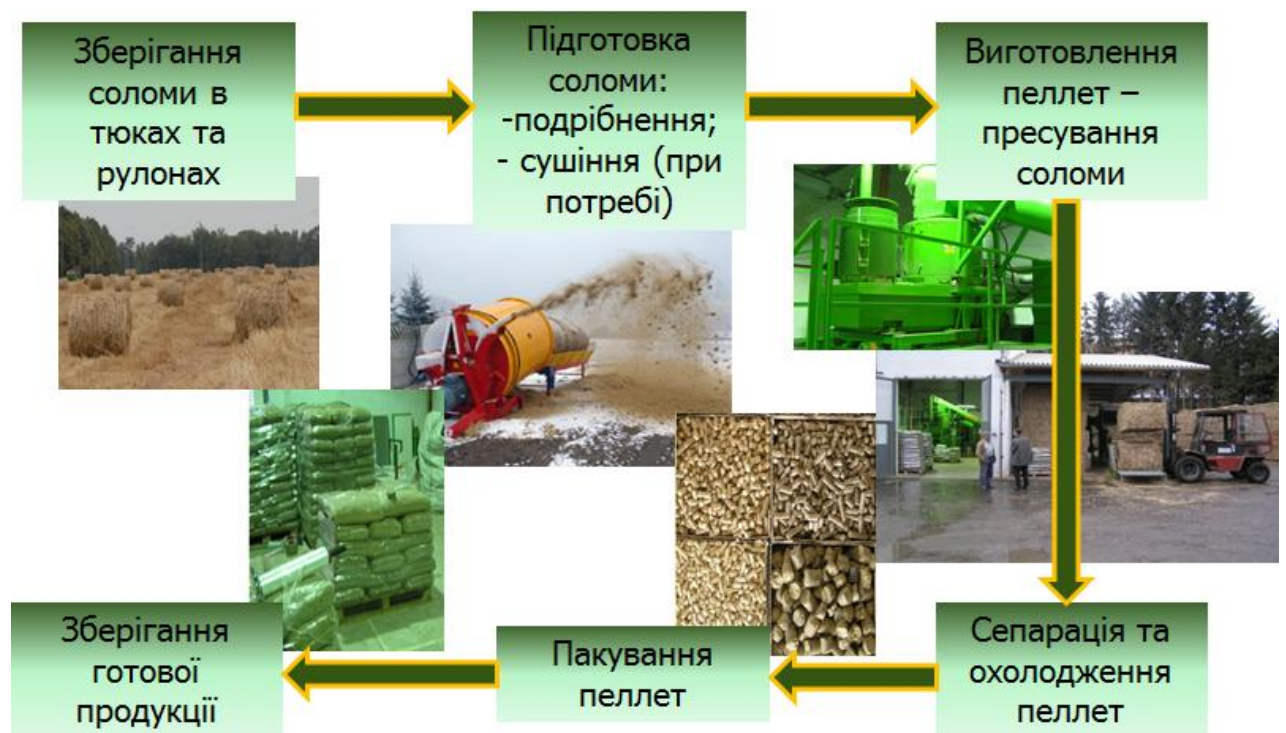


Рис. 9.10. Технологічний процес виготовлення пеллет з соломи

Загальний вигляд отримуваних гранул та брикетів приведений на рис. 9.11 та рис. 9.12.



Рис. 9.11. Паливні гранули – пеллети



Рис. 9.12. Паливні брикети

Технологія виробництва паливних брикетів із соломи відрізняється від технології отримання паливних брикетів з тирси відсутністю операції сушіння. Розрізані солом'яні тюки подаються в завантажувальний бункер роторної дробарки. Під дією сили ваги вони потрапляють в робочу камеру, де солома подрібнюється від ударів молотків ротора. Заданий ступінь подрібнення забезпечується відповідним діаметром отворів на решітці, яка встановлена на вивантажувальному рукаві. Через вивантажувальний рукав подрібнена солома спрямовується в завантажувальний бункер, звідки за допомогою ворушильника вона направляється в прес-брикетувальник, де відбувається її пресування. Під дією сили власної ваги готові брикети відламуються і падають у вивантажувальний бункер.

Класифікація машин для виготовлення паливних гранул та брикетів приведена на рис. 9.13.

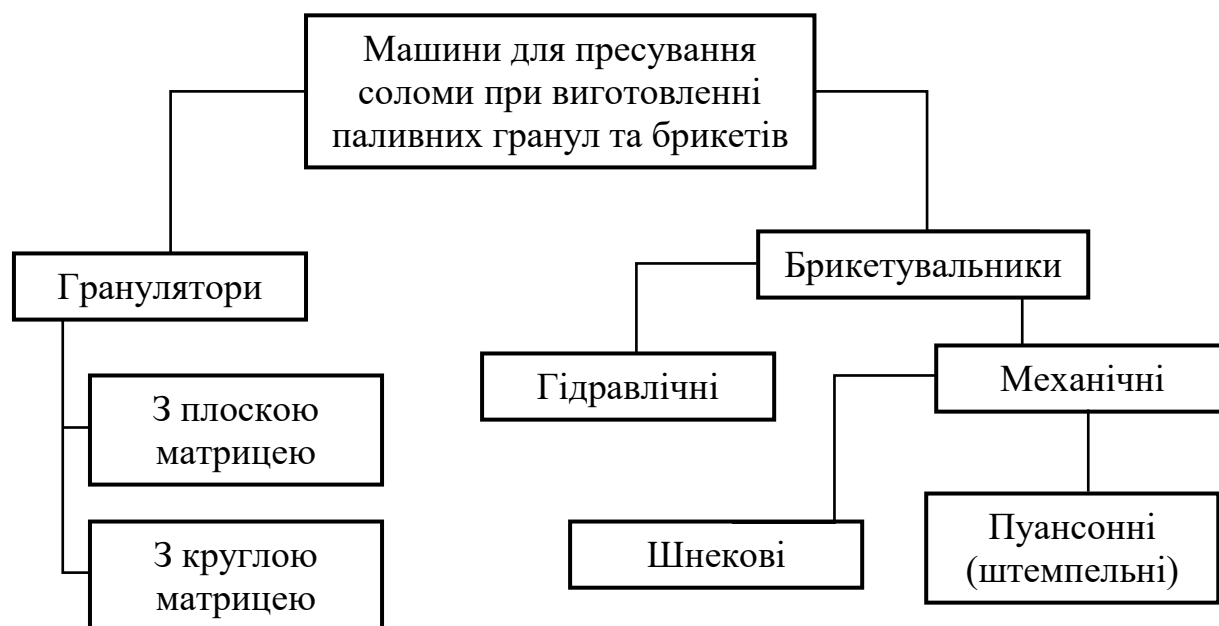


Рис. 9.13. Класифікація машин для виготовлення паливних гранул та брикетів

Оскільки виробництво пеллет в Україні є новою галуззю, яка, здебільшого, орієнтована на експорт, поширення набули стандарти виробництва пеллет, прийняті у Німеччині та Австрії (табл. 9.4).

Таблиця 9.4. Вимоги окремих стандартів до якості вироблених пеллет

Норми якості для гранул (пеллет)	Одиниця виміру	Значення згідно із стандартом ONorm M 7135 (Австрія)	Значення згідно із стандартом DIN 51731 (Німеччина)
Діаметр, D	мм	4-10	4-10
Довжина	мм	5xD	<50
Густина (щільність)	кг/дм ³	>1,12	1,0-1,4
Вміст вологи	%	<10	<12
Вміст золи	%	<0,50	<1,50
Теплота згоряння	МДж/кг	>18	17,5-19,5
Вміст сірки	%	<0,04	<0,08
Вміст азоту	%	<0,3	<0,3
Вміст хлору	%	<0,02	<0,03
Вміст пилу (стирання)	%	<2,3	-
Вміст допоміжних компонентів	%	<2	<2

Технологія виготовлення не залежить від типів сировини і є однаковою, як для соломи, так і для тирси різних порід дерев. Брикетуванню та гранулюванню підлягає вся сировина, рівень вологи якої не більший 12%.

Продуктивність лінії гранулювання біомаси ЕСО-ВІО-100 80 кг/год. при встановленій потужності 8,85 кВт. Продуктивність машини брикетувальної В-80 становить 1,20 т/год. при встановлені потужності 40,2 кВт.

9.5. Використання котлів для спалювання соломи

Виходячи з особливостей технологій спалювання біомаси всі твердопаливні котли можна умовно розділити на наступні групи:

1. Традиційні твердопаливні котли.
2. Твердопаливні котли з піролізним спалюванням (газогенераторні котли).
3. Універсальні (багатопаливні) котли, які можуть працювати не тільки на твердому паливі, але і на газі, рідкому паливі і електроенергії.
4. Твердопаливні котли тривалого горіння (котли верхнього горіння).
5. Автоматичні котли.

