

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

**ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА В АГРАРНОМУ
ВИРОБНИЦТВІ**

Навчальний посібник

За редакцією професорів Скидана О.В. і Голуба Г.А.

Київ – Житомир

2018

УДК 620.92:631.371

ББК 40.74Я73

В63

Рекомендовано Вченою радою Національного університету біоресурсів і природокористування України (протокол № 7 від 30 березня 2018 р.) та Вченою радою Житомирського національного агроекологічного університету (протокол № 7 від 30 березня 2018 р.) як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів зі спеціальностей 208 – агроінженерія та 133 – галузеве машинобудування

Рецензенти:

Кудря С. О. – доктор технічних наук, професор, директор Інституту відновлювальної енергетики Національної академії наук України;

Грабар І. Г. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри процесів, машин і обладнання Житомирського національного агроекологічного університету;

Теслюк В. В. – доктор сільськогосподарських наук, професор кафедри сільськогосподарських машин та системотехніки ім. акад. П. М. Василенка Національного університету біоресурсів і природокористування України

В63 Відновлювана енергетика в аграрному виробництві [Скидан О.В., Голуб Г.А., Кухарець С.М. Ярош О.Д., Чуба В.В., Медведський О.В., Цивенкова Н.М., Соколовський О.Ф., Кухарець В.В.]; за ред. О.В. Скидна і Г.А. Голуба. Житомир. ЖНАЕУ, 2018. – 338 с.

ISBN 978-

Навчальний посібник розроблено на основі останніх досягнень та результатів науково-дослідних робіт. Він містить актуальні узагальнення щодо конструкції, розрахунку та експлуатації систем відновлюваної енергетики 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, використання вітрової та сонячної енергії, а також низькотемпературних джерела тепла.

УДК 620.92:631.371

ББК 40.74Я73

© Скидан О.В., Голуб Г.А., Кухарець С.М.
Ярош О.Д., Чуба В.В., Медведський О.В.,
Цивенкова Н.М., Соколовський О.Ф.,
Кухарець В.В.

© Національний університет біоресурсів і
природокористування України, 2018

© Житомирський національний
агроекологічний університет, 2018

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА В АГРАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ, ТЕРМІНИ І ВИЗНАЧЕННЯ	9
1.1. Роль енергоресурсів у виробництві та житлово- комунальному господарстві	9
1.2. Споживання та виробництво енергоресурсів у аграрному виробництві	10
1.4. Концепція диверсифікованого виробництва сільсько- господарської продукції та біопалива в агроекосистемах	15
1.5. Встановлення граничних обсягів сировини для виробництва біопалива в агроекосистемах	20
2. ВИРОБНИЦТВО ТА ВИКОРИСТАННЯ ДИЗЕЛЬНОГО БІОПАЛИВА	25
2.1. Технології виробництва олії та дизельного біопалива	25
2.2. Оцінка сировинної бази агропромислового виробництва дизельного біопалива при двохступінчатому віджиманні рослинної олії	27
2.3. Технічне забезпечення виробництва дизельного біопалива	30
2.4. Теоретичні основи виробництва дизельного біопалива	44
2.5. Економічна ефективність виробництва дизельного біопалива	46
2.6. Основні властивості дизельного біопалива на основі рослинних олій як моторного палива	48
2.7. Експлуатаційні параметри роботи дизельного двигуна при застосуванні дизельного біопалива	51
2.8. Кінематична в'язкість дизельного біопалива	54
2.9. Підвищення ефективності використання дизельного біопалива	56
2.10. Виробнича перевірка роботи МТА із застосуванням системи двоступеневого підігріву дизельного біопалива	64
2.11. Організаційні аспекти використання дизельного біопалива	66
2.12. Економічна ефективність використання дизельного біопалива	68
3. ВИРОБНИЦТВО ТА ВИКОРИСТАННЯ БІОЕТАНОЛУ	76
3.1. Загальні відомості про біоетанол	76
3.2. Сировинна база та основи процесу виробництва біоетанолу	79
3.3. Основи біотехнологічного процесу отримання біоетанолу	81

3.4. Технологічні схеми виробництва біоетанолу	83
3.5. Отримання біоетанолу із целюлозовмістних матеріалів	86
3.6. Технічна реалізація виробництва біоетанолу	88
3.7. Основні властивості біоетанолу як моторного палива	90
3.8. Світовий досвід використання біоетанолу	92
3.9. Перспективи використання біоетанолу в Україні	94
3.10. Використання біоетанолу, як палива для двигунів внутрішнього згоряння	96
3.11. Дослідження роботи двигуна MeM3-245 на паливних сумішах з біоетанолом	100
4. ВИРОБНИЦТВО ТА ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗУ	106
4.1. Сучасні тенденції розвитку технологій видалення та використання гною	106
4.2. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок	109
4.3. Аналіз метаноутворення в біогазових установках	116
4.4. Кінетика зброджування органічної маси в біогазових установках	119
4.5. Розрахунок питомого виходу біометану	122
4.6. Енергетичні параметри та конструкція біогазової установки з обертовим реактором	124
4.7. Технологічний процес отримання біогазу за допомогою біогазової установки з обертовим біореактором	127
4.8. Отримання теплової енергії на основі біогазу	130
4.9. Собівартість виробництва біометану в аграрному виробництві	136
4.10. Виробництво біометану. Очищення та збагачення біогазу	137
4.11. Когенераційні установки	143
4.12. Техніко-економічна оцінка виробництва електроенергії на основі біометану	147
5. МЕХАНІЗАЦІЯ ЗАГОТІВЛІ ТА ВИКОРИСТАННЯ СОЛОМИ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТРЕБ	155
5.1. Загальна структура енергетичного використання соломи зернових культур	155
5.2. Технологія заготівлі соломи	157
5.3. Технології виробництва паливних гранул та брикетів	161
5.4. Використання котлів для спалювання соломи	166
5.5. Паливні властивості соломи та інших рослинних залишків	172

6. ВИРОЩУВАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР	179
6.1. Огляд основних енергетичних культур	179
6.2. Механізація вирощування та збирання енергетичних культур	187
6.3. Паливні характеристики деревини	193
7. ВИРОБНИЦТВО ТА ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗУ	202
7.1. Загальні відомості про генераторний газ та історичні аспекти розвитку технології газифікації	202
7.2. Основи хіміко-термічного процесу газифікації та типи процесів газифікації	208
7.3. Технологічні схеми виробництва генераторного газу	212
7.4. Світовий досвід та практична реалізація виробництва генераторного газу	223
7.5. Перспективи виробництва генераторного газу в Україні	235
8. ВИКОРИСТАННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ	243
8.1. Енергетичний потенціал низькотемпературних джерел енергії	243
8.2. Класифікація теплових насосів та принцип їх роботи	253
8.3. Опалювальні системи на основі теплових насосів	260
8.4. Нестандартні рішення акумулювання низькопотенціальної енергії	269
8.5. Ефективність використання теплових насосів у системах теплопостачання	273
9. ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ВІТРУ	279
9.1. Потенціал вітрової енергетики	279
9.2. Технічні засоби перетворення кінетичної енергії вітру	283
9.3. Ефективність використання вітрогенераторів	288
9.4. Екологічні та економічні аспекти використання вітроелектростанцій	292
9.5. Нетипові конструкції вітрогенераторів	294
10. СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА	299
10.1. Загальна характеристика	299
10.2. Геліотермальна енергетика	304
10.3. Фотовольтаїка	311

ВСТУП

Енергетичні ресурси в сучасних умовах необхідні, як для організації самого процесу виробництва так і для забезпечення потреб людей. Аграрне виробництво також неможливе без ефективного забезпечення енергоресурсами. В країнах членах ЄС спостерігається стрімкий розвиток біоенергетики, директивами Європейського Союзу заплановано в енергетичному балансі частку біомаси до 2020 року на рівні 20%.

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

Розвиток виробництва і використання біопалива в біоенергетичних системах повинен здійснюватися в традиційних напрямках, 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.

Перспективною є концепція розвитку сільськогосподарського виробництва, яка виходить з того, що сільське господарство це екологічно безпечне, диверсифіковане (багатопрофільне) виробництво натуральних продуктів харчування із широким застосуванням органічних та помірним застосуванням мінеральних добрив, біологічних засобів захисту та сортів районованих культур. 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.

При цьому буде також забезпечено стабільний розвиток сільських територій, збільшення біологічного різноманіття в агроекосистемах, виробництво органічних продуктів харчування високої якості. У перспективі це призведе до фінансової стабілізації багатопрофільних сільськогосподарських підприємств, а відповідно і платежів до бюджету.

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

Світові тенденції, зокрема дослідження проведені Міністерством природних ресурсів Канади (<http://www.nrcan.gc.ca/home>), свідчать, що біоенергетика є ресурсом поновлюваних джерела енергії, отриманим з живих організмів, їх побічних продуктів чи рослин. Існують значні потенційні можливості фінансування, щоб допомогти канадській промисловості в області

досліджень, розробок і комерціалізації біоенергетичних технологій, які можуть служити надійними, економічно ефективними і екологічно безпечними рішеннями виробництва енергії. До таких розробок Міністерство природних ресурсів Канади відносить дослідження зосереджені на перетворенні біомаси в енергію і паливо, які можуть бути використані для задоволення енергетичних потреб в промисловості, транспорті, сільському господарстві та опаленні житлових приміщень. Через співпрацю з промисловими підприємствами і в наукових установах та учбових закладах, досліджується біогаз (газифікація та анаеробне зброджування), біопаливо, ресурси біомаси (біомаса для газу, каталітичної конверсії та ущільнення біомаси).

Широке розповсюдження біоенергетичні технології набувають в Данії (<https://stateofgreen.com/en>), так там активно розвивається такі напрямки біоенергетики: сільськогосподарська біомаса, рідке біопаливо, біогаз, паливні елементи (брикети та пеллети). Причому у використанні та розвитку біоенергетичних технологій приймають об'єкти і установи, як бізнесу так і державного сектору. Активно запроваджують вищезгаданий напрямок і в навчальний процес. Так факультетом сільськогосподарських наук університету Aarhus (DJF) та національною лабораторією по вивченню раціональних способів отримання енергії Датського технічного університету (Rissh DTU) проводиться активна науково-навчальна робота, що отримання енергії із сировини аграрного походження.

Подібна картина спостерігається і в інших Європейських країнах, зокрема Німеччині, Австрії, Польщі. Біоенергетика сьогодні набуває особливого розвитку в європейських країнах, яскравою ілюстрацією цього факту є енергетична сфера Німеччина. У цій країні обсяги біоенергетики наздоганяють сонячну та вітрову енергетику.

Загалом у Європейському Союзі енергія з біомаси становить до 70% енергії з усіх відновлювальних джерел. Із біомаси та відходів виробляється до 15% спожитої в ЄС теплової енергії, до 4% електроенергії.

У Англії компанія Bioenergy Crops (<http://www.environmental-expert.com/training>) ініціює та проводить тренінги, що присвячені питанням біоенергетики та її впливу на навколишнє середовище, зокрема і в аграрному виробництві.

Активними дослідженнями біоенергетичних систем займається німецький центр Centre for Environmental Research – UFZ (<http://www.ufz.de>).

В Польщі освітні програми з «Біоенергетичних систем» в області газифікації біомаси, а також комбінованого виробництва електроенергії і тепла має Сілезький технологічного університет (http://www.polsl.pl/en/strony/0_welcome.aspx).

Досвід Євросоюзу – це використання не лише енергосировини зі звалищ, сільськогосподарського чи деревообробного виробництва, а й спеціально вирощених швидкозростаючих енергетичних культур. У світі відомо чимало таких рослин – тополя, верба, акація, безголова троянда, топінамбур, соняшник, просо, сорго, тростина, міскантус, фаларіс, коноплі, очерет та багато інших.

Широкий досвід запровадження дисциплін напрямку «Біоенергетичні системи в навчальному процесі» є в США. Наприклад Montana State University має міждисциплінарну систему «Стійкі продовольчі та біоенергетичні системи», «<http://sfbs.montana.edu/index.html>», якій відповідає і наш підручник «Відновлювана енергетика».

Надзвичайно цікавим є освітній досвід Biomass Energy Center (<http://bioenergy.psu.edu/resources.asp>) в Пенсільванії (США), створеного на базі двох навчальних закладів Institutes of Energy and the Environment (<http://psiee.psu.edu/>) та Environment and Natural Resources Institute (<http://agsci.psu.edu/enri>). Вони розвивають, наприклад такі напрямки: характеристики біомаси в якості палива для опалення, спільне спалювання біомаси з вугіллям, виробництво паливних гранул з біомаси, використання біодизельного палива в двигунах, біогазові технології.

На даний час в Україні в багатьох вузах проводять навчальні заняття із напрямку відновлювальна енергетика. Зокрема, на кафедрі відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» ім. Сікорського при підготовці бакалаврів з електротехніки та електротехнологій за профілем спрямування «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії». В Національному аерокосмічному університеті ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» підготовку фахівців за спеціальністю «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії» здійснюють на кафедрі енергоустановок і двигунів космічних літальних апаратів. Подібні напрямки також існують і у інших вузах.

Напрямок «Відновлювана енергетика в аграрному виробництві» активно розвивається в Національному університеті біоресурсів і природокористування України на кафедрі тракторів, автомобілів та біоенергосистем під керівництвом професора Голуба Геннадія Анатолійовича та в Житомирському національному агроекологічному університеті на кафедрі механіки та інженерії агроекосистем під керівництвом доктора технічних наук Кухарця Савелія Миколайовича.

Надзвичайно цікавим є проект «Підвищення енергоефективності та стимулювання використання відновлюваної енергії в агро-харчових та інших малих та середніх підприємствах (МСП) України» (<http://www.reee.org.ua/>). Проект виконується Агентством ООН з питань промислового розвитку (ЮНІДО) за підтримки Глобального Екологічного Фонду (ГЕФ). Проект присвячений підвищенню ефективності використання сонячної, вітрової енергії та енергії біомаси.

Підручник розраховано для підготовки фахівців освітнього ступеня «Бакалавр» і «Магістр» машинобудівних та агроінженерних напрямів підготовки спеціалістів у вищих навчальних закладах України III-IV рівнів акредитації.

1. ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА 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 споживання енергоресурсів в Україні загалом та окремо в аграрному виробництві (табл. 1.1), то можна зробити висновок, що сільськогосподарське виробництво споживає незначну частку цих ресурсів. Проте, споживання бензину знаходиться на рівні 5 % від його загального споживання, а витрати дизельного палива – на рівні 23,5 % від загальної кількості витрат дизельного палива в країні.

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 та виробництво енергоресурсів у аграрному виробництві

Якщо поглянути на динаміку споживання енергоресурсів у сільському господарстві (табл. 1.2) то останніми роками відбувається незначне 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 зростає 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

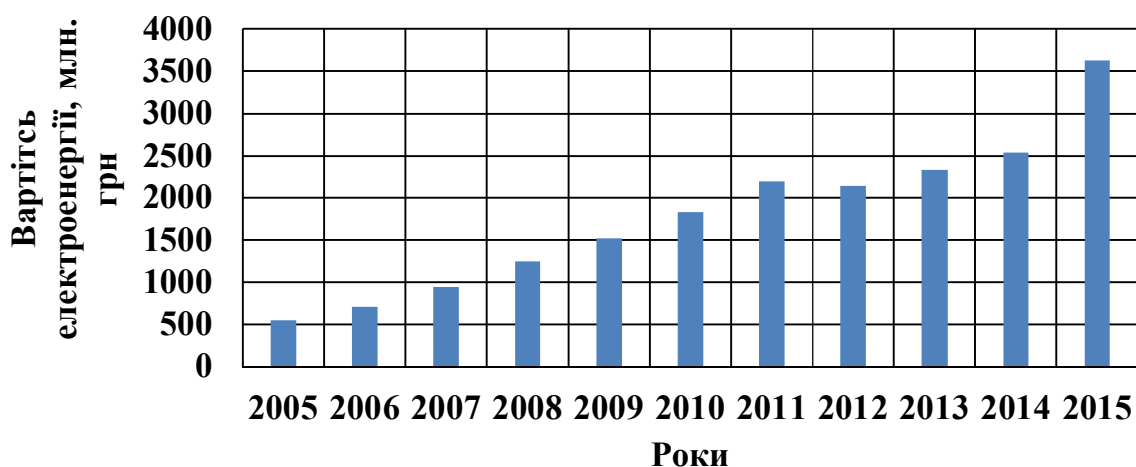


Рис. 1.2. Динаміка зміни вартості електроенергії спожитої у сільськогосподарському виробництві

Сучасне сільськогосподарське виробництво частково вирішує продовольчу задачу за рахунок ефективного виробництва продукції рослинництва (рис. 1.3).

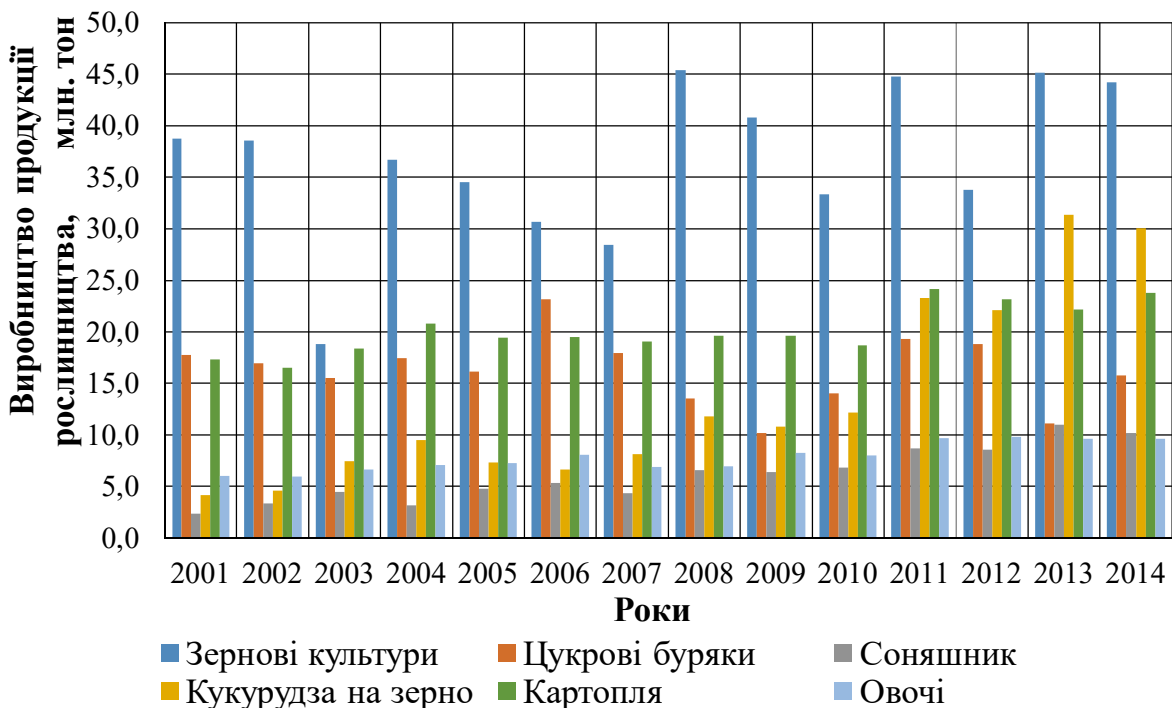


Рис. 1.3. Виробництво продукції рослинництва (без кормових культур)

Проте, галузь тваринництва, яка є достатньо енергомісткою, в останні роки відчуває нестачу енергоресурсів, що приводить до зниження виробництва продукції тваринництва, особливо вирощування та утримання ВРХ (рис. 1.4).

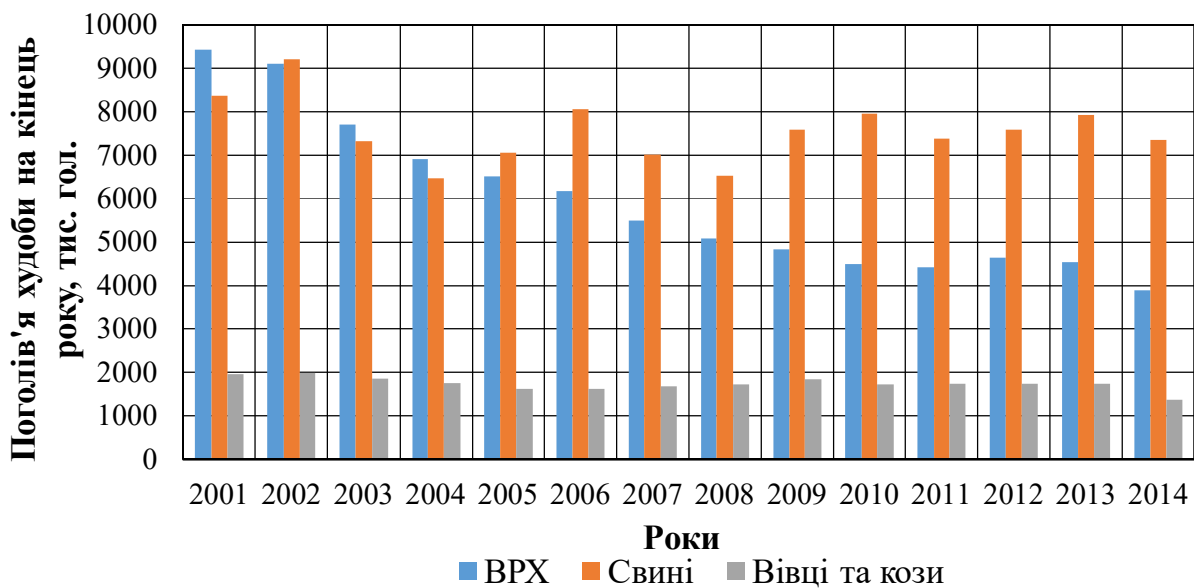


Рис. 1.4. Динаміка поголів'я тварин

Вирощування птиці та виробництво яєць, має тенденцію до зростання за рахунок менших питомих енерговитрат, відносно вирощування та утримання свиней чи ВРХ (рис. 1.5). Крім того, рівень забезпечення аграрного виробництва енергією із власної сировини є низьким. Так, наприклад, галузь тваринництва України, виробляючи значні обсяги органічних відходів, потенційно володіє значними ресурсами для виробництва біогазу, а рівень виробництва біогазу становить 1,2 % від економічно можливого (таблиця 1.3).

Таблиця 1.3. Потенціал виробництва біогазу в тваринництві (в середньому за 2008-2015 рр.)

Джерело сировини	Загальний обсяг сировини для виробництва біогазу тис. т	Потенціал виробництва біогазу, млн. м ³ /рік	Виробляється біогазу, млн. м ³ /рік	Використання потенціалу виробництва біогазу, %
Ферми ВРХ	15431,6	385,8	4,4	1,1
Свиноферми	5656,7	160,3	6,6	4,1
Птахофабрики	4721,5	377,7	0,0	0,0
Разом	-	923,8	11,0	1,2

Енергетичний потенціал продукції рослинництва досить значний, проте його використання знаходиться на рівні 2,1 % для соломи та 0,2 % для кукурудзи (таблиця 1.4).

Тому необхідне підвищення рівня використання доступної в якості енергоресурсів сировини сільськогосподарського походження, що в свою чергу призведе до зростання рівня енергетичної автономності агроєкосистем та дозволить вирішувати енергетичну задачу із збереженням або підвищенням ефективності виробництва продукції.

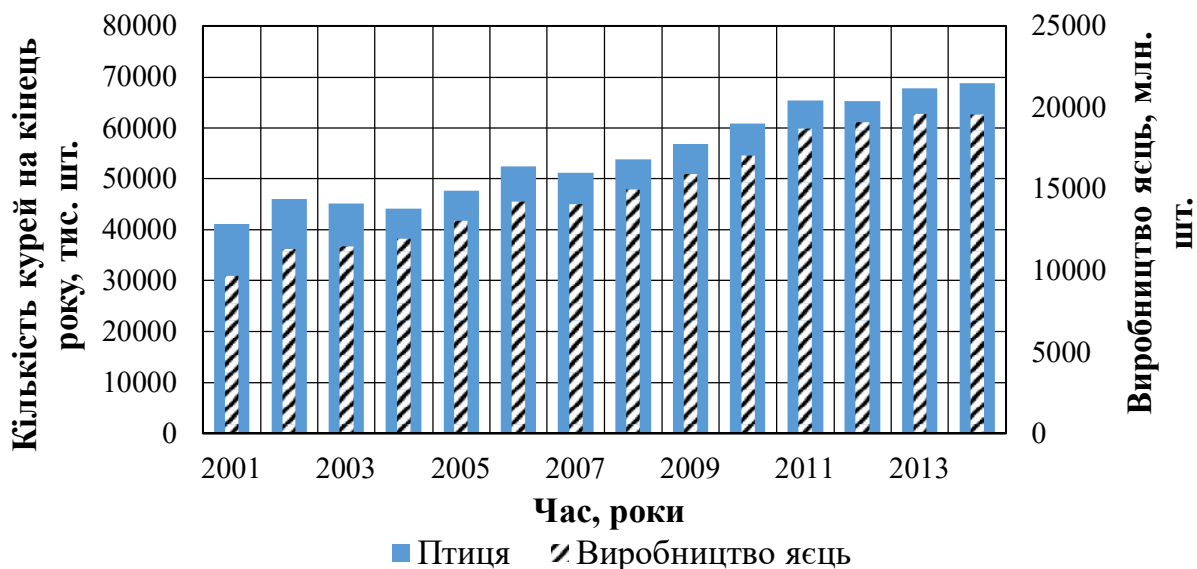


Рис. 1.5. Динаміка кількості курей та виробництва продукції птахівництва

Вирішення задач функціонування агроєкосистеми, є науковою проблемою, яка викликана тим, що збільшення виробництва продуктів споживання (вирішення першої задачі) та збільшення виробництва енергії (вирішення другої задачі), призводить до погіршення екологічного стану агроєкосистеми, що в першу чергу виражається в дегуміфікації ґрунтового середовища. Тобто, комплексне вирішення вказаних задач потребує подолання протиріччя, яке полягає в тому, що збільшення виробництва продуктів харчування або виробництва та споживання енергії призводить до порушення екологічної рівноваги та погіршення стану навколишнього середовища.

Таблиця 1.4. Енергетичний потенціал в рослинництві (в середньому за 2008-2014 рр.)

Вид біомаси	Енергетичний потенціал, млн. т	Енергетичний потенціал, млн. т у.п.	Використано в якості енергоресурсу, тис. т	Використання енергетичного потенціалу, %
Солома зернових культур	9,2	4,5	194,1	2,1
Відходи виробництва кукурудзи на зерно:				
всього, у т.ч:	16,1	4,4	29,2	0,2
- стебла (з листям)	12,1	3,3	-	-
- стрижні	4,0	1,1	-	-
Відходи виробництва соняшника:				
всього, у т.ч:	8,3	1,7	0	0
- стебла (з листям)	5,7	1,2	-	-
- кошики	2,6	0,5	-	-
Всього	33,6	10,6	223,3	0,7

1.3. Об'єкти відновлюваної енергетики в аграрному виробництві

Зважаючи на те, що в країнах членах ЄС спостерігається особливо стрімкий розвиток біоенергетичних систем, 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 відновлюваної енергетики повинен здійснюватися в традиційних напрямках (рис. 1.6), а саме:

- виробництво і використання дизельного біопалива та біонафти;
- виробництво біоетанолу;
- виробництво і використання біогазу та генераторного газу;

– використання соломи та подрібненої деревини на теплові потреби, виробництво брикетів із незернових відходів та тирси.

Доречним є використання фотовольтаїчних систем, вітрогенераторів та теплових насосів.



Рис. 1.6. Об'єкти відновлюваної енергетики 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. Концепція диверсифікованого виробництва сільськогосподарської продукції та біопалива в агроєкосистемах

Перспективною для України є концепція розвитку сільськогосподарського виробництва, яка виходить з того, що сільське господарство це екологічно безпечне, диверсифіковане (багатопротилежне) 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, при виробництві органічних продуктів харчування високої якості. У перспективі це призведе до фінансової стабілізації багатопрофільних сільськогосподарських підприємств, а відповідно і платежів у бюджет.

Відповідно до концепції екологічно безпечного, багатопрофільного сільськогосподарського виробництва, агроекосистема повинна мати такі структурні елементи, або напрямки виробництва: рослинництво, тваринництво та птахівництво, переробка та зберігання сільськогосподарської продукції, виробництво біопалива (рис. 1.7).

Як приклад вищезгаданої концепції розвитку на рис. 1.8. наведено структурну схему диверсифікованого виробництва сільськогосподарської продукції з біоенергоконверсією органічної сировини та виробництвом біопалив, а також з наступним отриманням теплової та електричної енергії із твердого та газоподібного біопалива для б-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 тваринництва та аквакультури;
- виробництво продуктів тваринництва та аквакультури;
- 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 збродженого гною або посліду для виробництва компосту;
- виробництво субстрату для вирощування печериць або гливи та виробництво грибів;
- виробництво дизельного біопалива з ріпакового насіння;
- використання гліцеринового осаду на теплові потреби або його анаеробне зброджування.

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 % від 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.

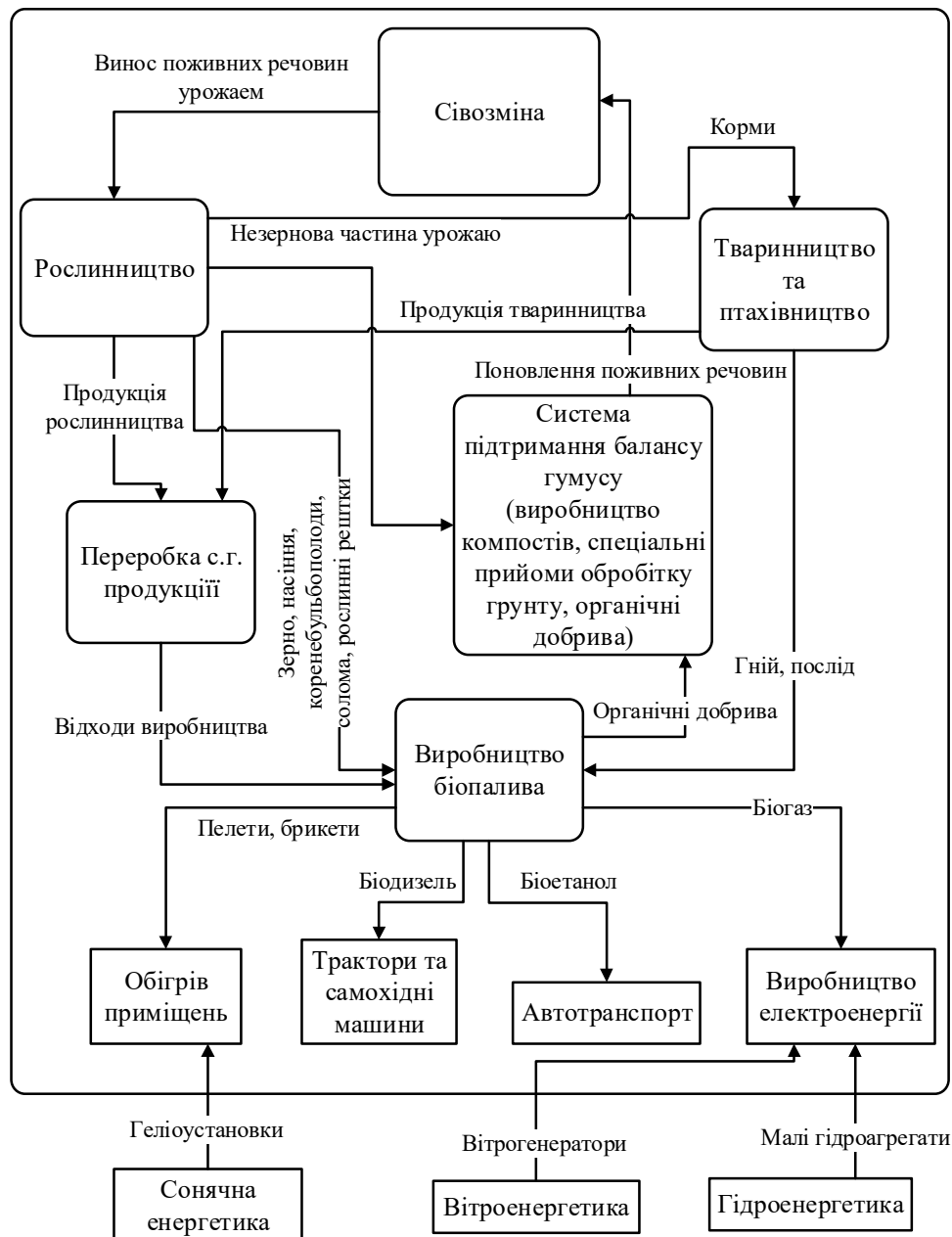


Рис. 1.7. Структурна схема агроекосистеми із виробництвом біопалива

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 тонн 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.