Останнім часом в Україні все ширшого розповсюдження набувають котли в яких спалюються тюки соломи. На сьогоднішній день вже декілька фірм, таких як АТ «Бриг» (рис. 9.14), ТД «Теплосфера», ТД «Крігер» освоїли технологію спалювання соломи і випуск для виконання цього технологічного процесу обладнання. Після успішного впровадження першого котла на соломі фірми Passat Energi в Україні вітчизняна фірма «ЮТЕМ» придбала ліцензію на виробництво таких котлів та розпочала їх випуск в Україні.



Рис. 9.14. Зерносушарка з теплогенератором ТГС-500 у навчально-дослідному господарстві НУБіП України «Агрономічна дослідна станція» та опалювальний котел на соломі виробництва ЮТЕМ

В Україні випускаються соломоспалюючі котли тепловою потужністю від 150 до 600 кВт. Відомі конструкції газогенераторних котлів HERLT для спалювання соломи (рис. 9.15).

На відміну від традиційних твердотопливних котлів, у піролізних (газогенераторних) котлах горить газ, що виділяється із соломи завдяки високій температурі в камері згоряння. Під час такого спалювання не утворюється сажа і утворення попелу зводиться до мінімуму. Котли з піролізним спалюванням соломи мають високий ККД (до 92%). Конструкція і принцип роботи котлів дозволяють автоматизувати регулювання потужності.

Котли для спалювання соломи – зовнішнього виконання ізольовані, готові до експлуатації і не вимагають ніяких додаткових робіт, підготовки і будівлі споруд, окрім підготовки фундаменту, монтажу димаря і під'єднання до існуючої тепломережі. Залежно від потужності, топка котла може бути пристосована для спалювання малих або великих тюків. Для спалювання соломи випускається широкий модельний ряд газогенераторних котлів потужністю від 89 кВт до 4 Мвт. У комплекті з правильно підібраним водяним теплообмінником котли утворюють високоефективні і економічні системи.



Рис. 9.15. Газогенераторний опалювальний котел для тюків фірми HERLT

Ефективне використання котлів на твердому біопаливі зумовлене розробкою сучасних технологій підготовки сировини, систем автоматичного

управління процесом спалювання та спеціальних (керамічних) матеріалів камер згорання. У типових конструкційно-технологічних рішеннях котлів-автоматів функцію дозаторів виконують шнекові транспортери, керовані заданою програмою. Такі котли (рис. 9.16) призначені для обігріву житлових будинків, дач та інших об'єктів із тепловим навантаженням до 50 кВт. Завдяки великому об'єму топки, електронному регулюванню з використанням термостата і пальника типу реторти із завантажувальним пристроєм, дані котли працюють в автоматичному режимі. Вони використовуються для спалювання паливних гранул із деревини й рослинної біомаси. Потреба в біопаливі при номінальній продуктивності складає до 10 кг за годину. При мінімальному завантаженні цих котлів достатньо до 2-х кг паливних гранул на годину.



Рис. 9.16. Побутовий універсальний твердопаливний котел фірми DEFRO (Польща)

Великі промислові котли на пеллетах, також оснащені системою автоматичної подачі палива (рис. 9.17). Пеллети зберігають у спеціальних бункерах, із яких вони транспортуються безпосередньо до котла. Весь процес переміщення гранул можна здійснювати без застосування ручної праці.

Котли, що використовують в якості палива брикети, аналогічні котлам в яких спалюють дрова (рис. 9.18).

Проте при спалюванні соломи виникають деякі труднощі, пов'язані із неоднорідністю біомаси, як палива; відносно високою вологістю, малим питомим енерговмістом, низькою температурою плавлення золи. Тому, у зоні горіння рослинної біомаси необхідно створити сприятливі умови для повного згорання палива, без плавлення золи та із підтримання рівномірного процесу виділення тепла. Таких умов можна досягти застосувавши котли із верхнім горінням, що мають дві робочі області: першу - утворення генераторного газу та другу - горіння генераторного газу (рис. 9.19). У таких котлах є можливість

регулювання процесом тепловиділення за рахунок зміни об'ємів повітря, що надходить в робочі області котла.



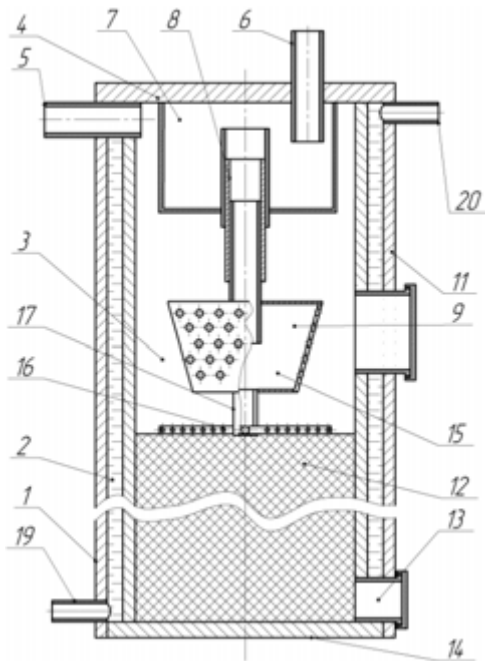
Рис. 9.17. Промисловий котел, що працює на пеллетах



Рис. 9.18. Котел побутовий водогрійний Ardenz T100, що працює на дровах та паливних брикетах

Для підвищення ефективності роботи котлів, за рахунок зменшення часу роботи в перехідних режимах, необхідне використання автоматичної системи керування подачею повітря в топку, що складається із мікропроцесорного пристрою, датчика температури, встановленого в нагрівну порожнину котла (рис. 9.20) та датчика вмісту CO в димових газах, встановленого в патрубок для видалення продуктів згорання.

У котлах потужністю до 70 кВт використовується січка соломи, що завантажується через бокові дверцята. Котли більшої потужності необхідно завантажувати рулонами соломи через верхню частину котла, яка виконана знімною. Тому, для таких котлів необхідно передбачити використання вантажопідйомного обладнання для механізації завантаження рулонів (рис. 9.21).



а)



б)

1 – корпус; 2 – порожнина; 3 – камера згорання; 4 – кришка; 5 – патрубок для видалення продуктів згорання; 6 – патрубок для подачі повітря; 7 – проміжна ємкість; 8 – напрямна; 9 - розподільник повітря; 10 – отвори, 11 – дверцята для палива; 12 – паливо; 13 – дверцята для попелу; 14 – днище; 15 – верхня секція розподільника повітря; 16 - нижня секція розподільника повітря; 17 – з'єднувач 18 – трубчасті елементи; 19 – патрубок для подачі холодної води; 20 – патрубок для відведення гарячої води

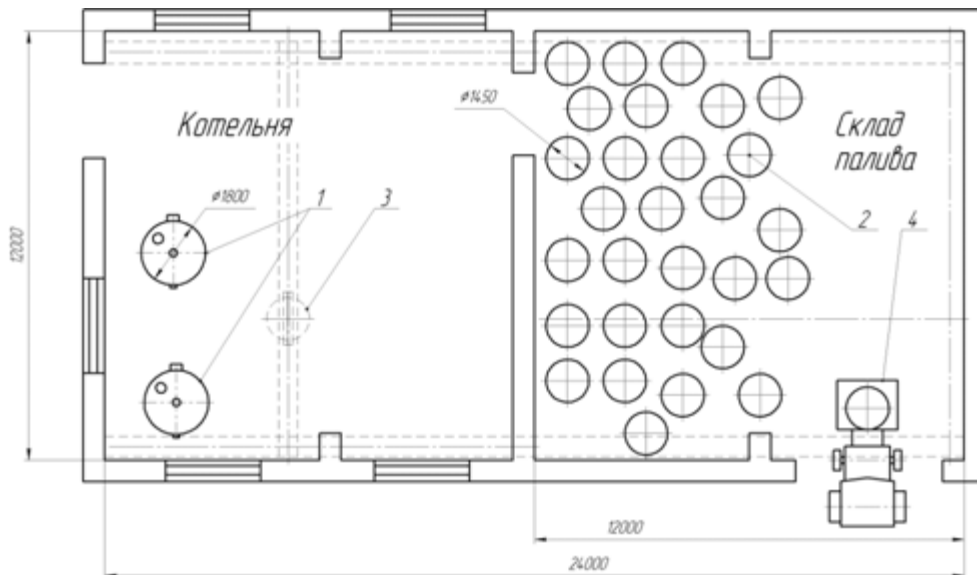
а – схема, б – загальний вигляд

Рис. 9.19. Котел для спалювання соломи із верхнім горінням



1 – вентилятор подачі повітря в топку котла; 2 – мікропроцесорний блок керування; 3 – температурний датчик

Рис. 9.20. Система керування котлом



1 – котел ($P_k=200$ кВт); 2 – рулон соломи ($d_m=1,45$ м; $h_m=1,2$ м); 3 – кран-балка (оснащена захватом для рулонів); 4 – транспортний засіб для переміщення рулонів соломи до складу палива

Рис. 9.21. Схема котельні, оснащеної котлами КГВ 200 із верхнім горінням для спалювання соломи в рулонах

Котли із верхнім горінням, при спалюванні соломи, за рахунок використання спеціальної конструкції розподільника повітря, дозволяють збільшити площу горіння палива із збереженням стабільної його подачі в зону утворення генераторного газу, а також забезпечити ефективне спалювання горючих газів за рахунок подачі додаткового повітря в камеру згорання котла. При цьому віддача тепла у порівнянні із прямим спалюванням соломи в котлах підвищується на 20%, а дійсний коефіцієнт корисної дії котлів із верхнім горінням досягає 83%.