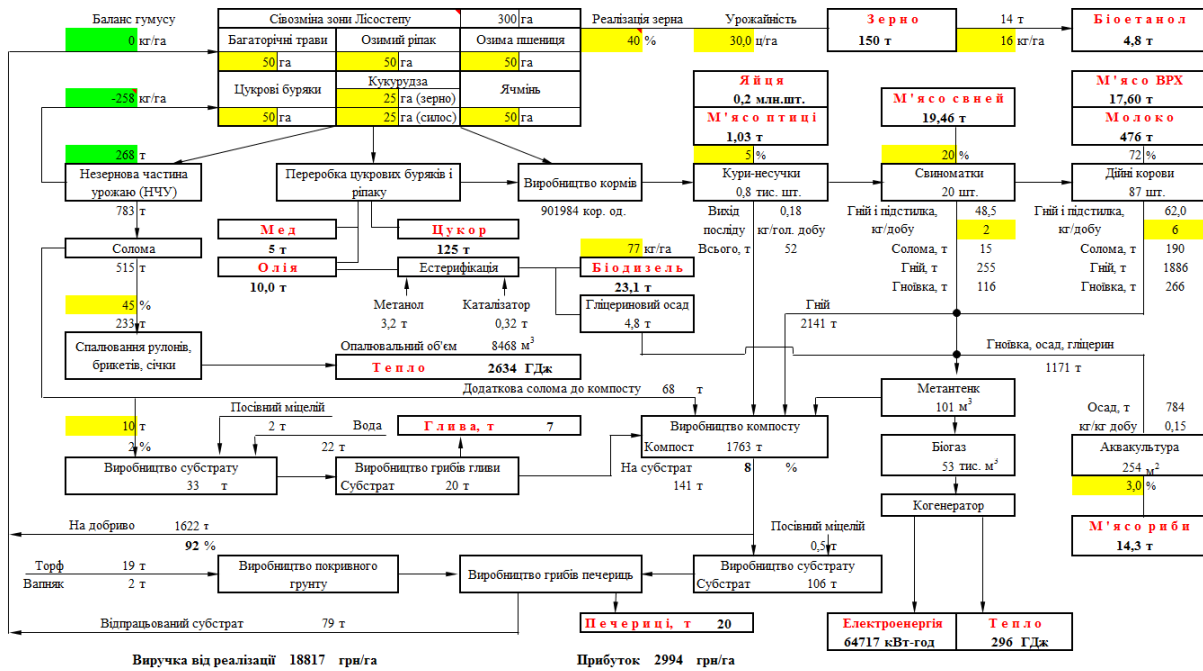


Рис. 1.8. Структурна схема диверсифікованого виробництва сільськогосподарської продукції та біопалива в агроєкосистемах

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 агроєкосистемі зерна.

Проте, використання енергетичного потенціалу біомаси обмежено відсутністю агропромислових технологій отримання енергії та відповідної техніки і обладнання, які адаптовані до умов функціонування конкретних агроєкосистем (табл. 1.5). 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.

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

непоновлюваних 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.

Таблиця 1.5. 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.

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.

1.5. Встановлення граничних обсягів сировини для виробництва біопалива в агроекосистемах

Для твердого біопалива потенціал сировини рослинного походження становитиме:

$$CE = \sum_{i=1}^n s_i u_i [k_{III}^i - (k_{III}^{iB} + k_K^i)] - \sum_{j=1}^m N_j T_j m_{II}^j \quad (1.1)$$

де CE – вихід із сівозміни біомаси соломи, яка може бути направлена на забезпечення 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 в сівозміні, т/га; k_{III}^i – коефіцієнт виходу соломи i -ї культури; k_{III}^{iB} – коефіцієнт, який враховує обсяг соломи, що залишається на полі після збирання i -ї культури; k_K^i – коефіцієнт надходження соломи на компостування; m – кількість видів поголів'я тварин та птиці; 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 або птиці, т/голову за добу.

Потенціал біомаси виробництва біогазу:

$$BE = k_{BG} k_{BV} \sum_{j=1}^m N_j T_j (m_E^j + m_B^j + m_{II}^j) \quad (1.2)$$

де BE – вихід біогазу, м³; k_{BG} – коефіцієнт використання гною в біогазових установках; k_{BV} – коефіцієнт виходу біогазу в біогазових установках, м³/т; m_E^j – маса екскрементів j -го виду тварин або птиці, т/голову за добу; m_B^j – маса вологи, що надходить в екскременти j -го виду тварин або птиці, т/голову за добу.

Потенціал біомаси виробництва генераторного газу:

$$GE = k_{BG}^i \left(\sum_{i=1}^n s_i u_i [k_{III}^i - (k_{III}^{iB} + k_K^i)] - \sum_{j=1}^m N_j T_j m_{II}^j \right) \quad (1.3)$$

де GE – вихід генераторного газу, м³; k_{BG}^i – коефіцієнт виходу генераторного газу із біомаси соломи i -ї культури, м³/т.

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

$$s_D = \frac{N_D \sum_{i=1}^n s_i}{u_D k_{BKD} k_{BD}} \quad (1.4)$$

де s_D – площа необхідна для вирощування культури, що забезпечить агроекосистему 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; $k_{BKД}$ – коефіцієнт використання культури для виробництва дизельного біопалива; $k_{вд}$ – 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.

Запитання для самоконтролю:

1. Дайте визначення терміну технічна біоенергетика.
2. Вкажіть основні особливості технічної біоенергетики.
3. Які особливості біоенергетичних систем в аграрному виробництві?
4. Які джерела енергії в природі?
5. Які види біомаси в аграрному виробництві?
6. Дайте визначення терміну біогаз.

7. Назвіть основні види твердого біопалива.
8. Які види рідких біопалив 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 агроєкосистемах?
19. Які блоки входять в структурну схему агроєкосистеми із виробництвом біопалив?
20. Назвіть напрямки диверсифікованого виробництва сільськогосподарської продукції та біопалив в агроєкосистемах.
21. Чим обмежено використання енергетичного потенціалу біомаси в аграрному виробництві?
22. Які основні механіко-технологічні особливості виробництва біопалива та отримання енергії в межах агроєкосистеми?
23. Які основні переваги і недоліки виробництва і використання біогазу в аграрному виробництві?
24. Які основні переваги виробництва теплової енергії із сировини сільськогосподарського походження?
25. В чому полягають складнощі та переваги виробництва рідкого біопалива в аграрному виробництві?
26. Від чого залежать граничні значення обсягів сировини для виробництва біопалива?
27. Який вклад виробництва біопалив у структурі надходжень коштів та прибутків від виробництва сільськогосподарської продукції?

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 агроєкосистем / Г.А. Голуб, В.О. Дубровін, О.А. Марус // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України / ДНУ УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого. – 2012. – Вип. 16 (30), кн. 2 – С. 339-345.

6. Голуб Г.А. Технічне забезпечення органічного виробництва сільськогосподарської продукції та біопалив. / Г.А. Голуб, В.С. Таргоня // 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 агроєкосистеми / 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. Голуб Г.А. Моделювання гумусного стану ґрунтового середовища агроєкосистем / Г.А. Голуб, С.М. Кухарець // – Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – К.: 2014. – Вип. 196, ч. 2. – 336 с. – С. 20-27.

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. Кухарець С.М. Регулювання використання органічних ресурсів для виробництва біопалива / С.М. Кухарець, Г.А. Голуб // – Сільськогосподарські машини: Збірник наукових статей – Луцьк, Редакційно-видавничий відділ ЛНТУ, 2013. – Вип. 24. – С. 187-194.

14. Голуб Г. Особливості виробництва біопалива та отримання енергії в умовах агропромислового виробництва / Г. Голуб, С. Кухарець, В. Шубенко [та ін.] // Техніка і технології АПК (Науково-виробничий журнал). – 2015. – № 2 (65). – С. 31-34.

15. 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.

16. Шелудченко Б.А. Вступ до конструювання природно-техногенних геоекосистем / Б.А. Шелудченко // – Кам'янець-Подільський: ПДАТУ, 2014. – 170 с.

17. Golub G. 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>.

18. Кухарець С.М. Підвищення енергетичної автономності агроєкосистем. Механіко-технологічні основи: монографія / С.М. Кухарець – Житомир: ЖНАЕУ, 2016. – 192 с.

19. 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.

20. Кухарець С.М. Отримання енергії із сировини сільськогосподарського походження / С. М. Кухарець, Г. А. Голуб // Наук. вісн. ТДАТУ. – 2016. – Вип. 6, Т. 1. – С. 80–98. – Режим доступу до журн.: <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdatu/pdf6t1/9.pdf>

21. Голуб Г. А. Вибір моделі для оцінки гумусного стану ґрунтового середовища агроєкосистем / Г. А. Голуб, С. М. Кухарець // Вісник Сумського нац. аграрного ун-ту. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». – 2016. – Вип. 3 (28). – С. 190–194.

22. Integrated use of bioenergy conversion technologies in agroecosystems/ Golub G.A., Kukharets S.M., Yarosh Y.D., Kukharets V.V // INMATEH – Agricultural Engineering.– 2017. – Vol. 51, No.1. – P. 93–100

23. Social acceptance of renewable energy: some examples from Europe and developing Africa /Olaf Pollmann – Szilárd Podruzsik – Orsolya Fehér // Society and Economy, 36 (2014) 2, pp. 217–231.

24. Integrated assessment of sustainable cereal straw potential and different straw-based energy applications in Germany // Applied Energy, v. 114, February 2014, p. 749-762.

25. Ivanova, B. A mathematical model formulation for the design of an integrated biodiesel-petroleum diesel blends system [Text] / B. Ivanov, S. Stoyanov // Energy. – 2016. – Vol. 99. – P. 221–236. doi: 10.1016/j.energy.2016.01.038.

2. ВИРОБНИЦТВО ТА ВИКОРИСТАННЯ 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 зі створенням обладнання 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.

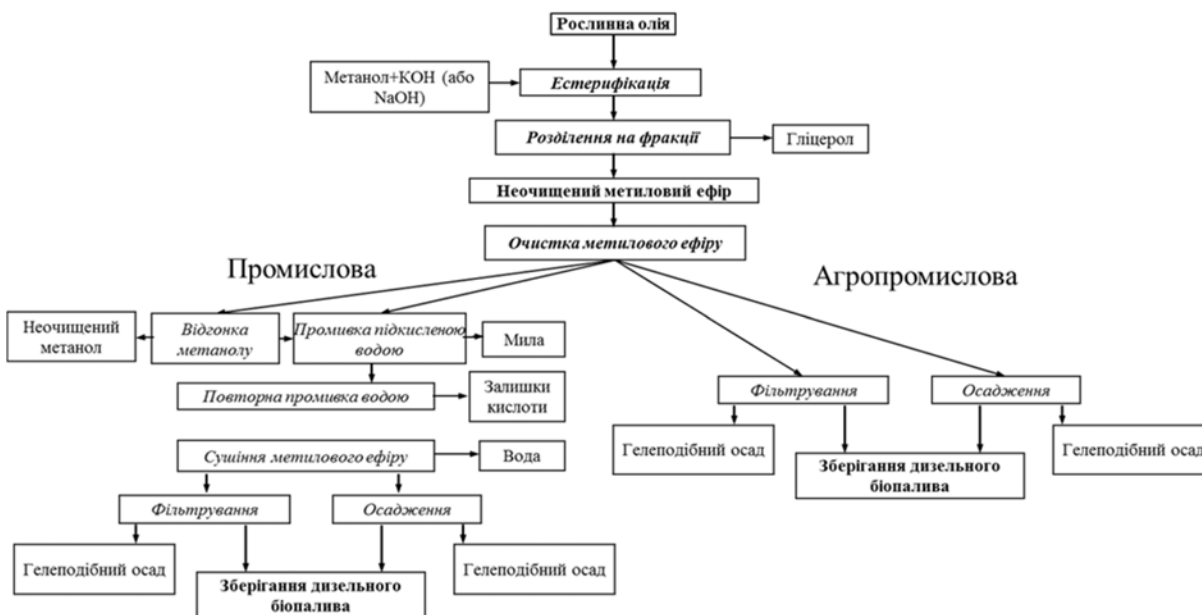
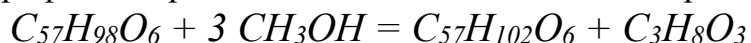


Рис. 2.2. Схема виробництва дизельного біопалива

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.

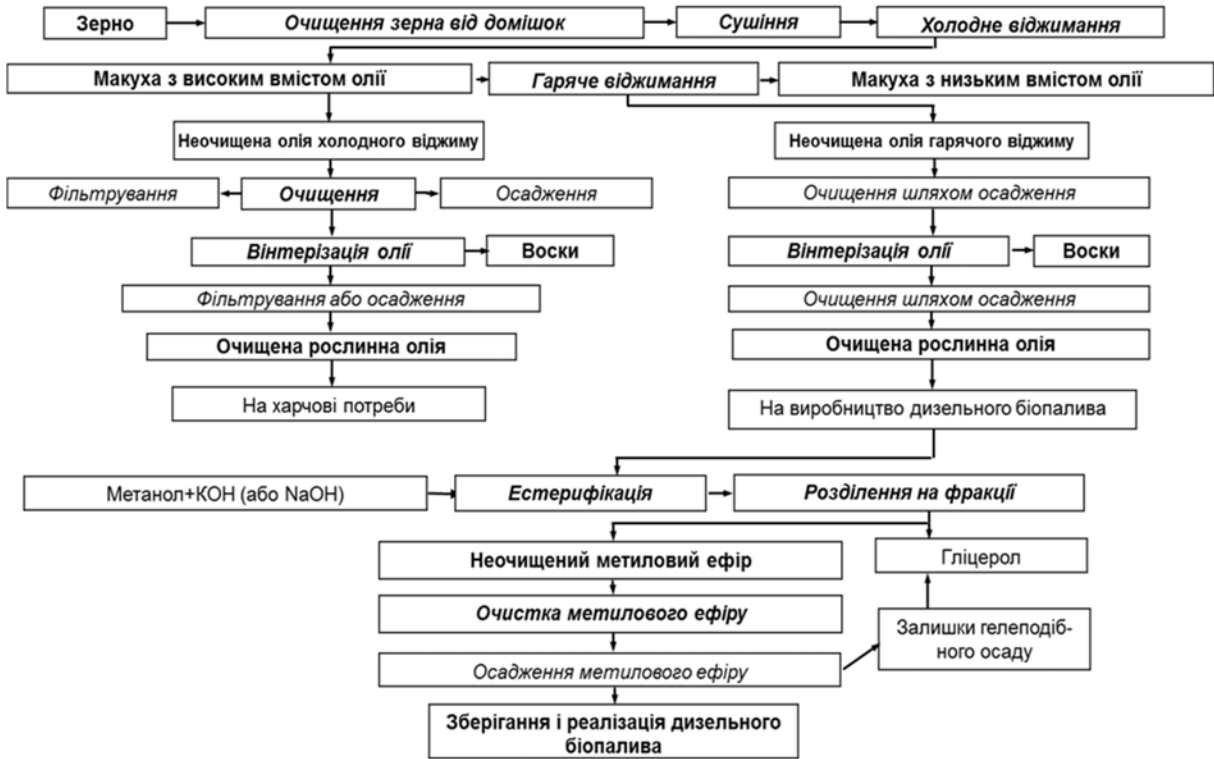


Рис. 2.3. Схема агропромислового виробництва олії холодного віджимання та дизельного біопалива із олії гарячого віджимання

Олію холодного віджимання очищають шляхом фільтрації або осадження, піддають вінтеризації, повторно фільтрують або осаджують та використовують для харчових потреб. Олію гарячого віджимання очищають шляхом осадження, піддають вінтеризації для видалення восків, повторно очищають 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 очищають 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_{og} – маса олії другого (гарячого) віджимання, кг.

Помноживши рівняння балансу маси олії на ціну кожного компоненту отримаємо:

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

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

Розділивши на масу зерна олійної культури одержимо:

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

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

Враховавши, що $k_{og} = k_o - k_{ox}$, можна записати:

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

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

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

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 $k_{ox} = k_{og} = \frac{k_o}{2}$, ціна олії другого (гарячого) віджимання в залежності від ціни олії першого (холодного) віджимання становитиме:

$$C_{og} = 2C_o - C_{ox} \quad (2.6)$$

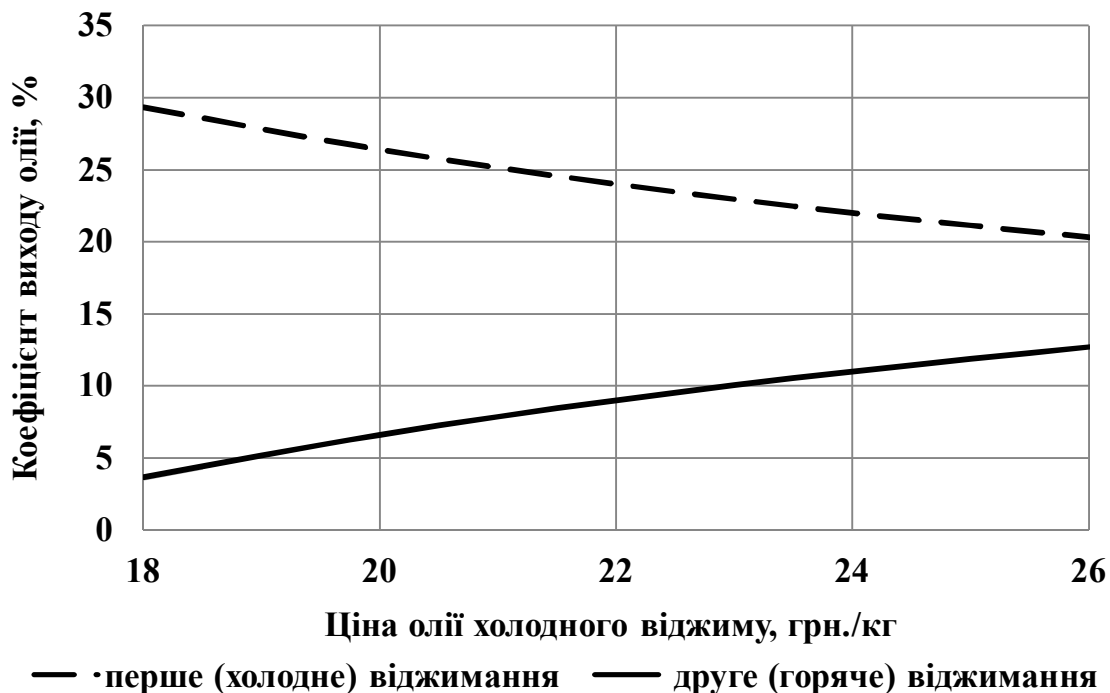


Рис. 2.4. Залежність коефіцієнтів виходу олії першого (холодного) та другого (гарячого) віджимання від ціни олії першого (холодного) віджимання при нульовому значенні ціни олії другого (гарячого) віджимання

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, олією другого (гарячого) віджимання – для потреб виробництва дизельного біопалива.

2.3. Технічне забезпечення виробництва дизельного біопалива

Упродовж останнього часу розробкою обладнання для виробництва дизельного біопалива займались 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 кожну технологічну операцію 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 із 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 продуктивністю 5 л/год.



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

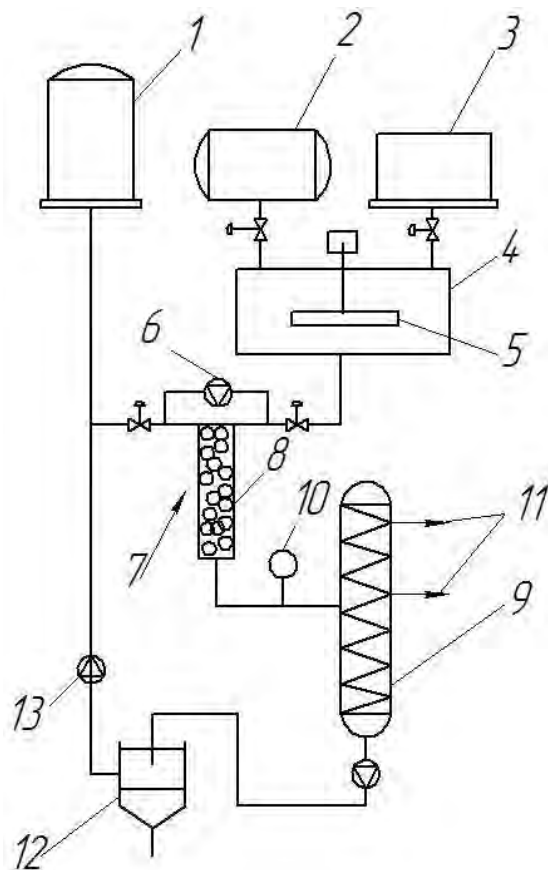
В Україні існують підприємства, які виробляють обладнання для виробництва дизельного біопалива або продають імпортоване обладнання різної продуктивності із застосуванням автоматизації та без неї, а також використовують конструкційні матеріали різної якості, що впливає на вартість обладнання.



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 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, куди 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 у ємність для спирту 1.

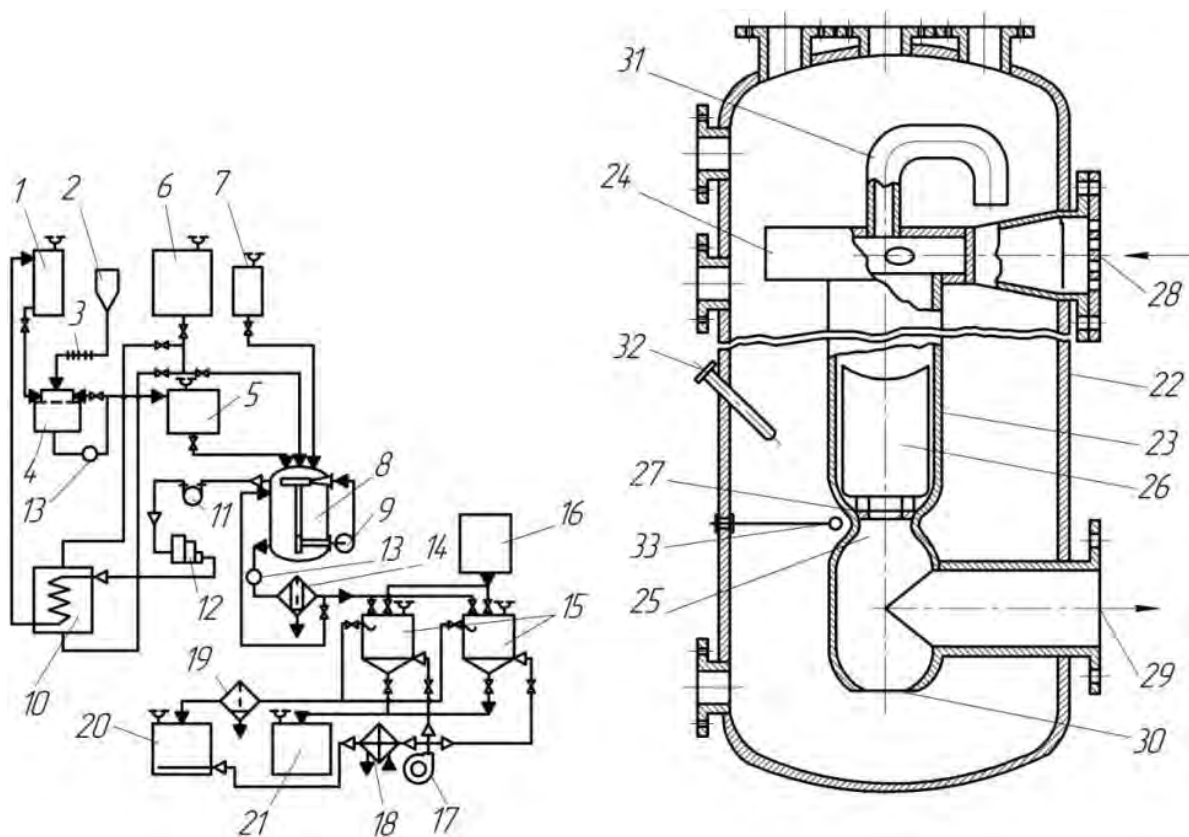


Рис. 2.10. Установка для одержання біопалива для дизелів згідно патенту України на корисну модель 19495 (позначення в тексті)

У 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 у 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 з ємності 13 в магістраль (а) через відкритий кран 3. При цьому кран 4 повинен бути відкритим, а крани 5, 8, 10 – закриті. Після цього, кран 10 відкривають і подають через нього дизельне паливо з ємності 9 у змішувач-ежектор 11. За допомогою крана 4 регулюють робочий тиск у нагнітальній магістралі 12, який контролюється манометром 7.

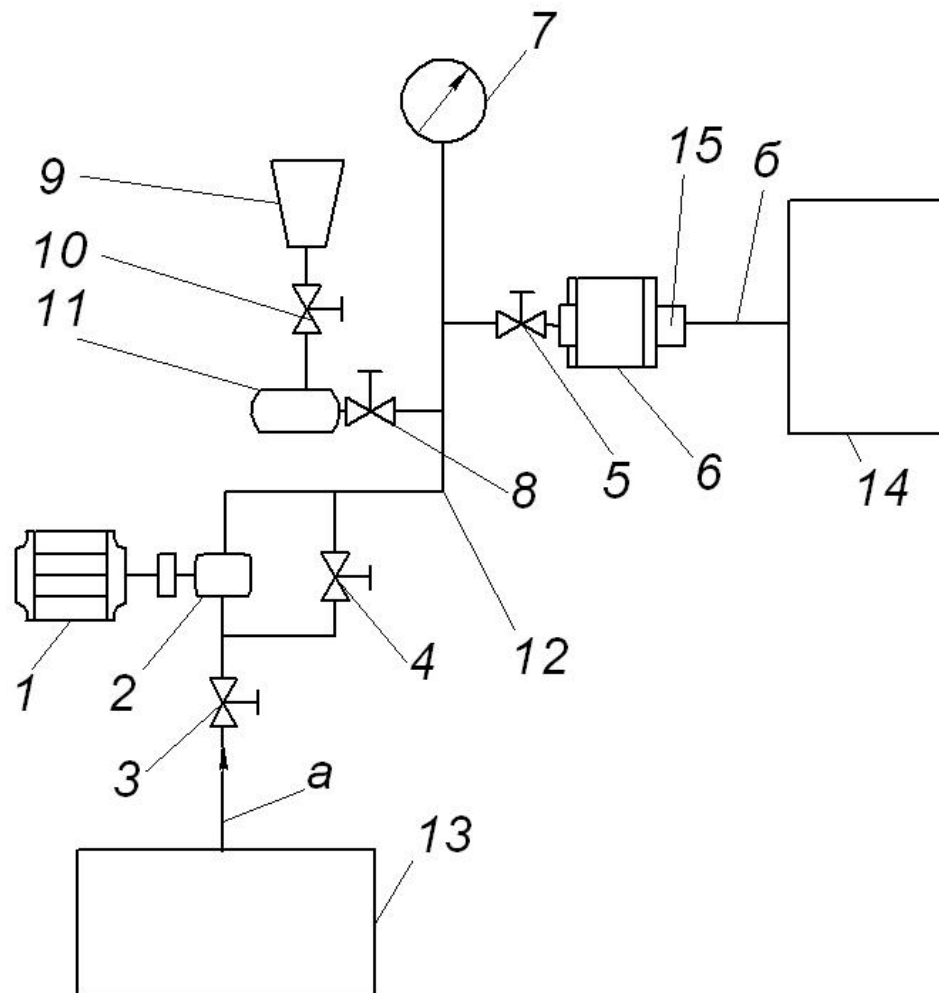


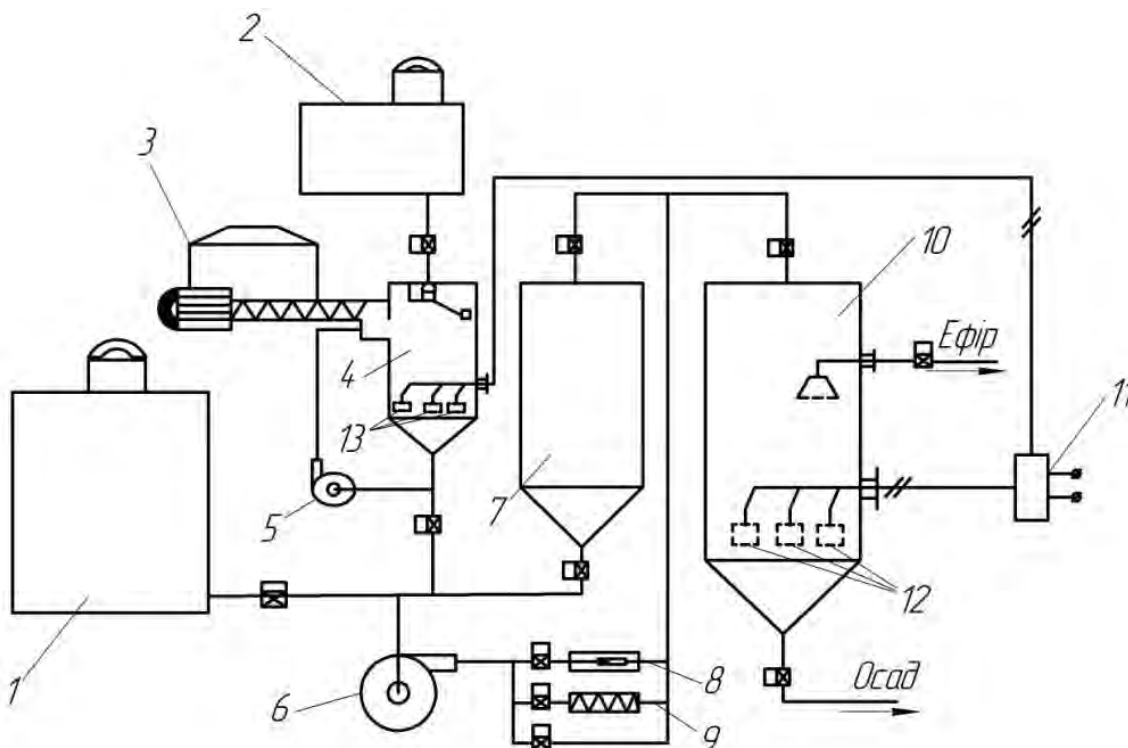
Рис. 2.11. Гідродинамічна установка для отримання дизельного біопалива згідно патенту України на корисну модель 31463 (позначення в тексті)

Дизельне паливо під тиском проходить по нагнітальній магістралі 12 та потрапляє у кавітатор 6, де відбувається інтенсивне насичення дизельного

палива ріпаковою олією. Із виходу 15 кавітатора гідродинамічна суміш по магістралі (6) подається у технологічний бак 14. Після насичення дизельного палива ріпаковою олією, крани 8, 10 закривають, а установку відключають.

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: у ємності 1 повинна бути олія, у закритому резервуарі 2 метанол, у 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. 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.

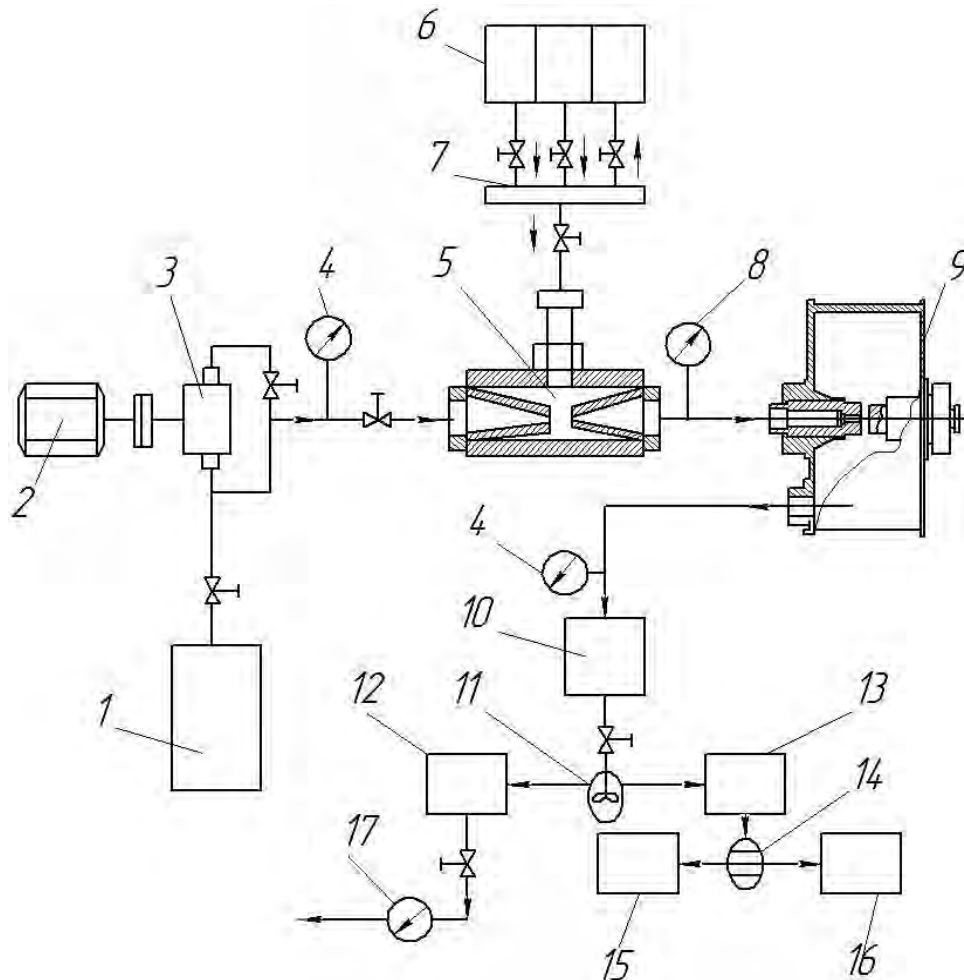
Недоліком даної установки є висока вартість за рахунок додаткових ємностей, ультразвукових випромінювачів та додаткового циркуляційного насоса, що заважає конкурувати на ринку з більш простим обладнанням розробленим під використання в агропромисловому виробництві.