Лабораторна робота 9: Визначення параметрів роботи твердопаливного котла при спалюванні рослинної біомаси.

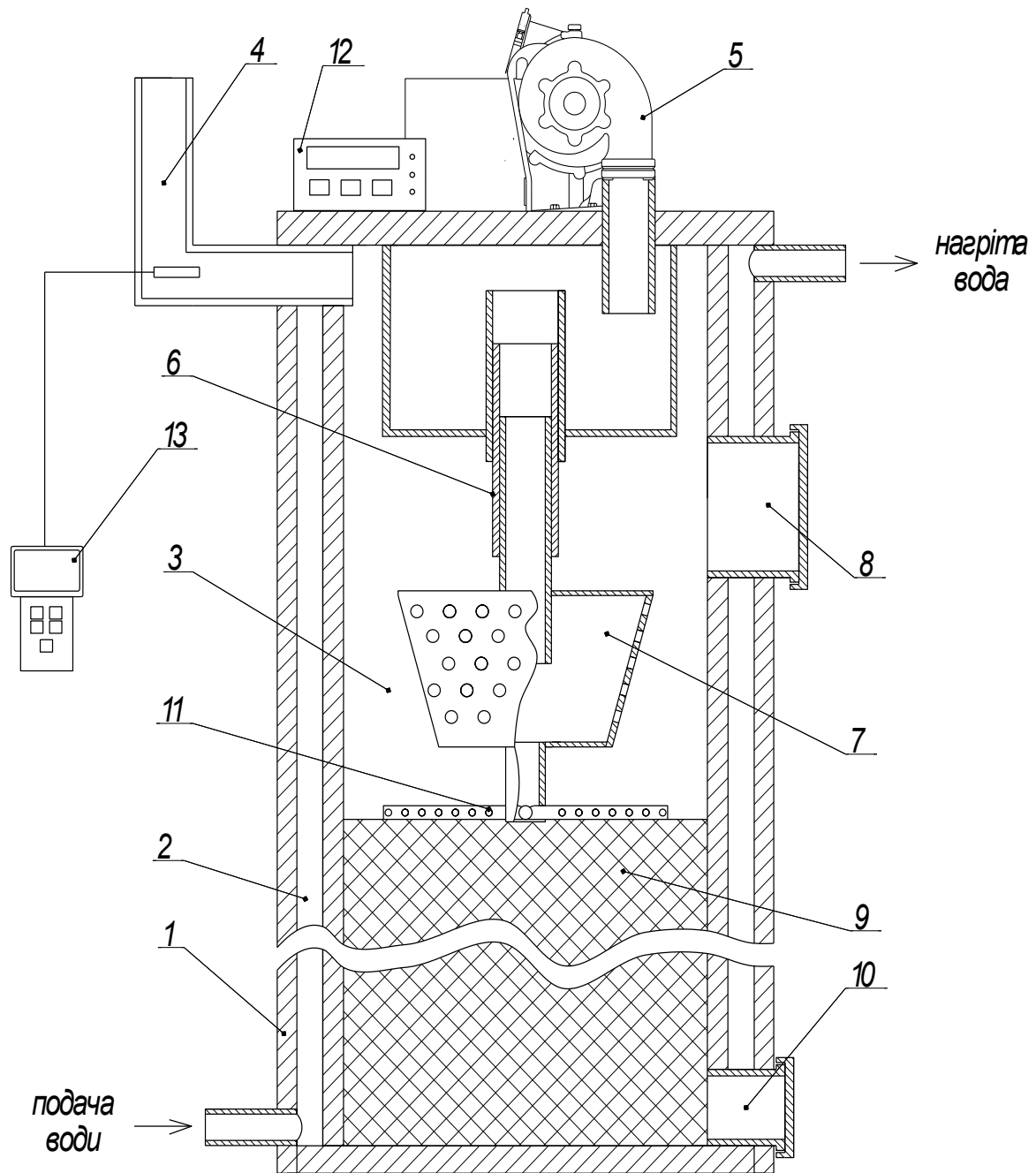
Мета роботи. Ознайомитися із принципом дії твердопаливного котла для спалювання подрібненої органічної маси та пеллет та визначити вплив подачі повітря в топку на склад продуктів згорання на виході із котла.

Прилади та обладнання: твердопаливний котел, газоаналізатор ОКСІ 5М, анемометр.

Після ознайомлення із правилами техніки безпеки, інструкцію по експлуатації газоаналізатора та конструкцією твердопаливного котла, згідно схеми (рис. 9.22), котел розпалюється, а подача повітря в топку котла встановлюється на мінімальному рівні.

Вимірювання об'ємної частки монооксиду карбону у викидах котла проводиться за допомогою газоаналізатора ОКСІ 5М. Подача повітря в топку котла визначається за допомогою анемометра. Зміна подачі повітря в топку котла проводиться із заданим кроком від 0,0015 до максимального значення

0,04 м³/с. Вимірювання об'ємної частки монооксиду карбону виконується у трьохкратній повторності для кожного значення подачі повітря.



1 – корпус; 2 – порожнина; 3 – камера згорання; 4 – патрубок для видалення продуктів згорання; 5 – вентилятор подачі повітря; 6 – напрямна труба; 7 – розподільник повітря; 8 – дверцята для палива; 9 – паливо; 10 – дверцята для попелу; 11 – нижня секція розподільника повітря; 12 – мікропроцесорний блок керування; 13 – газоаналізатор OKSI 5M

Рис. 9.22. Схема підключення приладів для визначення параметрів котла

Результати вимірів заносяться в таблицю 9.5.

Таблиця 9.5. Результати вимірювань викидів CO твердопаливного котла при спалюванні рослинної біомаси

Подача повітря, м ³ /с	1 дослід CO, млн. ⁻¹	2 дослід CO, млн. ⁻¹	3 дослід CO, млн. ⁻¹	Середнє значення CO, млн. ⁻¹	Викиди CO за годину, м ³ /год.
0,0015	8505	4045	6275	2092	0,113
0,0053	949	898	923,5	308	0,059
0,0071	449	588	518,5	173	0,044
0,0088	649	688	668,5	223	0,071
0,0177	819	972	930	310	0,197
0,0353	1319	1272	1230	424	0,539
0,0399	1763	1608	2129	588	0,844

Середнє значення об'ємної частки монооксиду карбону для кожного значення подачі повітря визначається за формулою:

$$G_{CO} = \frac{V_{II} \cdot E_{CO} \cdot 3600}{10^6}$$

де G_{CO} – викиду монооксиду карбону в атмосферу, м³/год.; V_{II} – подача повітря в топку котла, м³/с, E_{CO} – об'ємна частка монооксиду карбону у викидах котла, млн.⁻¹.

Результати дослідів у графічному вигляді приведені на рис. 9.23.

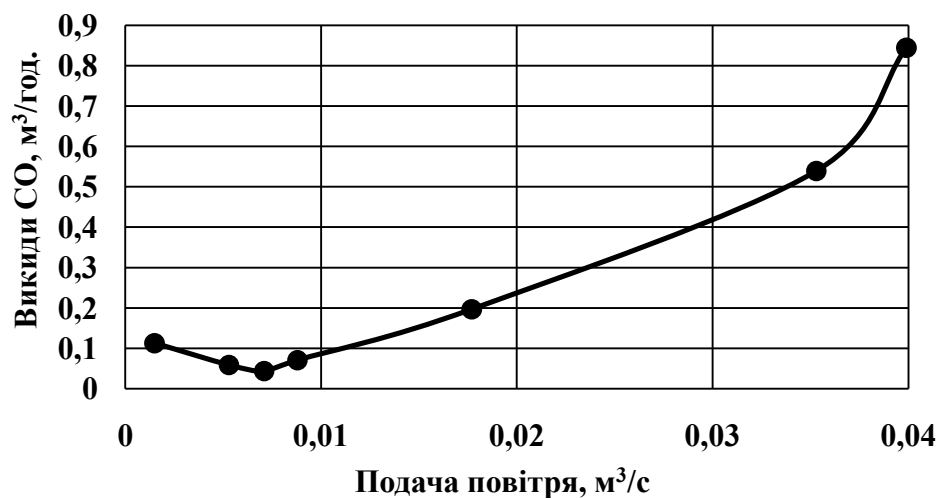


Рис. 9.23. Залежність викидів CO від величини подачі повітря в топку котла

Таким чином встановлено, що найменші викиди монооксиду карбону (CO) спостерігаються при подачі повітря в топку твердопаливного котла на рівні 0,007 м³/с.