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 та всмоктуються в порожнину розрідження дозатора 5. Попередньо насичена суміш надходить у гідродинамічний кавітатор 9, де 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 із ємності 13 в фільтр-вологоочисник 14, де розділяється на гліцерин і воду. Гліцерин зливається в ємність 15, а вода в ємність 16. Дизельне біопаливо із 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). У місткості 3 за допомогою насоса 5 відбувається змішування метилового спирту з каталізатором. Після завершення перемішування утворений метилат калію за допомогою насоса 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

змійовика 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.

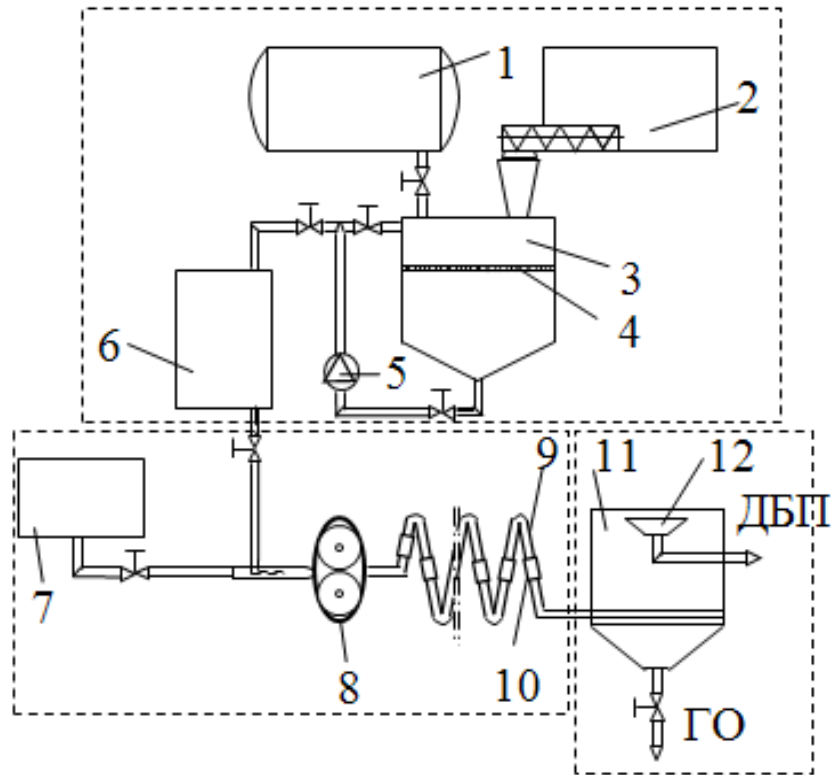


1 – технологічна ємність (для ріпакової олії); 2 – електродвигун; 3 – гідронасос; 4 – манометр; 5 – дозатор змішувач; 6 – бак; 7 – колектор; 8 – датчик температури; 9 – гідродинамічний диспергатор; 10 – ємність; 11 – сепаратор; 12 – ємність для дизельного біопалива; 13 – ємність для водно-гліцеринової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



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

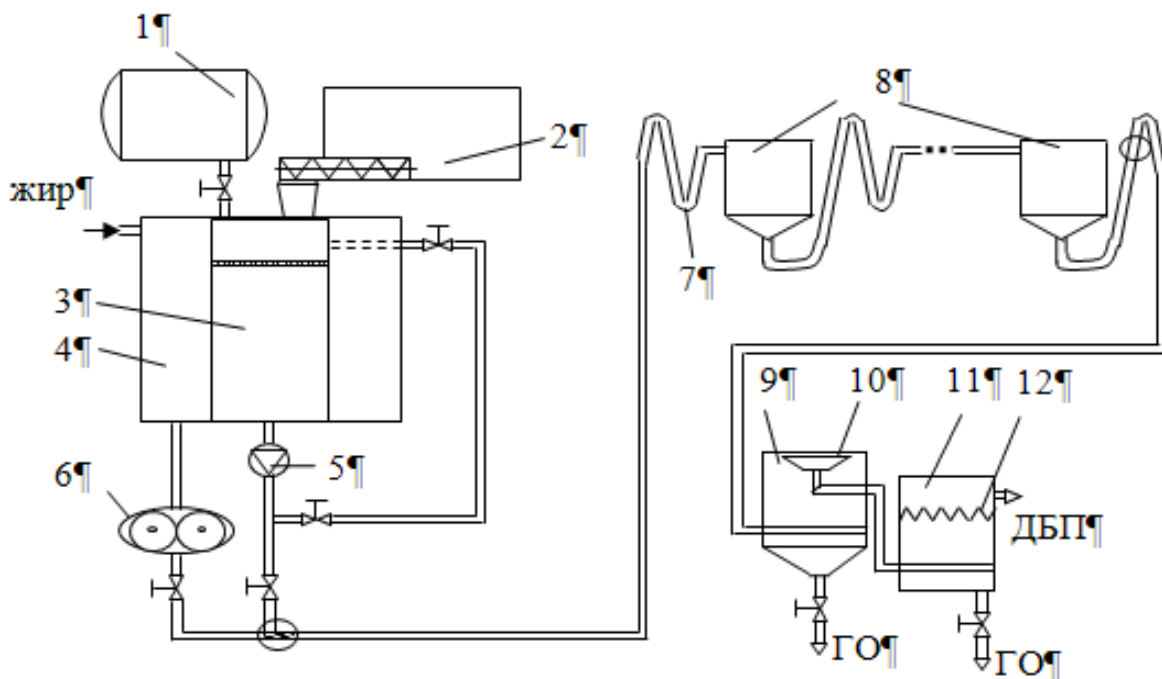
Рис. 2.14. Обладнання для виробництва дизельного біопалива (патент України на винахід 89320)

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.

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

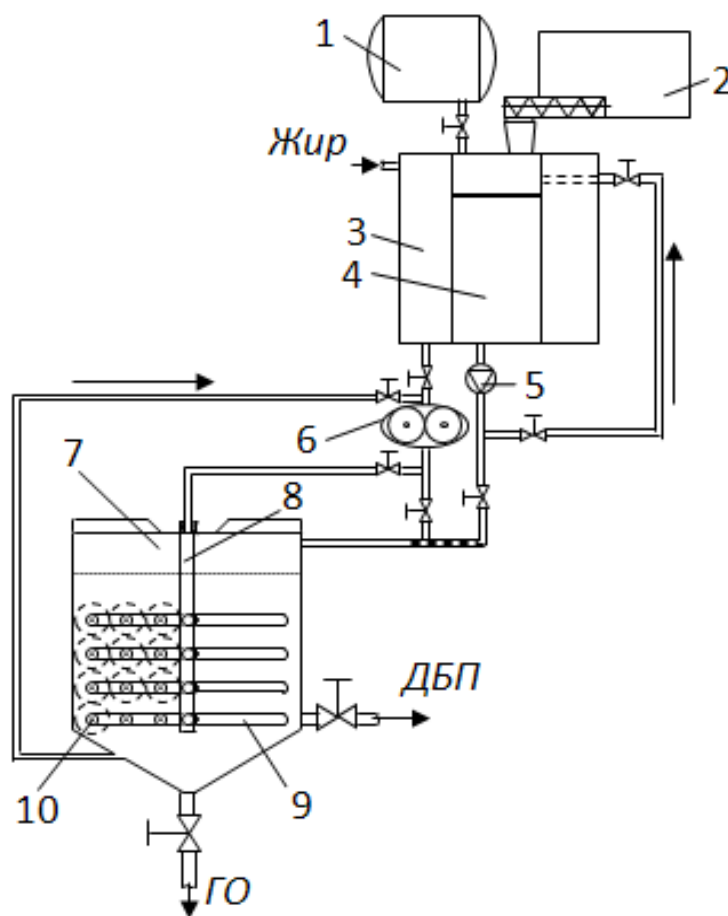
Рис. 2.15. Обладнання для виробництва дизельного біопалива (патент України на винахід 94346)

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 гліцеринний 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 вагомість становить 60 %, а тому оцінку якості дизельного біопалива доцільно визначати за наступним виразом:

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

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

$$k_{\text{ДБП}} = \frac{V_{\text{ДБП}}}{V_{\text{О}}} 100\% \quad (2.9)$$

де $k_{\text{ДБП}}$ – коефіцієнт виходу дизельного біопалива, %; $V_{\text{ДБП}}$ – об'єм дизельного біопалива, л; $V_{\text{О}}$ – об'єм олії, л.

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

$$Q = \frac{V_{\text{О}} k_{\text{ДБП}}}{\tau_{\text{з}} + \tau_{\text{м}} + \tau_{\text{в}}} \quad (2.10)$$

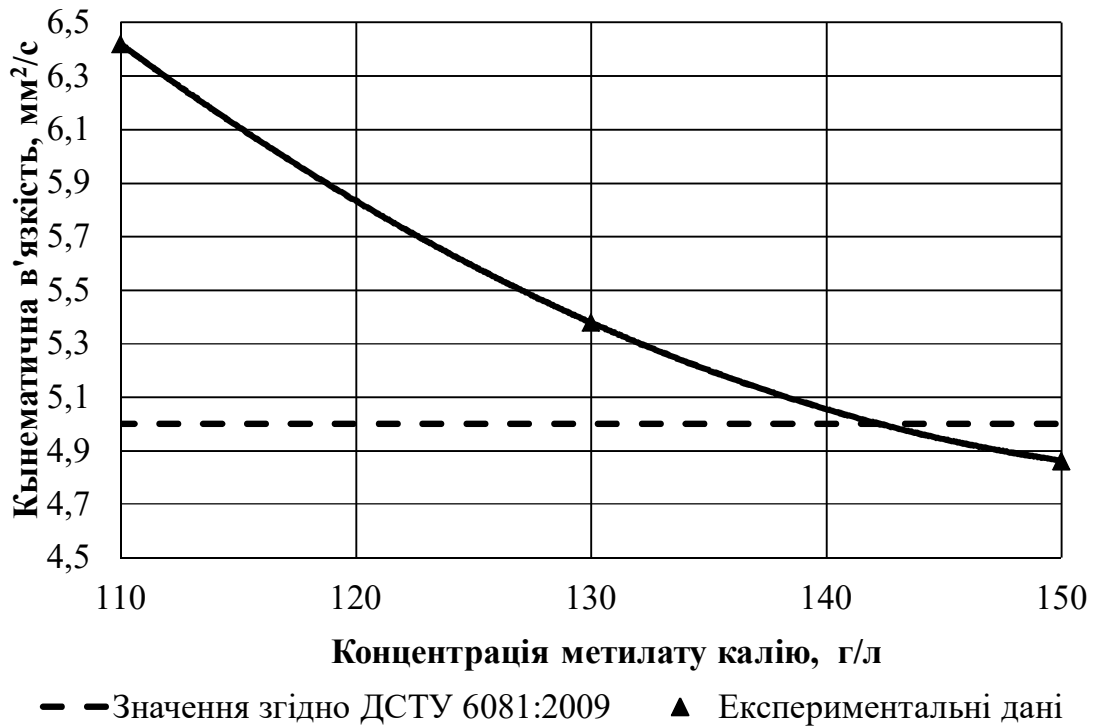


Рис. 2.19. Залежність кінематичної в'язкості від концентрації метилату калію

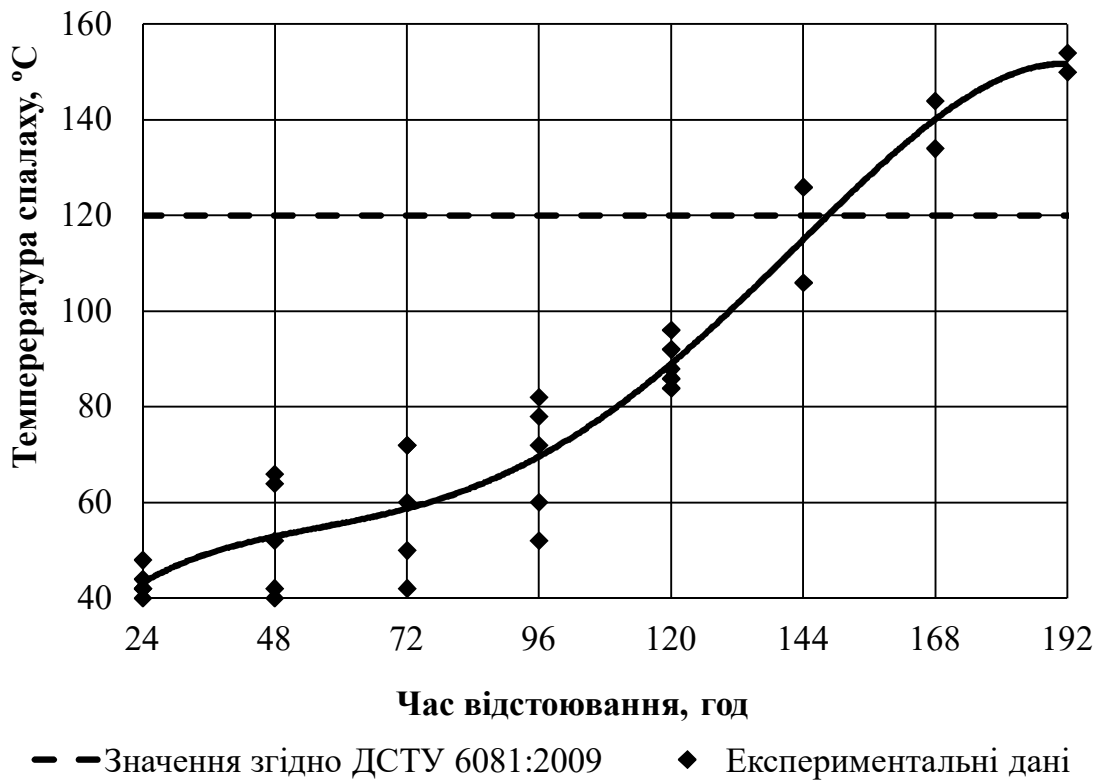


Рис. 2.20. Залежність температури спалаху від часу відстоювання метилового ефіру з доступом повітря

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 на виробництво дизельного біопалива визначають за виразом:

$$E = \frac{W}{V_{ДБП}} \cdot 100 \quad (2.12)$$

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.

2.6. 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. 2.3).

Таблиця 2.3. 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. 2.3 показує, що дизельне біопаливо найбільш близьке за енергомісткістю 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, 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 та 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 кожній рослині свій і змінюється в досить широких межах, і навіть у рослин одного виду може суттєво відрізнитися 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 2.4 наведені основні властивості дизельного біопалива з олійних культур, які вирощуються в Україні та мають суттєвий вплив на використання дизельного біопалива.

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 2.5 наведені результати досліджень температури помутніння та застигання дизельного біопалива отриманого із найпоширеніших рослинних олій.

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 олій можна зробити наступні висновки:

Таблиця 2.4. 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
Лляна	887	7,11	140	89,3
Соєва	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.

Таблиця 2.5. Температура помутніння та застигання дизельного біопалива з різних рослинних олій

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

– 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.

2.7. Експлуатаційні параметри роботи дизельного двигуна при застосуванні дизельного біопалива

На основі проведених експериментальних досліджень роботи дизельного двигуна Д-65Н на регуляторних характеристиках (рис. 2.21) 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 із проведеними дослідженнями годинна витрата палива в 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.).

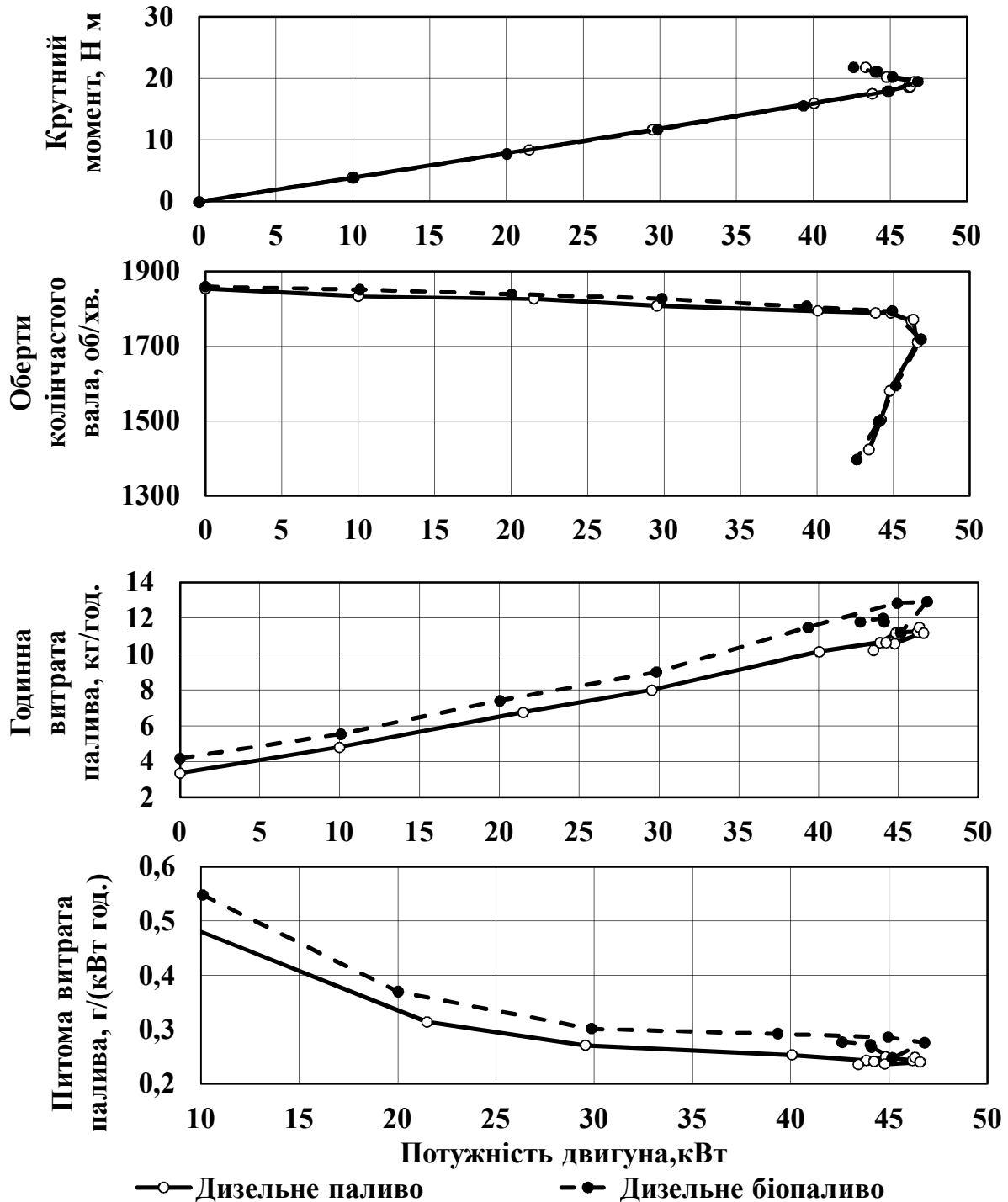


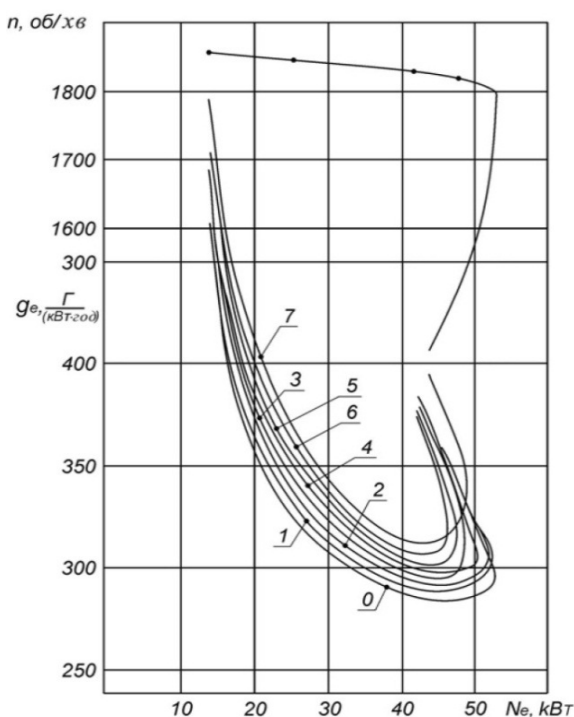
Рис. 2.21 Регуляторні характеристики двигуна Д-65Н

Зокрема при переході із 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 із 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 із 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-14Н (рис. 2.22) на дизельному паливі та дизельному біопаливі, а також їх сумішах із 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.



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. 2.22. 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 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.

2.8. 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 2.6 представлено результати досліджень впливу температури на кінематичну в'язкість дизельного біопалива на основі ріпакової та соєвої олій, а на рисунку 2.23 зображено характеристики зміни кінематичної в'язкості паливних сумішей дизельного біопалива із дизельним паливом нафтового походження.

Таблиця 2.6. 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. 2.24 наведені порівняльні дослідження зміни показників густини та в'язкості дизельного біопалива та дизельного палива нафтового походження.

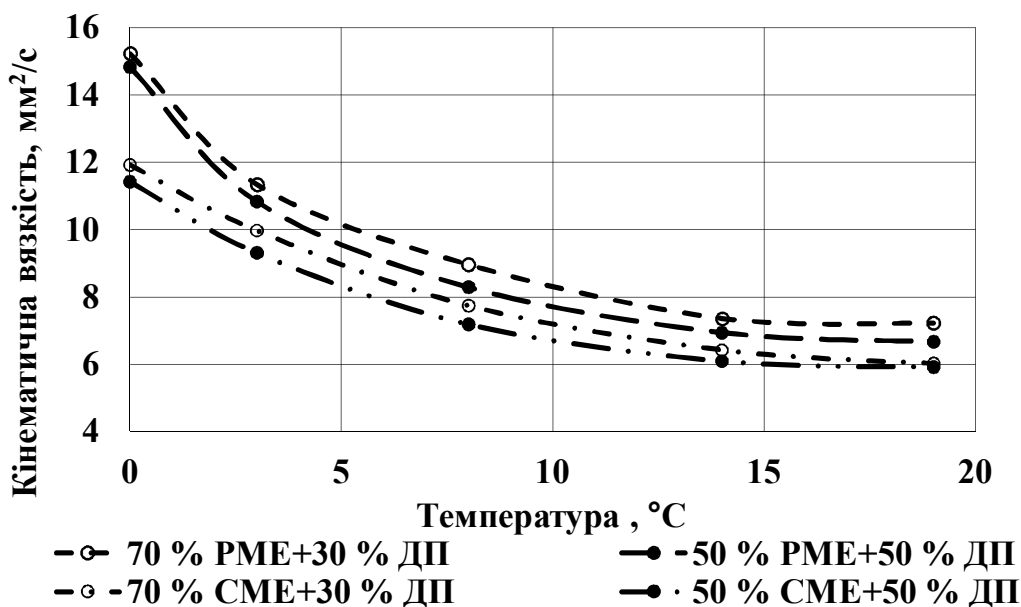


Рис. 2.23. Залежність кінематичної в'язкості сумішей дизельного біопалива з дизельним паливом від температури

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.

Враховуючи те, що температура дизельного палива в головці паливного насоса високого тиску сягає температури 60 °С і кінематична в'язкість дизельного палива при даній температурі становить 2 мм²/с, аналогічне значення кінематичної в'язкості для дизельного біопалива може бути досягнуто при температурі близькій до 100 °С. Для прогнозування зміни показників кінематичної в'язкості палив при температурі більшій за 100 °С, 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.

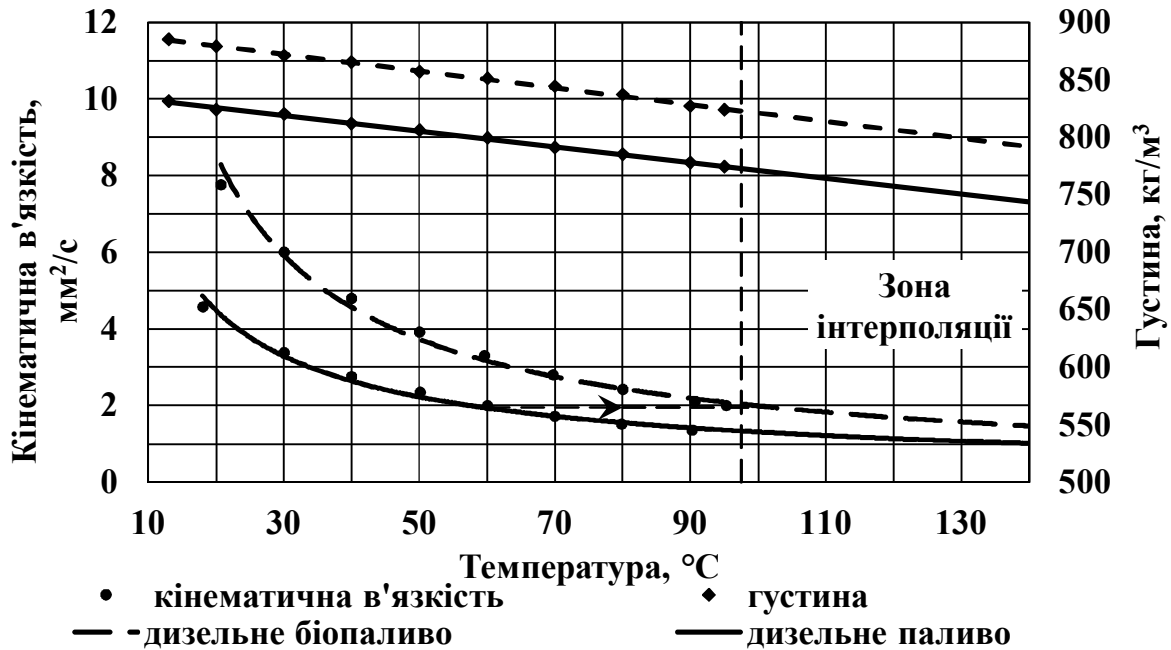


Рис. 2.24. Залежність кінематичної в'язкості та густини палива від температури

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 °C для чистого дизельного біопалива та 5 °C для його сумішей з дизельним паливом. При підвищенні температури від 20 до 95 °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 30–40 °C вищій.

2.9. 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. 2.25).

Проведені експериментальні дослідження показали, що кут розпилення факела палива при підвищенні температури палива з 10 до 100 °C збільшився від 21° до майже 30°, тобто на 40 %, проте не досяг значення кута розпилення для дизельного палива при 15 °C. 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.

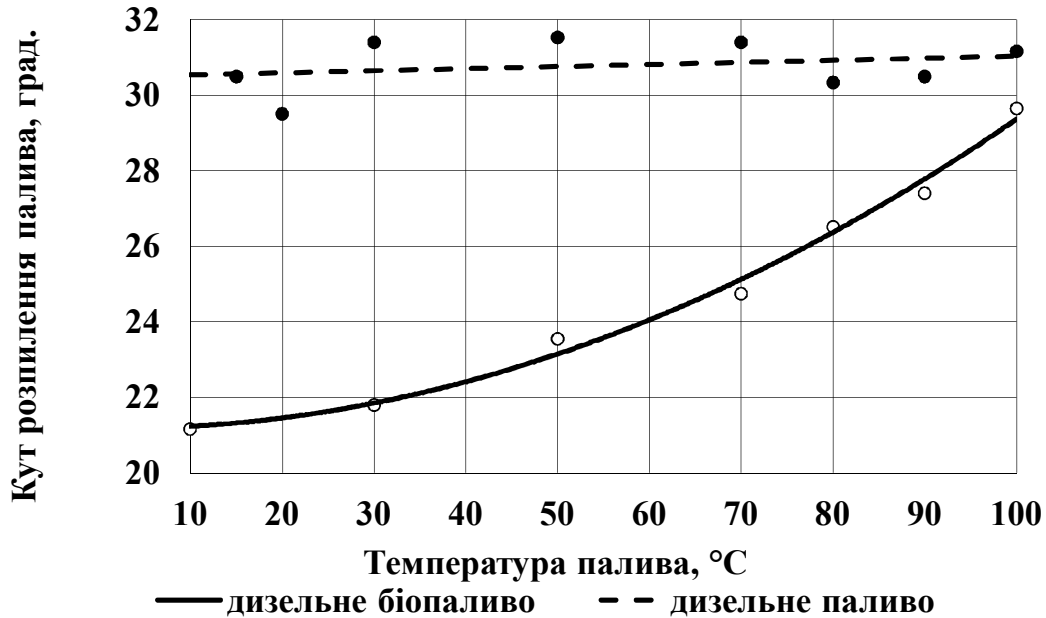


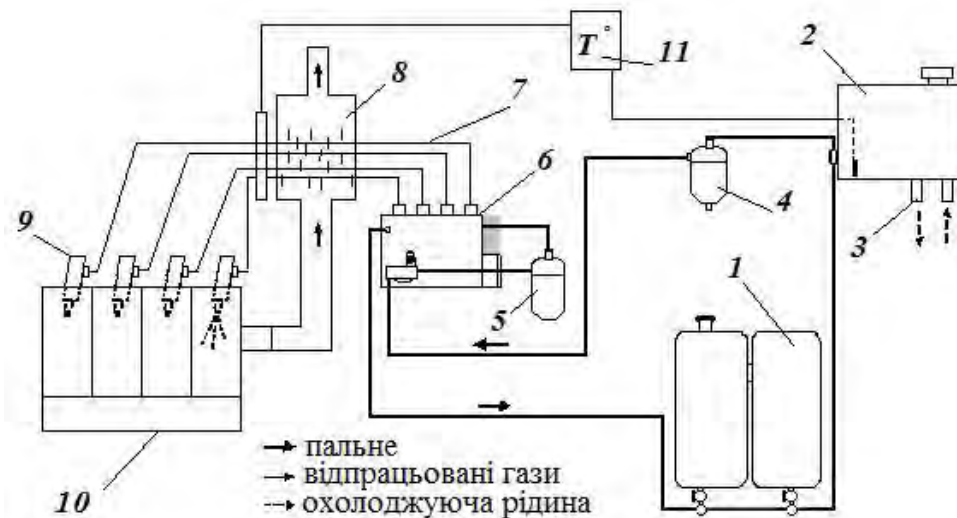
Рис. 2.25. Зміна кута розпилення факела від температури палива

Враховуючи те, що температура підігріву дизельного біопалива обмежена температурним режимом роботи паливного насоса високого тиску, для підвищення ефективності застосування дизельного біопалива була розроблена система двоступеневого його підігріву (рис. 2.26).

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 послідуєчого 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, фільтра тонкого очищення 5 і далі 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 перепускную 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.



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

Рис. 2.26 Система двоступеневого підігріву дизельного біопалива

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. У подальшому, 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 та Кий-14102 (рис. 2.27) та використовувалася при проведенні стендових та польових досліджень.

Система двоступеневого 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. 2.28).

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. 2.27. Трактори ПМЗ-6 АКЛ та Кий-14102 обладнані системою двоступеневого підігріву палива

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 далекобійності 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.