Практична робота 9: Розрахувати теплоту згоряння соломи в залежності від хімічного складу і вологості.

Вихідні дані: Хімічний склад та вологість різних типів соломи.

Найчастіше для визначення теплоти згорання використовують формулу Д.І. Менделєєва, відповідно до якої теплоту згорання рідких і твердих палив визначають як:

$$Q_g = 339C + 1256H - 109(O - S) \quad (9.1)$$

$$Q_n = Q_g - 25(9H + W) = 339C + 1030H - 109(O - S) - 25W \quad (9.2)$$

де Q_g , Q_n – вища і нижча теплота згорання, кДж/кг; C , H , O , S , W – елементний склад палива (вуглець, водень, кисень, сірка, волога відповідно), % за масою; 25 – коефіцієнт, який враховує втрату теплоти, що виноситься продуктами згорання в атмосферу (1 кг пари при потраплянні в атмосферу забирає 2500 кДж/кг); $9H$ – число масових частин води, що утворюється при згоранні однієї масової частини водню.

Таблиця 9.6. Склад та розрахунок вищої теплоти згорання соломи

Польова культура – продуцент соломи	Вміст до сухої маси, %							Вища теплота згорання соломи
	Попіл	Органічна речовина	Азот, N	Вуглець, С	Водень, Н	Кисень, О	Сірка, S	
Пшениця	4,65	95,35	0,52	44,43	5,86	44,43	0,11	17591
Жито	4,65	95,35	0,43	45,02	4,80	45,02	0,09	16393
Ячмінь	4,65	95,35	0,59	44,03	6,58	44,03	0,12	18404
Овес	6,98	93,02	0,51	43,35	5,71	43,35	0,10	17153
Кукурудза	4,65	95,35	0,63	43,80	7,01	43,80	0,13	18893
Ріпак	5,88	94,12	0,66	42,96	7,40	42,96	0,13	19189
Зернобобові	6,98	93,02	1,64	41,02	9,19	41,02	0,16	20995

Таблиця 9.7. Розрахунок нижчої теплоти згорання соломи Q_n , кДж/кг

Польова культура – продуцент соломи	Вологість соломи, %							
	5	10	15	20	25	30	35	40
Пшениця	16148	16023	15898	15773	15648	15523	15398	15273
Жито	15188	15063	14938	14813	14688	14563	14438	14313
Ячмінь	16799	16674	16549	16424	16299	16174	16049	15924
Овес	15743	15618	15493	15368	15243	15118	14993	14868
Кукурудза	17190	17065	16940	16815	16690	16565	16440	16315
Ріпак	17399	17274	17149	17024	16899	16774	16649	16524
Зернобобові	18802	18677	18552	18427	18302	18177	18052	17927

Однак, у практиці використання соломи як палива для котлів і теплогенераторів, отримати вказаний розрахунковий рівень теплоти згорання, як правило, не вдається, що обумовлено втратою летких сполук з димовими газами та витратами тепла на нагрівання повітря, необхідного для горіння

соломи до температури при якій це горіння відбувається. Тому дійсна теплота спалювання соломи визначаються коефіцієнтом корисної дії топки, який для існуючих топків котлів і теплогенераторів, що випускаються в Україні становить від 0,75 до 0,84 відн. од.

Запитання для самоконтролю:

1. Які існують технології спалювання твердого біопалива? Охарактеризуйте їх.
2. Охарактеризуйте технологічний ланцюг використання соломи для енергетичного використання.
3. Назвіть способи використання соломи зернових як енергоресурсу.
4. Які типи прес-підбирачів Вам відомі?
5. Назвіть основні характеристики тюків соломи.
6. Навіщо застосовується гранулювання біопалива?
7. Дайте визначення поняття "паливні гранули". Охарактеризуйте паливні гранули.
8. Які існують способи гранулювання біомаси?
9. Охарактеризуйте технологію виробництва паливних гранул (пеллет) із соломи
10. Охарактеризуйте технологію виробництва паливних брикетів із соломи.
11. Чому тверде біопаливо практично нейтральне щодо зростання парникового ефекту?
12. Який найбільш простий спосіб отримання енергії із біомаси?
13. Назвіть переваги та недоліки основних способів отримання енергії із біомаси.
14. Які види біомаси сільськогосподарського походження доречно використовувати як паливо ?
15. Що є найбільш важливою паливно-технологічною характеристикою біомаси ?
16. Вкажіть середню теплотворну здатність видів біомаси сільськогосподарського походження.
17. Яке основне обладнання входить до складу лінії із виробництва паливних гранул?
18. Яке основне обладнання входить до складу лінії із виробництва паливних брикетів?
19. Якими параметрами характеризуються паливні гранули та брикети
20. Назвіть умови, що необхідні для ефективного спалювання біомаси.
21. Вкажіть на які групи можна розділити твердопаливні котли виходячи з особливостей технологій спалювання біомаси.
22. Вкажіть особливості традиційних твердопаливних котлів.
23. Які види котлів для спалювання біомаси сільськогосподарського походження виробляють в Україні?
24. Вкажіть особливості роботи автоматичних котлів.

25. Вкажіть із яких міркувань виконується підбір потужності котла опалення.

26. Які труднощі виникають при спалюванні рослинної біомаси?

27. Для чого призначений газоаналізатор?

28. Від чого залежить вміст СО у димових газах твердопаливного котла?

29. Назвіть основні технологічні операції з підготовки соломи зернових до спалювання?

Література:

1. Альтернативна енергетика: навч. посіб. для студентів вищих навчальних закладів / [М.Д. Мельничук, В.О. Дубровін, В.Г. Мироненко, І.П. Григорюк, В.М. Поліщук, Г.А. Голуб, В.С. Таргоня, С.В. Драгнєв, І.В. Свистунова, С.М. Кухарець]. – К.: Аграр Медіа Груп, 2012. – 244 с.

2. Біологічні ресурси і технології виробництва біопалива: Монографія / Я.Б. Блюм, Г.Г. Гелетуша, І.П. Григорюк, К.В. Дмитрук, В.О. Дубровін, А.І. Ємець, Г.М. Забарний, Г.М. Калетнік, М.Д. Мельничук, В.Г. Мироненко, Д.Б. Рахметов, А.А. Сибірний, С.П. Циганков. – К: Аграр Медіа Груп, 2010. – 408 с.

3. Гелетуша Г.Г. Перспективи производства тепловой энергии из биомассы в Украине [Електронний ресурс] / Г.Г. Гелетуша, Т.А. Железная, Е.Н. Олейник // Аналитическая записка Биоэнергетической ассоциации Украины №6. – 2013 г. – №6. – 24 с. – Режим доступа: <http://www.uabio.org/img/files/docs/position-paper-uabio-6-ru.pdf>.

4. Голуб Г.А. Ефективність використання котлів із верхнім горінням для спалювання соломи / Г.А. Голуб, С.М. Кухарець, О.Я. Переходько // Вісник Сумського нац. аграрного ун-ту. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». – 2014. – Вип. 11 (26). – С. 28–32.

5. Голуб Г.А. Теплота згоряння та умови спалювання соломи / Голуб Г.А., Лук'янець В.О., Субота С.В. // Наук. вісн. НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2009. – Вип. 134, ч.2. – С. 275–278.

6. Жовнір М. Солома обігріє села / Жовнір М., Олійник Є., Чаплигін С. // Агросектор. – 2007. – № 5. – С. 28–31.

7. Кухарець С.М. Аналіз процесів утворення та горіння генераторного газу в котлах для спалювання соломи / С.М. Кухарець // Вісн. Житомир. нац. агрокол. ун-ту. – 2014. – Т. 4 (45), № 2, Ч. 2. – С. 336–344.

8. Кухарець С.М. Обґрунтування основних параметрів котлів із верхнім горінням / С.М. Кухарець // Наук. вісн. НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2014. – Вип. 196, Ч. 2. – С. 238–250.

9. Пат. 105346 Україна, МПК F24H1/10, F23B60/00. Котел водогрійний для спалювання рослинної біомаси / Переходько О.Я., Голуб Г.А., Дубровін В.О., Дімітрєв О.Н., Кухарець С.М.; заявник та патентовласник Нац. ун-т. біоресурсів і природокористування України. – № а201310034; заявл. 12.08.2013; опубл. 25.04.2014; Бюл. №8.