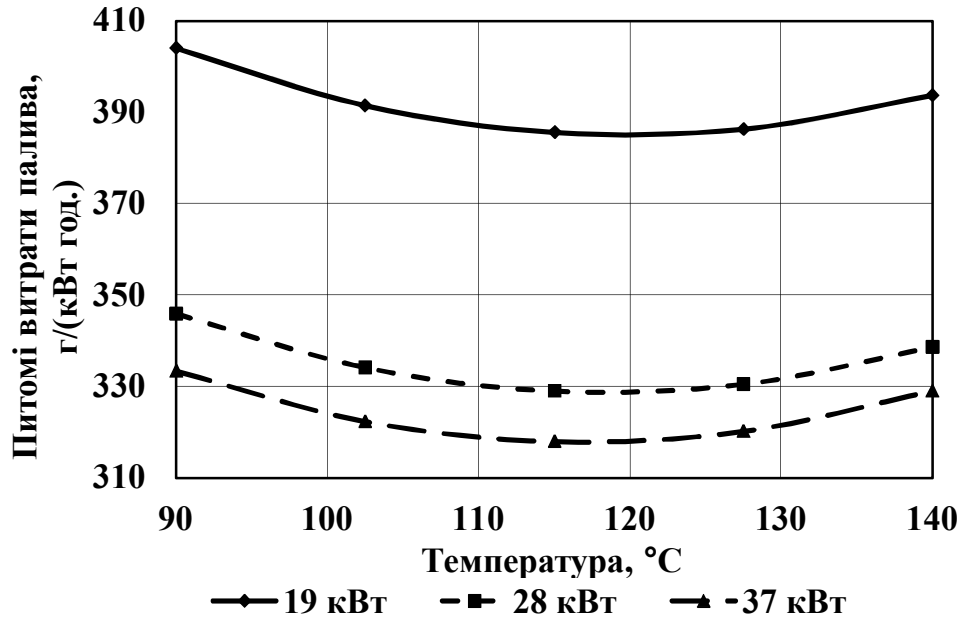


Рис. 2.28. Залежність питомої витрати дизельного біопалива від температури нагріву та навантаження двигуна

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. 2.29), а також отримано значення показників викидів чадного газу (CO) (рис. 2.30), вуглеводневих сполук (C_nH_m) (рис. 2.31), оксидів азоту (NO_x) (рис. 2.32) 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.

Аналіз отриманих експлуатаційних характеристик показує (рис. 2.29), 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.

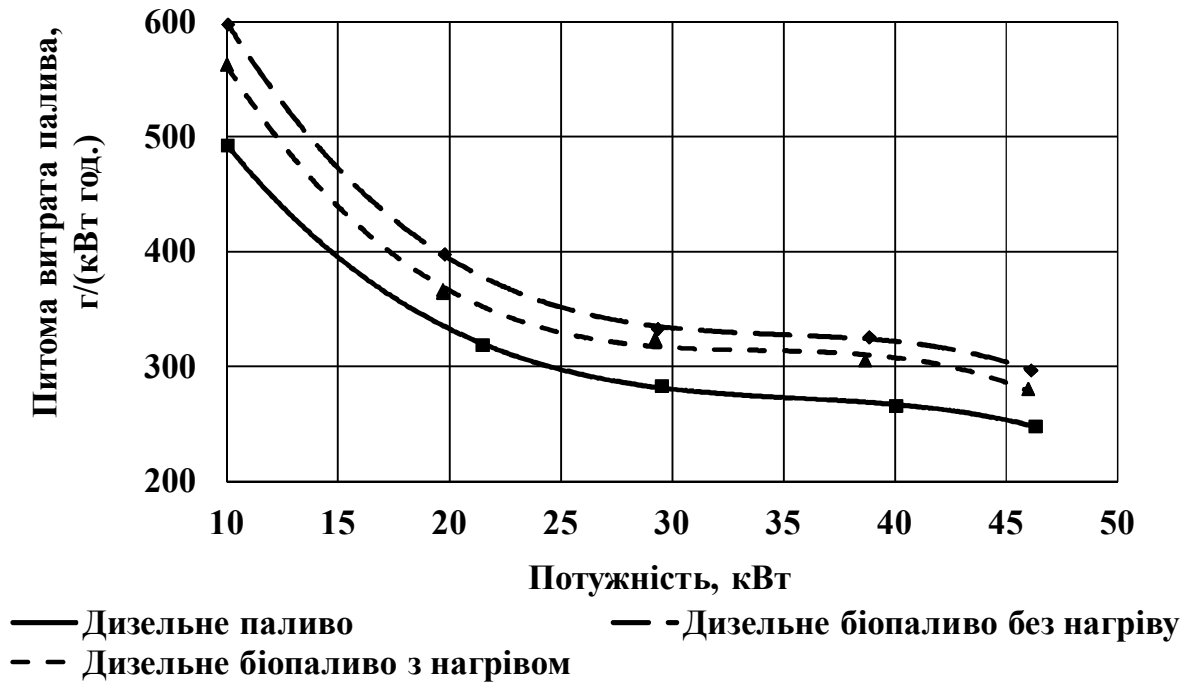


Рис. 2.29. Зміна питомої витрати палива від навантаження двигуна

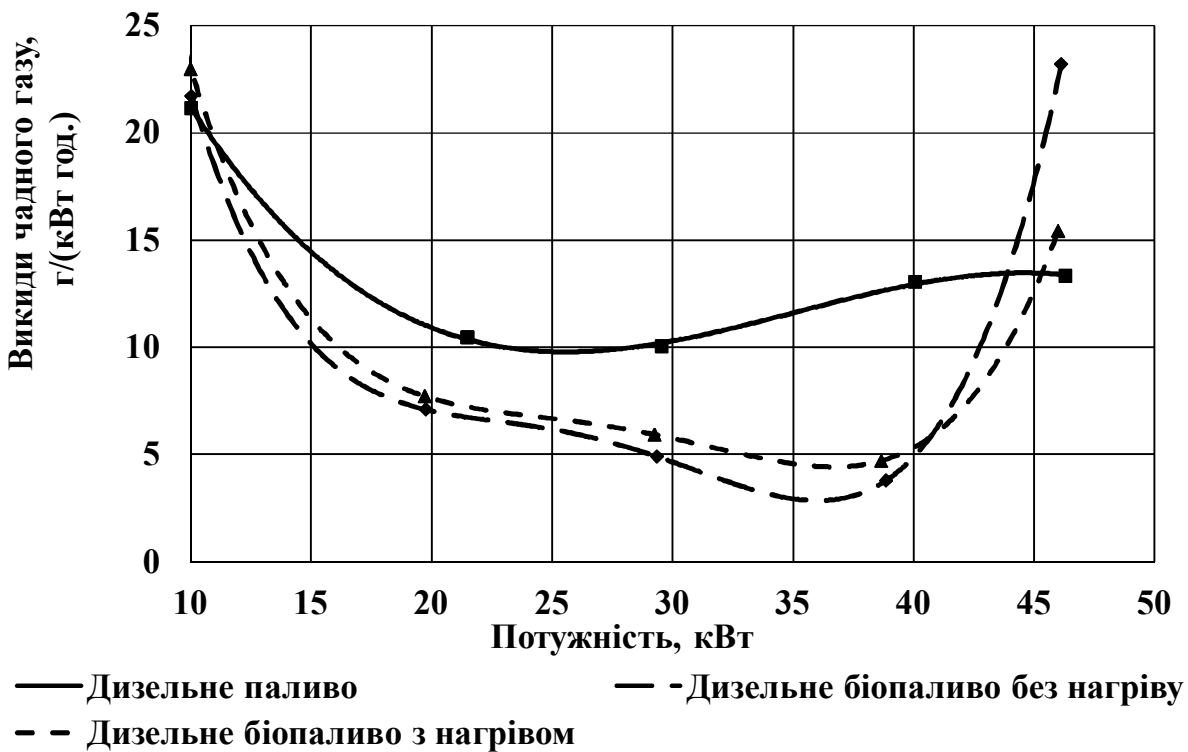


Рис. 2.30. Зміна питомих викидів чадного газу від навантаження двигуна

У дизельних двигунах CO 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. 2.30) показує, що при завантаженні 10 кВт питомі викиди CO 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 CO 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 CO 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 нагріву 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. 2.31) 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.

Аналіз отриманих експериментальних залежностей (рис. 2.32) показує, що питомі 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.

Різке 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 розпилу 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.

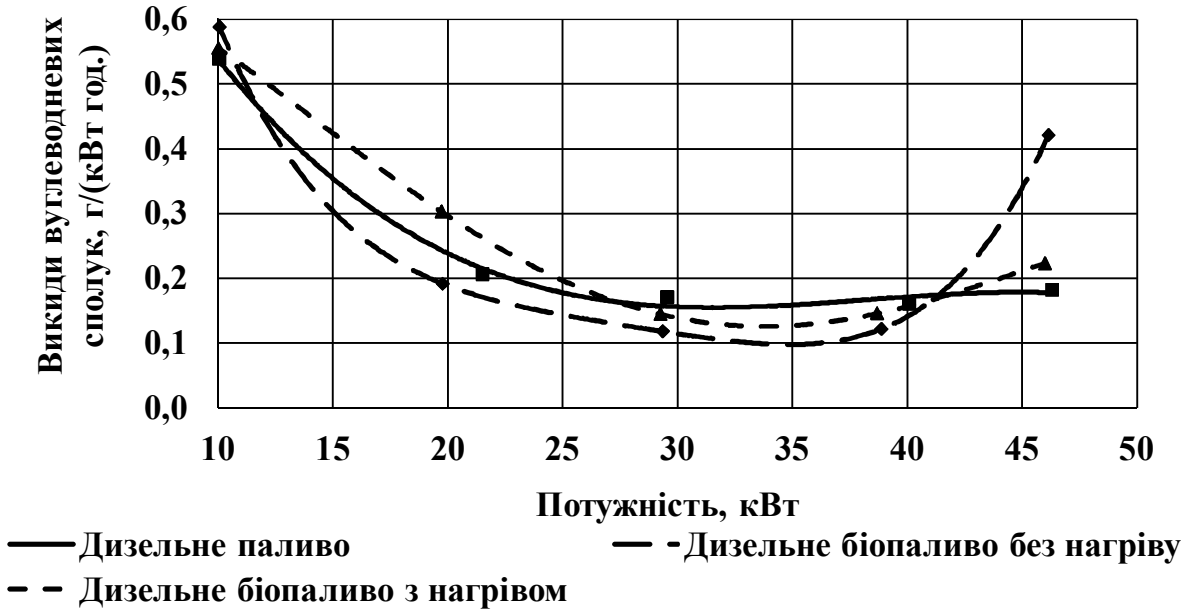


Рис. 2.31. Зміна питомих викидів вуглеводневих сполук від навантаження двигуна

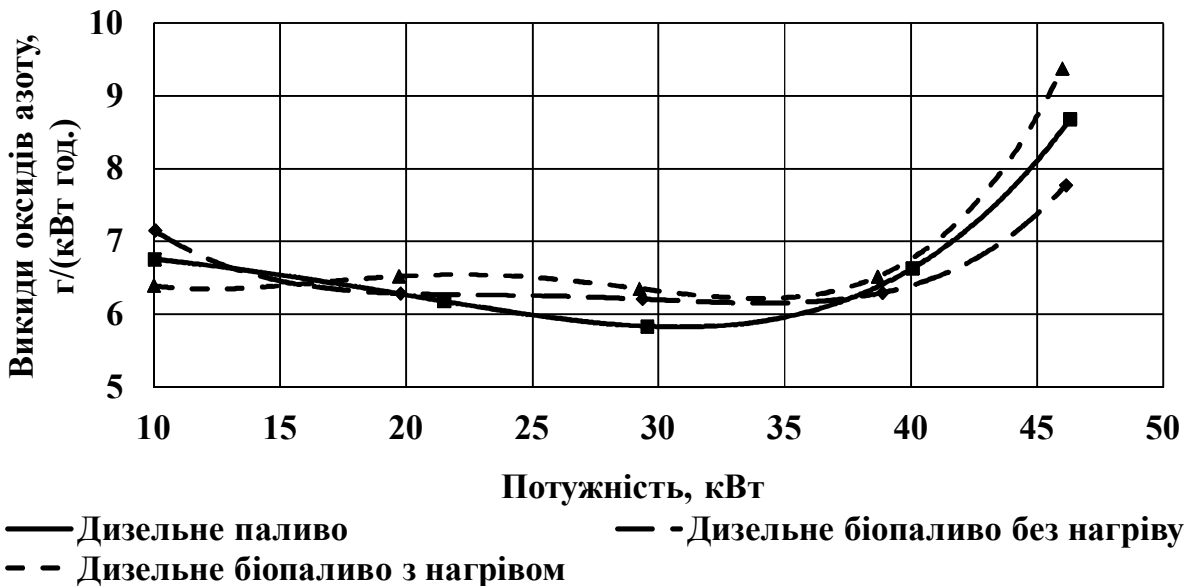


Рис. 2.32. Зміна питомих викидів оксидів азоту від навантаження двигуна

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 °С 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 шкідливих викидів. Слід відмітити зменшення 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.

2.10. 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. 2.7) 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. 2.33) 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 °С.

Таблиця 2.7. Експлуатаційні витрати палива МТА на 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. 2.33. Трактор Кий-14102 обладнаний системою двоступеневого підігріву дизельного біопалива при виконанні польових випробувань

Аналіз отриманих результатів (табл. 2.8) 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 2.8. 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.

2.11. Організаційні аспекти використання дизельного біопалива

Дизельне біопаливо досить агресивно поводитьсь 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 експлуатації МТА при 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 дизельного 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.

2.12. 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 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:

$$E = C_{ДП} (Q_{ДП} - Q_{ДП}^Д) - Q_{ДБП} \left(C_{ДБП} + \frac{(1 - k_{ЗРО})}{k_{ЗРО} T_{МО}} Q_{МО} C_{МО} \right), \quad (2.13)$$

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 двоступеневого 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:

$$Q_{ДБП} = k_{ЗВ} (Q_{ДП} - Q_{ДП}^D), \quad (2.14)$$

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:

$$Q_{ДП}^3 = k_{ЗП} (V_{ФГО} + V_{ФТО} + V_{П} + V_{ПН}), \quad (2.15)$$

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:

$$Q_{ДП}^H = t_H G_{Год}, \quad (2.16)$$

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:

$$Q_{ДП}^Д = \frac{Q_{ДП}}{Q_{ЗМ}} \left[k_{КР} k_{ЗП} (V_{ФГО} + V_{ФТО} + V_{П} + V_{ПН}) + (1 - k_{КР}) t_{Н} G_{ГОД} \right], \quad (2.17)$$

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.

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.
28. Що являє собою дизельне біопаливо?
29. Яка головна технічна проблема широкого впровадження дизельного біопалива?
30. У чому головна відмінність дизельного біопалива від біодизельного?
31. У чому головні переваги дизельного біопалива порівняно з дизельним паливом?
32. Які основні недоліки дизельного біопалива, котрі важко усунути тим чи іншим способом у процесі виробництва?
33. У чому полягають основні відмінності дизельного палива виробленого із різних рослинних олій?
34. Як змінюється при застосуванні дизельного біопалива та його сумішей з дизельним паливом потужність і крутний момент, який розвиває двигун?
35. Як змінюється при застосуванні дизельного біопалива та його сумішей з дизельним паливом питома і годинна витрата палива?
36. 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?
37. За рахунок чого підвищення температури дизельного біопалива перед впорскуванням покращує його згорання?
38. Опишіть систему двохступеневого підігріву дизельного біопалива.
39. При якій температурі нагріву дизельного біопалива досягається його мінімальна витрата?
40. Охарактеризуйте залежність питомої витрати палива від навантаження двигуна при використанні дизельного палива, дизельного біопалива без та із застосуванням нагріву палива.

41. Охарактеризуйте залежність питомих викидів чадного газу від навантаження двигуна при використанні дизельного палива, дизельного біопалива без та із застосуванням нагріву палива.

42. Охарактеризуйте залежність питомих викидів вуглеводневих сполук від навантаження двигуна при використанні дизельного палива, дизельного біопалива без та із застосуванням нагріву палива.

43. Охарактеризуйте залежність питомих викидів оксидів азоту від навантаження двигуна при використанні дизельного палива, дизельного біопалива без та із застосуванням нагріву палива.

44. Як впливає використання системи двохступеневого підігріву дизельного біопалива на перевитрату дизельного біопалива у порівнянні з дизельним паливом нафтового походження?

45. Яких основних правил доцільно дотримуватися при використанні дизельного біопалива?

46. Які основні профілактичні роботи необхідно виконати перед початком експлуатації двигуна на дизельному біопаливі?

47. За рахунок чого досягається економічна ефективність застосування дизельного біопалива?

48. Як визначається витрата палива при роботі дизельного двигуна за допомогою обкатувально-гальмівного стенду?

Література:

1. 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.

2. Голуб Г. Ефективність производства дизельного биотоплива в условиях фермерських хозяйств / Геннадий Голуб, Максим Павленко, Светлана Осауленко // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. – Lublin, 2014. –Vol. 16. № 4. – С. 263-268.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. Голуб Г.А. Особливості установок для виробництва дизельного біопалива / Г.А. Голуб, В.В. Чуба, М.І. Вірьовка // Промислова гідравліка і пневматика (Всеукраїнський науково-технічний журнал). – 2011. – № 2 (32). – С. 91-95.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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, Puszczykowo, Poland: 2013. – P. 49-53.

17. 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.

18. 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.