10. Посібник. Машина для збирання зернових та технічних культур / за ред. В.І. Кравчука, Ю.Ф. Мельника. – Дослідницьке: УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого. – 2009. – 296 с.
11. Посібник. Технології та обладнання для використання поновлюваних джерел енергії в сільськогосподарському виробництві / за ред. В.І. Кравчука, В.О. Дубровіна. – Дослідницьке: УкрНДПВТ ім. Л.Погорілого. – 2010. – 184 с.
12. Перспективи розвитку альтернативної енергетики на Поліссі України / [В.О. Дубровін, Л.Д. Романчук, С.М. Кухарець, І.Г. Грабар, Л. В. Лось, Г.А. Голуб, С.В. Драгнев, В.М. Поліщук, В.В. Кухарець, І.В. Нездвєцька, В.О. Шубенко, А.А. Голубенко, Н.М. Цивенкова]. – К.: Центр учбової літератури, 2014. – 335 с.
13. Сарана В.В. Багатокритеріальна оцінка сучасного обладнання для виготовлення паливних гранул і брикетів з відходів переробки сільськогосподарських культур і деревини / В.В. Сарана, М.М. Гудзенко, С.М. Кухарець // Наук. вісн. НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2010. – Вип. 144, Ч. 3. – С. 190–197.
14. Справочник потребителя біотоплива / [под. ред. Виллу Вареса]. – Таллин: Таллинский технический университет, 2005. – 183 с.
15. Рекомендації щодо створення сільськогосподарського обслуговуючого кооперативу для надання послуг у виробництві та реалізації біопалива у Житомирській області / [Н.М. Головченко, В.Є. Данкевич, С.В. Добрякова, В.О. Дубровін, Г.Р. Зіміна, В.В. Зіновчук, Н.В. Зіновчук, В.М. Карпюк, В.В. Кухарець, С.М. Кухарець, А.В. Ращенко]. – Житомир, 2011. – 96 с.

10. ВИРОБНИЦТВО ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР

10.1. Огляд основних енергетичних культур

Енергетичні культури це рослини, які спеціально вирощуються для використання в якості палива та для виробництва біопалива.

Енергетичні культури класифікують за:

- циклом вирощування – однолітні (ріпак, соняшник) та багаторічні (верба, тополя);
- типом – деревоподібні (верба, тополя), трав'янисті (міскантус, просо прутоподібне);
- походженням – класичні, початково призначені для енергетичних цілей (міскантус, двукісточник тростиноподібний) та звичайні сільськогосподарські культури, що вирощуються як для отримання харчових продуктів, так і з метою виробництва біопалива (ріпак на біодизель, цукровий буряк на біоетанол, кукурудза на біогаз).

Розглянемо деякі види енергетичних культур, що мають перспективи до вирощування в Україні.

Міскантус (*Miscanthus giganteus*). Природними місцями походження рослин з родини *Miscanthus* є територія Японії, Південних Курил, Манжурії, Кореї, Таїланду, Полінезії і Східного узбережжя США. Вирощується він також в Південно-Східній Азії і Центральній частині США. Цей рід об'єднує понад двадцять різних морфологічних видів. Особливо швидким ростом і високою якістю характеризується *Miscanthus sinensis*. В природному середовищі ці рослини сягають висоти до 6 м, діаметр стебел – 6 см, а вегетація може тривати до 30 років (рис. 10.1).



Рис. 10.1. Плантація міскантуса

У 1935 році данський вчений Ансель Ольсен завіз до Європи японський клон, який став основою для селекції рослин, які використовуються до цього часу. Зважаючи на великий врожай, Карл Фостер дав цій рослині назву *Miscanthus sinensis* “Giganteus”.

Науковим дослідження цієї рослини почали займатись в 1983 році на Станції селекції рослин в Данії. З того часу проводяться інтенсивні дослідницькі роботи з цією культурою в багатьох країнах Європи, а саме Німеччині, Великобританії, Італії, Франції, Іспанії, Польщі. У Європі площа вирощування міскантуса в 1995-1996 рр. становила біля 170 га, і до 1998 року його насадження були незначними. Найбільша площа його насаджень була в Швеції (300 га). В 1993 році встановлено Європейську Сітку в 10 країнах і вирощування міскантусу проводилось вже у 18 місцях. Із 1994 року було започатковано великі міжнародні проекти з вирощування міскантуса (наприклад в Німеччині фірмою Vaba Oel AG). *Miscanthus giganteus* є багаторічною трав'янистою рослиною з добре розгалуженою кореневою системою. Маса коренів перед появою сходів складає біля 15-25 т сухої маси з гектара. Корені сягають до 2,5 метрів вглиб ґрунту. Така коренева система сприяє кращому використанню елементів живлення і води. Стебло є дуже міцним, з волосками або без них, з добре вираженими вузлами. Забарвлення однорідне. Завдяки великому вмісту в стеблі лігніну і целюлози, він характеризується великою витривалістю та стійкістю до механічних ушкоджень, але бувають і виключення, коли опади у вигляді снігу і дощу можуть призвести до локального вилягання рослин на рівні 4-5 міжвузля від землі. У європейських умовах рослини досягають від 200 до 350 см висоти. У перший рік вегетації рослини сягають до 200 см, на другий рік – 350 см, а в наступні – 400-450 см. Урожайність міскантуса складає 10-15 т/га в сухій масі.

Верба прутovidна (*Salix viminalis*). Верба прутovidна має кущ або дерево від 3 до 5 м заввишки. Гілки прямостоячі, прутovidні. Верба зростає по берегах річок та озер на Поліссі, подекуди на Прикарпатті, дуже рідко – в Лісостепу і Степу. Вирощують її як фітомеліоративну та енергетичну рослину. Зазвичай, для енергетичних цілей використовують вид верби *Salix viminalis* (верба прутovidна) та похідні від неї. Для цього можна використовувати інші види: *Salix rigida*, *Salix amygdalina*, *Salix pentandra*, *Salix dasyclados* тощо. Вербу прутovidну (рис. 10.2) можна вирощувати на різних типах ґрунтів. Проектуючи закладання плантації верби прутovidної, необхідно підібрати відповідний різновид, який дасть максимальний урожай за короткий проміжок часу. Урожайність (зрізана маса) енергетичної верби коливається від 10 до 30 т з одного га за рік. А, наприклад для обігрівання приватного будинку пощею від 100 до 200 м² потрібно від 3 до 5 т такого біопалива на сезон.

Сильфій пронизанолистий (*silphium perfoliatum*). Сильфій перспективна багаторічна енергетична культура, яка у природних умовах росте в американських преріях і в Канаді. У Європу її завезли у XVIII столітті як декоративну рослину. Сильфій вегетує без пересівання, не знижуючи врожаю біомаси близько 20 років. Урожайність зеленої маси – 100–120 т/га і більше. За екологічною пластичністю сильфій найкраща з-поміж усіх рослин.

Відзначається цінними біологічними і господарськими властивостями, а саме: ефективно використовує сонячну радіацію майже однаково як влітку, так і весною та осінню; забезпечує не тільки високі, але і сталі врожаї зеленої маси з великим вмістом протеїну, вітамінів, амінокислот і мінеральних речовин. У фазі бутонізації урожайність зеленої маси становить від 50 до 60 т/га, цвітіння – від 70 до 80 і плодоношення – від 90 до- 110 т/га. В умовах Лісостепу та Полісся України сільфій росте від 2,3 до 3 м заввишки. Стебло пряме, добре олистнене, товсте, чотири- і шестигранне (рис. 10.3).



Рис. 10.2. Верба прутовидна



Рис. 10.3. Сільфій пронизанолистий

Сорго (*Sorghum Moench*). Рід сорго об'єднує за різними даними від 34 до 50 видів, серед яких є дикі й культурні, однорічні та багаторічні. В Україні поширені два види культурного сорго: сорго звичайне (*S. vulgare Pers.*) і сорго трав'янисте або суданська трава (*S. sudanense Pers.*). Сорго звичайне – однорічна трав'яниста рослина (рис. 10.4). Коренева система дуже добре розвинена, проникає у ґрунт на глибину до 3 м і в сторони – на 100-120 см. Стебло – соломина висотою у низькорослих форм менше 1 м, високорослих – до 3,5 м (у тропіках – від 5 до 7 м), діаметром від 1 до 5 см. Листки великі, з язичком, без вушок, довжиною від 50 до 100 см, з шириною пластинки від 1 до 6 см, а у деяких форм – до 10 см і більше. Середня врожайність зеленої маси цукрового сорго, яке вирощується у нашій країні нині, становить від 200 до 300 ц/га.



Рис. 10.4. Сорго

Пенсільванська мальва (*Pennsylvania fiscellam*). Біомаса цієї культури є перспективним джерелом відновлюваної енергії. За утворенням тепла при спалюванні стебла мальва поступаються лише буковій деревині (на 20-34%). У Європі має назву пенсільванська мальва, а інколи сіда. Вид Сіда є багаторічною рослиною. Урожайність зеленої маси мальви становить від 40 до 100 т/га.



Рис. 10.5. Пенсільванська мальва

Крім згаданих енергетичних рослин існує ще ряд і інших. Наприклад: просо прутоподібне, тополя. Високий енергетичний потенціал і у очерету – на рівні 1 млн. т.у.п.

10.2. Механізація вирощування та збирання енергетичних культур

Перед висаджуванням енергетичних рослин робиться поглиблена оранка, під яку застосовують велику дозу органічних добрив. Також, ранньої весни, перед посадкою, необхідно провести боротьбу з бур'янами (з огляду на пізній термін посадки) механічним або хімічним способом. Перед самою посадкою рослин ґрунт необхідно розрихлити на кілька сантиметрів вглиб. Механізація процесу садіння енергетичних рослин значно знижує витрати на його вирощування. Саджанці, отримані з мікророзмноження, можна висаджувати, використовуючи спеціальну саджалку для розсади (рис. 10.6). Саджанці, отримані з поділу кореневища можна висаджувати картоплесаджалкою. В умовах України механізований спосіб висаджування можливо проводити за допомогою існуючої посадкової техніки з використанням картоплесаджалок вітчизняного та закордонного виробництва, які забезпечують ширину міжряддя від 70 до 75 см (рис. 10.7).



Рис. 10.6. Висаджування саджанців енергетичної верби за допомогою спеціальної саджалки

При механізованому способі висаджування міскантуса використовується формула 70x70 см, або 75x75 см. Саджанці з кореневищ приорюють на глибину від 15 до 20 см. Після садіння відразу потрібно провести прикочування гладким котком і в разі необхідності – зрошення.



Рис. 10.7. Висаджування кореневищ міскантуса за допомогою картоплесаджалки

Енергетичну вербу також висаджують навесні. Роботу розпочинають якомога раніше, аби кінцевим терміном висаджування були останні дні квітня. Безпосередньо перед висаджуванням саджанців слід провести боронування або валкування, а також обприскування поля гербіцидами. Для того, щоб по плантації можна було проїхати трактором, вербу висаджують рядами з відстанню 70 см у міжряддях та вфд 45 до 48 см між рослинами в рядку. Іншою схемою є вирощування верби в парах рядків. При цьому відстань між саджанцями в рядку складає від 30 до 35 см, між двома рядками – 70 см, а між парами рядків – 150 см.

Частину енергетичних культур, наприклад, таких як сільфій чи сорго, висівають овочевими чи зерно-трав'яними сівалками. Ширина міжрядь визначається головним чином наявним комплексом машин, і становить 45, 60 або 70 см.

Для деяких видів енергетичних культур необхідно проводити міжрядні обробітки за допомогою міжрядних культиваторів.

Збирання врожаю міскантуса здійснюється в період спокою рослин, після відтоку пластичних речовин у кореневу систему та опадання листя, коли вологість стебел мінімальна (у березні місяці).

Міскантус збирають як роздільним так, і прямим способом. При роздільному способі скошують у валки жатками. Причому, висота зрізу рослин повинна бути не меншою 15-20 см. Підбір валка здійснюється за допомогою преса із обв'язуванням шпагатом або сіткою. Доцільно використовувати рулонні прес-підбирачі або прес-підбирачі з подрібненням (рис. 10.8).



Рис. 10.8. Скошування та тюкування трав'янистих енергетичних культур

При прямому способі збирання використовуються самохідні кормозбиральні комбайни, аналогічні комбайнам для збирання кукурудзи на

силос (рис. 10.9). Такі машини зрізують ряди рослин, подрібнюючи їх у тріску та завантажують у причіп. Подрібнену чи тюковану масу транспортують до місця зберігання для подальшої переробки у пелети.

Транспортування можна здійснювати автомобілями та тракторами з причепами. Аналогічним чином збирають і інші трав'янисті енергетичні рослини.



Рис. 10.9. Збирання трав'янистих енергетичних культур кормозбиральним комбайном

Збір біомаси енергетичної верби проводять щороку, або через два-три роки. Проте найбільш вигідно зрізати вербу кожні два роки, що пояснюється тим фактом, що верба на третьому році своєї вегетації має найбільший приріст біомаси. На одній ділянці вербу можна вирощувати упродовж від 25 до 30 років. Ручне збирання вербової біомаси полягає у скошуванні вербових пагонів за допомогою механічної коси або ланцюгової пилки. Натомість механічне збирання проводиться із використанням спеціальних комбайнів чи косарок, які під час збирання біомаси відразу ж подрібнюють її та завантажують у тракторні причепа чи вантажні автомобілі (рис. 10.10).

Іноді вербу збирають за допомогою спеціальних снопов'язальних комбайнів. Зібрану та подрібнену біомасу використовують як паливо для котлів, або як сировину для виготовлення паливних гранул чи брикетів. Інші деревоподібні енергетичні культури збирають аналогічним чином.

Після збирання енергетичні культури можуть бути використані для отримання різних видів біопалива, а в подальшому теплової та електричної енергії (рис. 10.11)



Рис. 10.10. Механізоване збирання деревовидних енергетичних культур

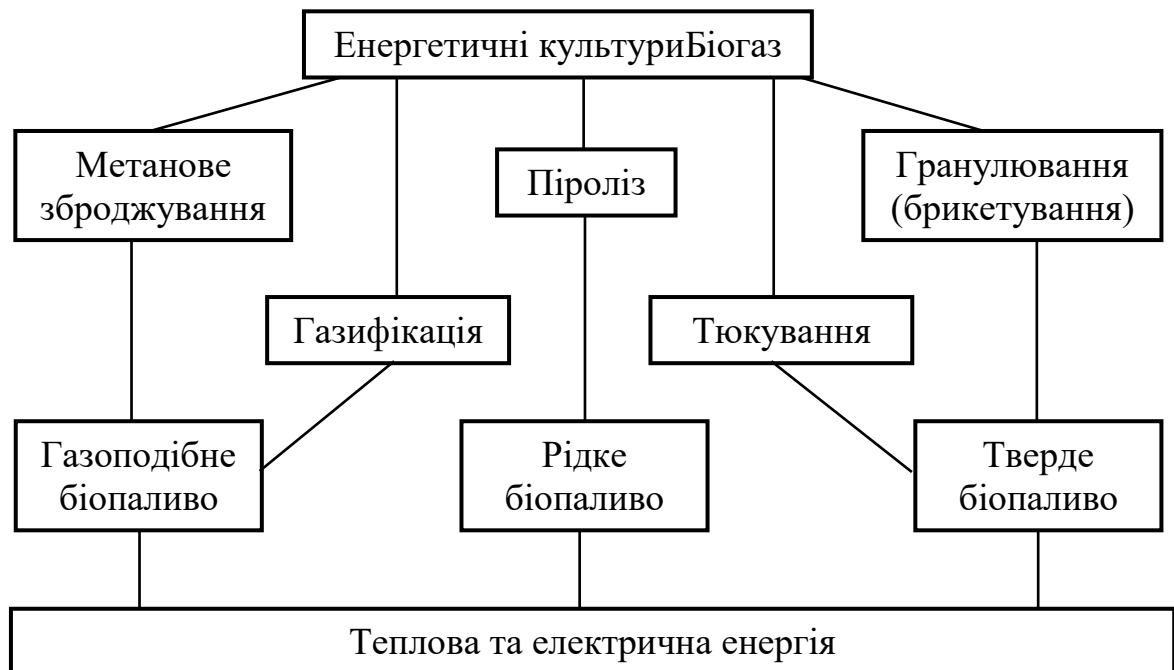


Рис. 10.11. Способи використання енергетичних культур в аграрному виробництві

Оновні характеристик деяких видів енергетичних рослин наведено в таблиці 10.1

Таблиця 10.1. Основні характеристики деяких видів енергетичних культур

Вид	Середня врожайність, т/га/рік	Теплотворна здатність, ГДж/сухої т	Енергетичний вихід, ГДж/га/рік
Верба	15	16	240
Міскантус	20	17	340
Сорго	25	18	450

Згідно із концепцією вирощування енергетичних культур у Україні їх площі будуть збільшені від 3 тис. га в 2014 році до 200 тис. га в 2020 році.

Лабораторна робота 10. Визначення питомих енергетичних витрат на виробництво гранул із рослинної біомаси.

Мета роботи. Ознайомитися із принципом дії обладнання для виробництва гранул та визначити вплив виду рослинної біомаси на енергетичні витрати на виробництво гранул.

Прилади та обладнання: обладнання для виробництва гранул, аналізатор параметрів мережі.

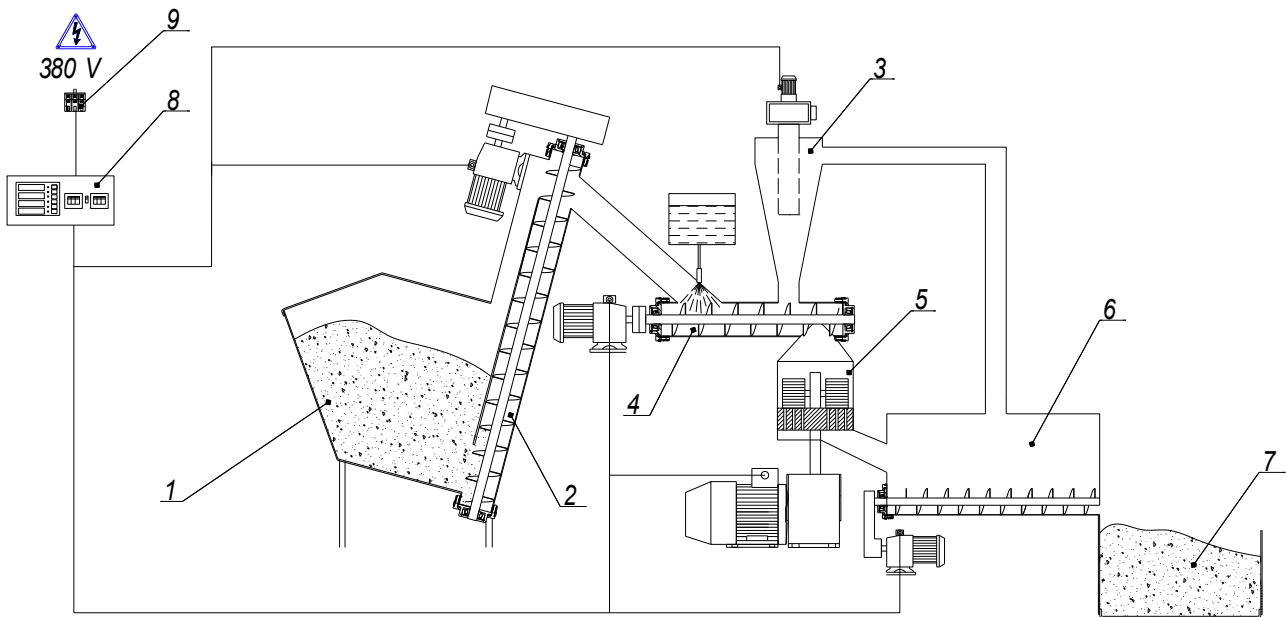
Після ознайомлення із правилами техніки безпеки, інструкцію по експлуатації та конструкцією обладнання для виробництва гранул, а також підключення приладів згідно схеми (рис. 10.12), обладнання запускається в роботу.

На першому етапі роботи, вода у змішувач не подається. При цьому гранулювання біомаси не відбувається. Змінюючи подачу води необхідно добитися виходу гранулятора на робочий режим. При цьому визначається встановлена потужність гранулятора. По вазі вироблених гранул за заданий проміжок часу визначається продуктивність обладнання.

Результати вимірів заносяться в таблицю 10.2.

Таблиця 10.2. Результати вимірювань та розрахунку питомої енергоємності гранулювання

Час роботи, с	Маса гранул, кг	Продуктивність, кг/год.	Споживана потужність, кВт	Питома енергоємність гранулювання, кВт год./т
10	0,250	90	8	88,9
10	0,300	108	8,5	78,7
10	0,275	99	9	90,9
Середнє значення				86,17



1 – бункер накопичувач; 2 – живильний шнек; 3 – циклон; 4 – змішувач; 5 – прес-гранулятор; 6 – охолоджувальна ємність; 7 – ємність для гранул; 8 – аналізатор параметрів мережі; 9 – трифазна електрична мережа

Рис. 10.12. Схема підключення приладів для визначення параметрів обладнання для виробництва гранул

Питома енергоємність гранулювання для кожної пари значень продуктивності та споживаної потужності визначається за виразом:

$$E = \frac{P}{Q} 10^3$$

де E – питома енергоємність гранулювання, кВт год./т; P – споживана потужність, кВт; Q – продуктивність гранулювання, кг/год.

Таким чином встановлено, що питома енергоємність гранулювання знаходиться в межах від 80 до 90 кВт год./т.

Практична робота 10. Визначення оптимального географічного розташування підприємства із виробництва паливних гранул.

Вихідні дані: площі плантацій енергетичних культур (га) та об'єми вирощеної енергетичної продукції (т).

При виборі точки розміщення виробництва гранул слід враховувати відстань до нього від усіх місць вирощування енергетичних культур, а також потенціал доступної сировини. З цією метою необхідно визначити умовні точки потенціалу енергетичних культур на карті обраного району.

Ці точки будуть визначати центри потенціалів енергетичної сировини, які можна розглядати як ймовірні точки розміщення технологічної лінії для виробництва гранул. При цьому доцільно виконати картограму потенціалів енергетичної сировини, на якій для кожної плантації енергетичних культур

викреслюється коло, центр якого співпадає з координатами центру даної плантації. Площа кола в певному масштабі m дорівнюватиме розрахунковому потенціалу сировини:

$$S_{Ri} = \pi R_i^2 m, \quad (10.1)$$

де S_{Ri} – розрахунковий потенціал енергетичної сировини i -ї плантації, т; R_i – радіус кола, що характеризує потенціал i -ї плантації, мм; m – масштаб, т/мм² (для зручності побудови обираємо $m=10$ т/мм²).

Із виразу (10.1) визначаємо радіус кола:

$$R_{Ri} = \sqrt{\frac{S_{Ri}}{\pi m}}, \quad (10.2)$$

Координати центрів потенціалів енергетичної сировини визначаються в умовній системі координат, яка наноситься на карту району довільним чином з умовними одиницями виміру. Рекомендується початок системи координат суміщати із центром плантації, що знаходиться в лівому нижньому куті регіону вирощування енергетичних культур.

Координати центру потенціалів енергетичної сировини i будуть координатами розміщення лінії виробництва паливних гранул:

$$X_{Ц} = \frac{\sum_{i=1}^N S_{Ri} X_i}{\sum_{i=1}^N S_{Ri}} \quad Y_{Ц} = \frac{\sum_{i=1}^N S_{Ri} Y_i}{\sum_{i=1}^N S_{Ri}}; \quad (10.3)$$

де $X_{Ц}$, $Y_{Ц}$ – координати точки встановлення лінії виробництва паливних гранул, км; X_i , Y_i – координати центру i -ї плантації енергетичних культур, км; N – кількість плантацій.

За знайденими значеннями (таблиця 10.1) побудуємо картограму (рис. 10.12).

Таблиця 10.1. Розрахунок координат розміщення лінії виробництва паливних гранул

Номер плантації	Потенціал енергетичної сировини, т	Відстань по осі X від початку координат, км	Відстань по осі Y від початку координат, км	Радіус потенціалів, мм	Координата X, центру потенціалів, км	Координата Y, центру потенціалів, км
1	2020,5	21,781	11,835	36	16,6	6,9
2	329,3	11,745	4,77	14		
3	762,7	18,091	3,825	22		
4	91,1	12,105	5,311	8		
5	1128,2	0	5,356	27		
6	274,7	23,625	21,735	13		
7	1198,8	21,69	0	28		
8	139,3	24,21	2,97	9		
Разом	5944,5	133,2	55,8			

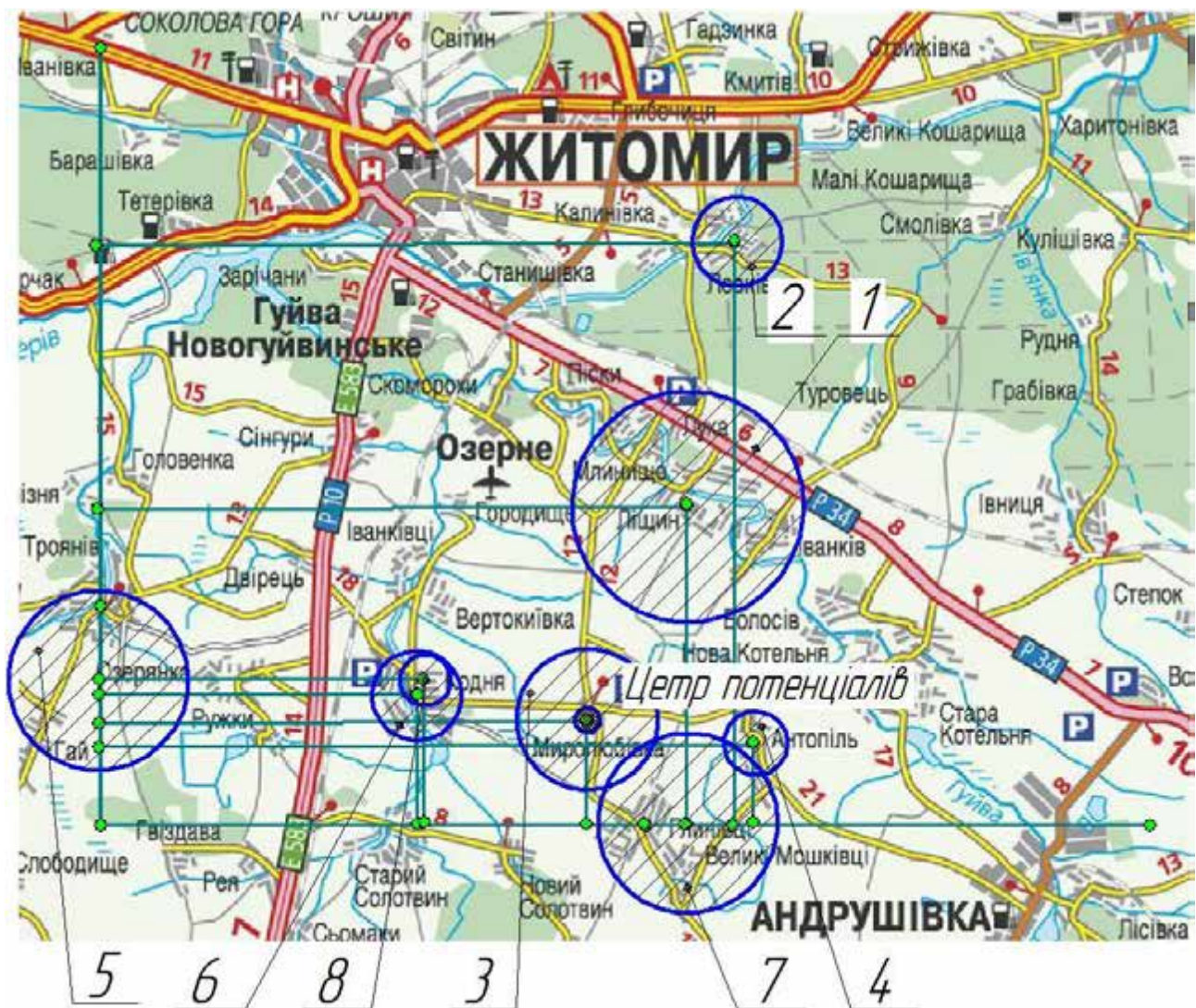


Рис. 10.12. Картограма розміщення потенціалів енергетичної сировини

Знайдені координати розташування виробництва гранул з енергетичних культур сприятимуть мінімізації транспортних витрат.

Запитання для самоконтролю:

1. Які види енергетичних рослин Ви знаєте?
2. Як класифікують енергетичні рослини?
3. Які енергетичні культури називають трав'янистими?
4. Які енергетичні культури називають деревоподібними?
5. Які основні характеристики енергетичних культур?
6. Назвіть основні характеристики міскантуса.
7. Назвіть основні характеристики верби енергетичної.
8. Опишіть таку енергетичну культуру як сільфій.
9. Назвіть основні характеристики сорго.
10. Які способи садіння енергетичних культур Ви знаєте?
11. Які машини використовують при садінні енергетичних культур?

12. Які особливості догляду за плантаціями енергетичних культур?
13. Назвіть способи збирання енергетичних культур.
14. Як енергетичні культури впливають на ефективність функціонування аграрного виробництва.
15. Які машини використовують при збиранні енергетичних культур?
16. Назвіть основні напрямки використання енергетичних культур?
17. Які види біопалива можна отримати із енергетичних культур?
18. Які переваги та недоліки вирощування енергетичних культур в умовах аграрного виробництва?
19. Що таке картограма розміщення потенціалів енергетичної сировини?
20. Як розрахувати координати ефективного розміщення підприємства із виробництва паливних гранул?
21. З яких основних елементів складається гранулятор?
22. Що має вплив на витрати потужності при роботі гранулятора?

Література:

1. Гелетуха Г.Г. Перспективи вирощування та використання енергетичних культур в Україні / Г.Г. Гелетуха, Т.А. Железная, О.В. Трибой // Аналітична записка БАУ №10. – 2014 г. – 33 с.
2. Кухарец С. Н. Обеспечение рационального использования сырья для получения биотоплива в агропромышленном комплексе /С.Н. Кухарец, Г.А. Голуб, С.В. Драгнев // Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2013. – Vol. 15, No 4. – P. 69–76.
3. Перспективи розвитку альтернативної енергетики на Поліссі України /[В.О. Дубровін, Л.Д. Романчук, С.М. Кухарець, І.Г. Грабар, Л. В. Лось, Г.А. Голуб, С.В. Драгнев, В.М. Поліщук, В.В. Кухарець, І.В. Нездвєцька, В.О. Шубенко, А.А. Голубенко, Н.М. Цивенкова]. – К.: Центр учбової літератури, 2014. – 335 с.
4. Рекомендації щодо створення сільськогосподарського обслуговуючого кооперативу для надання послуг у виробництві та реалізації біопалива у Житомирській області /[Н.М. Головченко, В.Є. Данкевич, С.В. Добрякова, В.О. Дубровін, Г.Р. Зіміна, В.В. Зіновчук, Н.В. Зіновчук, В.М. Карпюк, В.В. Кухарець, С.М. Кухарець, А.В. Ращенко]. – Житомир, 2011. – 96 с.
5. Справочник потребителя биотоплива / [под. ред. Виллу Вареса]. – Таллин: Таллинский технический университет, 2005. – 183 с.
6. Технічні та технологічні пропозиції отримання енергії із сировини сільськогосподарського походження /С.М. Кухарець, Г.А. Голуб, О.В. Скидан, О.Ю. Осипчук // Вісник ЖНАЕУ. – 2015. – № 2 (50), т. 1. – С. 369–385.
7. Биомасса как источник энергии : пер с. англ. / под ред. С. Соуфера, О. Забарски. – М. : Мир, 1985. – 368 с.
8. Голуб Г.А. Проблеми техніко-технологічного забезпечення енергетичної автономності агроєкосистем /Голуб Г.А., Дубровін В.О., Марус О.А.// Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової

техніки і технологій для сільського господарства України / ДНУ УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. – 2012. – Вип. 16(30), кн.2 – С. 339-345.

9. Кухарець С.М. Забезпечення енергетичної автономності агроєкосистем на основі виробництва біопалива /С.М. Кухарець, Г.А. Голуб// Вісн. Житомир. нац. агроєколог. ун-ту. – 2012. – № 1, т. 1. – С. 345–352.

10. Особливості виробництва біопалива та отримання енергії в умовах агропромислового виробництва [Голуб Г., Кухарець С., Шубенко В., Бовсунівська Н.] Техніка і технології АПК (Науково-виробничий журнал). – 2015. – № 2 (65). – С. 31-34.

11. Альтернативна енергетика: навч. посіб. для студентів вищих навчальних закладів / [М.Д. Мельничук, В.О. Дубровін, В.Г. Мироненко, І.П. Григорюк, В.М. Поліщук, Г.А. Голуб, В.С. Таргоня, С.В. Драгнєв, І.В. Свистунова, С.М. Кухарець]. – К.: Аграр Медіа Груп, 2012. – 244 с.

12. Біологічні ресурси і технології виробництва біопалива: Монографія / Я.Б. Блюм, Г.Г. Гелетуша, І.П. Григорюк, К.В. Дмитрук, В.О. Дубровін, А.І. Ємець, Г.М. Забарний, Г.М. Калетнік, М.Д. Мельничук, В.Г. Мироненко, Д.Б. Рахметов, А.А. Сибірний, С.П. Циганков. – К: Аграр Медіа Груп, 2010. – 408 с.

13. Гелетуша Г.Г. Перспективы производства тепловой энергии из биомассы в Украине [Електронний ресурс] / Г.Г. Гелетуша, Т.А. Железная, Е.Н. Олейник // Аналитическая записка Биоэнергетической ассоциации Украины №6. – 2013 г. – №6. – 24 с. – Режим доступа: <http://www.uabio.org/img/files/docs/position-paper-uabio-6-ru.pdf>.

14. Цивенкова Н. М. Быстрорастущие плантации тополя – новая энергетическая сырьевая база / Н. М. Цивенкова, А. А. Самылин // ЛесПромИнформ. – 2005. – № 8 (30). – С. 58–63.

15. Самылин А. А. Проблемы заготовки древесной щепы / А. А. Самылин, Н. М. Цивенкова // ЛесПромИнформ. – 2006. – № 2 (33). – С. 88–92.

16. Цивенкова Н. М. Проблемы заготовки древесной щепы для энергетических целей / Н. М. Цивенкова, А. А. Самылин // ЛесПромИнформ. – 2005. – № 9 (31). – С. 64–69.