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

20. Голуб Г. Дослідження нагріву дизельного біопалива перед впорскуванням до циліндрів двигуна / Г. Голуб, В. Чуба.// Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: збірник наукових праць – Дослідницьке, 2015. – Вип. 19 (33). – 502 с. – С. 271-275.

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

22. Голуб Г.А. Експлуатаційні параметри роботи двигуна при застосуванні дизельного біопалива /Голуб Г.А., Чуба В.В.// Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК – К.: 2014. – Вип. 196, ч. 1. – 448 с. – С. 23-31.

23. Голуб Г. Моделирование эксплуатационных показателей работы МТА на дизельном биотопливе /Г. Голуб, В. Чуба// 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. – Р. 66-73.

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

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

26. Голуб Г. Экологические показатели работы двигателя Д-65Н на дизельном биотопливе /В. Чуба, Г. Голуб.// 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. – Р. 172-179.

27. Голуб Г.А. Експлуатаційні параметри МТА при роботі на дизельному біопаливі /Голуб Г.А., Чуба В.В.// 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.

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

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

30. 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.

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

32. Семенов В.Г. Визначення нижчої теплоти згоряння 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.

33. 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

34. Чуба В.В. Вплив підігріву дизельного біопалива на параметри впорску палива /Чуба В.В., Голуб Г.А.// 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.

35. 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.

36. 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.

37. 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

38. Взаємозв'язок потужності насоса для перемішування рослинної олії та параметрів дискового змішувача / Г. А. Голуб, М. Ю. Павленко, В. В. Чуба [та ін.] // Наук. вісн. НУБіП України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2015. – Вип. 240. – С. 343–348.

39. Голуб Г.А. Перспективи використання обладнання з циркуляційним перемішуванням при виробництві дизельного біопалива / Г. А. Голуб, С. М. Кухарець, М. Ю. Павленко // Наук. вісн. НУБіП України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2015. – Вип. 240. – С. 377–382.

3. ВИРОБНИЦТВО ТА ВИКОРИСТАННЯ БІОЕТАНОЛУ

3.1. Загальні відомості про біоетанол

Світове виробництво біоетанолу як альтернативного палива для транспорту зросло із 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. літрів 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. літрів 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 сумарна частка у світовому виробництві до 2020 р. складатиме від 55 до 65%.

Просторова будова атому біоетанолу (хімічна формула C_2H_5OH) приведена на рис. 3.1

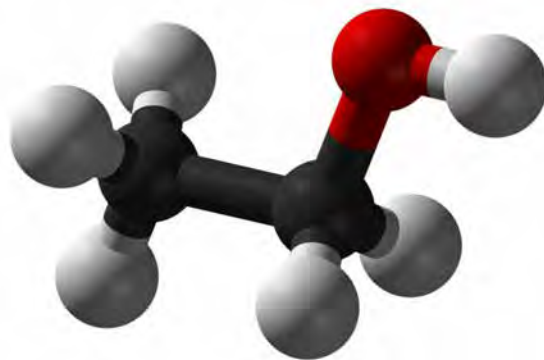


Рис. 3.1. Просторова будова атому біоетанолу (білий колір – водень, червоний колір – кисень, чорний колір вуглець)

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 із 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 із не відновлюваної вуглеводневої сировини. Спалювання такого етанолу призводить до зростання концентрації вуглекислого газу в атмосфері так само, як і спалювання природного газу та продуктів переробки нафти. При спалюванні ж біоетанолу вуглекислий газ, що вивільняється в атмосферу розглядається таким, що не викликає глобальне потепління, оскільки він зовсім недавно був засвоєний рослинами із атмосфери під час фотосинтезу. Термін "біоетанол" поширився в той час, коли виникла загальна занепокоєність наслідками антропогенної зміни клімату планети.



Рис. 3.2. Заправка автомобіля біоетанолом E85 та вигляд пляшки денатурованого етанолу

Таким чином, біоетанол – це безводний високооктановий етиловий спирт (октанове число становить 105), отриманий у 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 показників наведених у таблиці 3.1.

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 3.1. 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±0,1) ⁰ С, кг/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, мг/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 із повітрям у 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 із іскровим запалюванням. Потім до процесу часткової заміни нафтового автомобільного палива біоетанолом стали підключатися США і Канада, країни Європи. На сьогоднішній день виробництво біоетанолу суттєво поширилось та стало одним із важливих напрямків розвитку світової економіки. Збільшення виробництва біоетанолу спричинило розширення посівів поновлюваної сировини – цукрової тростини, кукурудзи, інших зернових культур. Почалося виробництво багатопаливних двигунів із іскровим запалюванням, пристосованих до споживання палив із вмістом біоетанолу до 95%.

3.2. Сировинна база та основи процесу виробництва біоетанолу

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

Картопля найбільш повно відповідає технологічним вимогам спиртового виробництва, так як швидко розварюється, утворює однорідне 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. 3.2.

Таблиця 3.2. Усереднений хімічний склад основних зернових культур (у % 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 виробництва цукру, 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 лущиння, бавовникове лущиння тощо. Тобто, ті матеріали, які містять в значній кількості поліцукри, перш за все целюлозу.

У таблиці 3.3 наведений орієнтовний питомий вихід біоетанолу із біосировини, а на рисунку 3.3 – середній вихід біоетанолу із розрахунку на один гектар.

Таблиця 3.3. Орієнтовна урожайність сільськогосподарських культур та можливий вихід біоетанолу

Культура (біосировина)	Урожайність, ц/га	Вихід біоетанолу, л/т
Цукровий буряк	300...600	50...100
Топінамбур	300...400	82...87
Цикорій	250...350	50...92
Картопля	130...320	93...117
Кукурудза (зерно)	60...75	210...416
Пшениця	45...60	185...395
Ячмінь	45...60	180...370
Жито	25...40	170...340
Меляса		270...300
Деревина		160...200

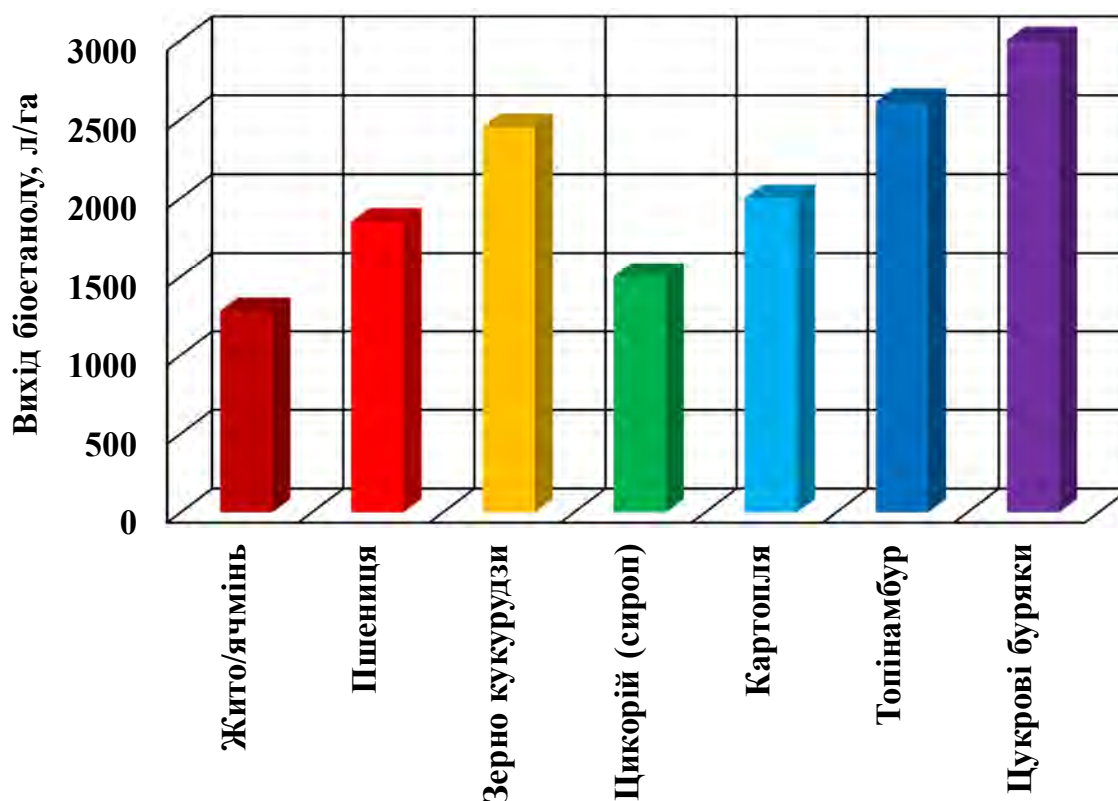
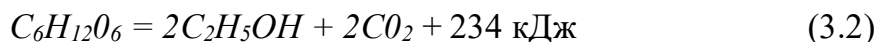


Рис. 3.3. Середній вихід біоетанолу із різних видів сільськогосподарських культур (джерело uk.wikipedia.org)

При виробництві біоетанолу спочатку необхідно рівномірно подрібнити сировину. Наступні етапи технологічного процесу – суспендування і оцукрювання, в результаті яких полісахариди крохмалю гідролізуються у придатні для зброджування дріжджами моноцукри за виразом:



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.

3.3. Основи біотехнологічного процесу отримання біоетанолу

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 надходять 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 за 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 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. Оцукрювання 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.

Оцукрювання (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.

Зброджування сусла. У бродильних апаратах цукор сусла зброджують дріжджами у спирт. Сусло, що бродить називають бражкою, а зброжене сусло – зрілою бражкою. При періодичному способі зброджування 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 1-1,5 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 зустрічному потоці рідини і пари. У 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. 3.4).

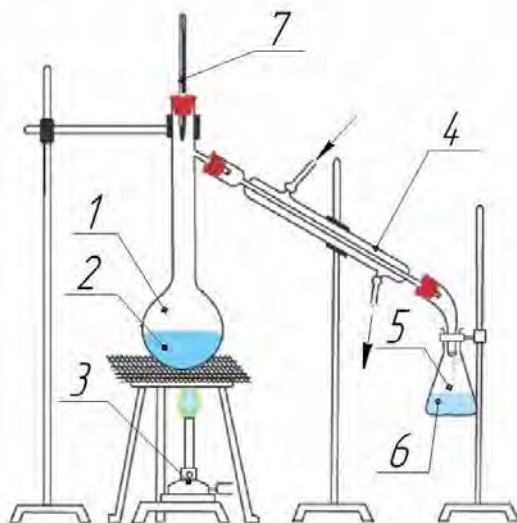


Рис. 3.4. Найпростіший дистилятор (пояснення в тексті)

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 патрубків 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. 3.5.

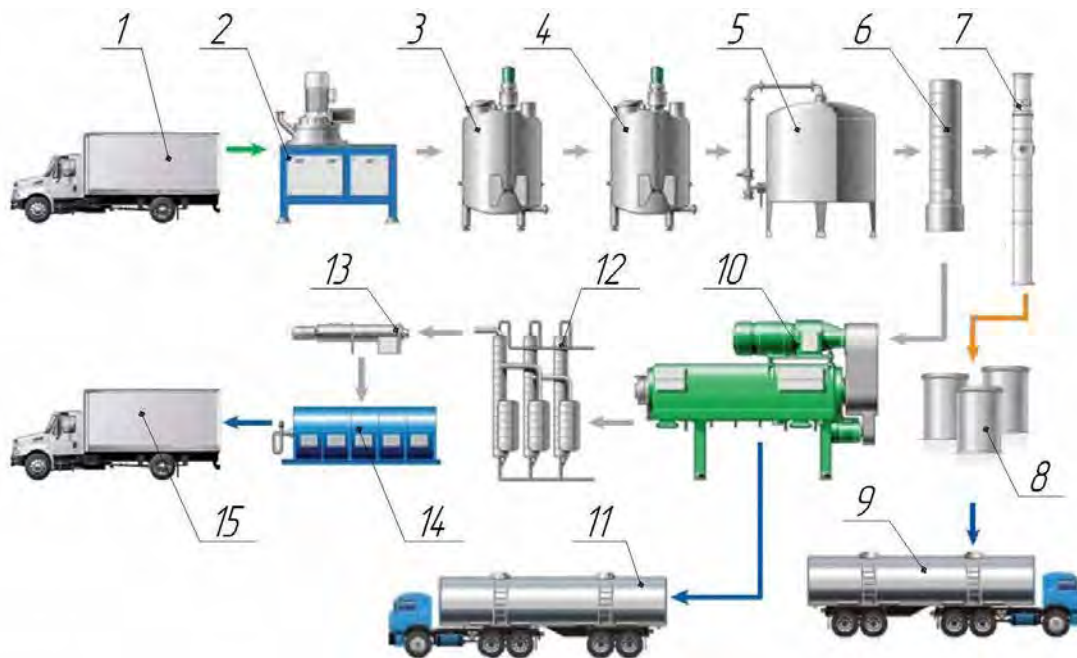
Зневоднення і денатурація. Порівняно з питним спиртом, технологічний процес отримання біоетанолу не вимагає високого очищення від супутніх домішок але доповнюється стадіями зневоднення (спирт міцністю 96%, проходить систему молекулярних сит, де позбавляється від залишкової кількості води і стає абсолютним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

3.4. Технологічні схеми виробництва біоетанолу

Один із варіантів технологічної схеми виробництва біоетанолу представлений на рис. 3.6. 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.



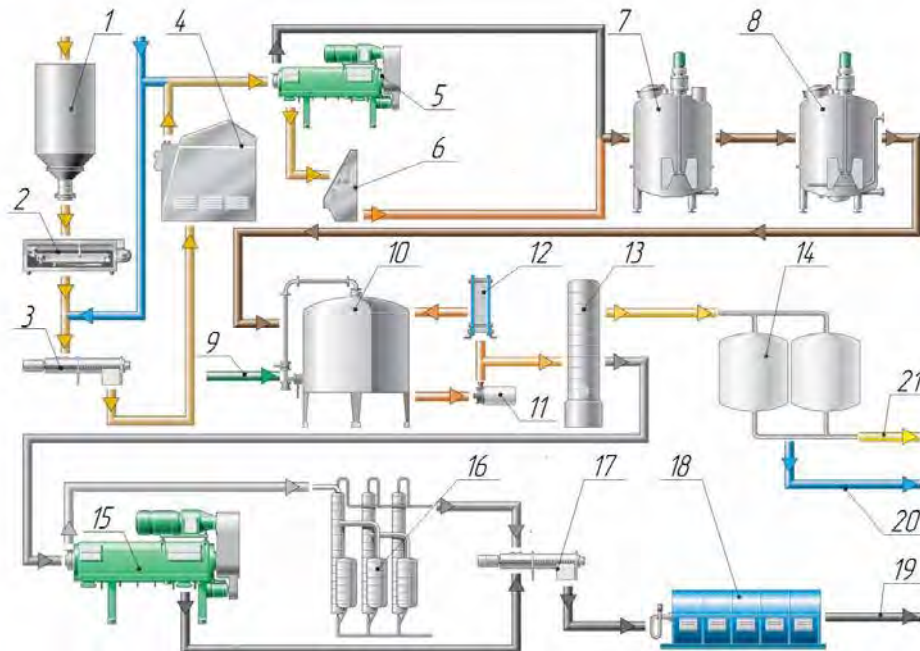
1 – постачання сировини, 2 – подрібнення, 3 – приготування замісу, 4 – оцукрювання, 5 – зброджування, 6 – дистиляція, 7 – ректифікація, 8 – зберігання біоетанолу, 9 – транспортування біоетанолу, 10 – розділення барди, 11 – транспортування рідкої барди, 12 – випаровування вологи, 13 – гомогенізація, 14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

Рис. 3.5. Спрощена схема виробництва біоетанолу (джерело <http://rupec.ru/analytics/30699/>)

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 паром 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 якого перетворюється у придатну для зброджування глюкозу.

Наступна стадія – ферментація чи зброджування. На цьому етапі частина оцукреного сусла подається в дріжджогенератор. Інша частина оцукреного сусла 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 та вмісту поживних речовин підтримує необхідну швидкість зброджування. В процесі бродіння цукри сусла зброджуються до

етанолу і вуглекислого газу. Отримана в результаті бродіння так звана культуральна рідина містить до 10% етанолу.



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

Рис. 3.6. Технологічна схема виробництва спирту із зерно-картопляної сировини (джерело <http://hiller-us.com/ethanol.php>)

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. У ній із продукту бродіння (культуральної рідини) відганяється суміш етанолу і води. Подальше очищення відбувається в ректифікаційній колоні, де спирт максимально звільняється від води.

Останнім етапом при виробництві 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.

3.5. 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.

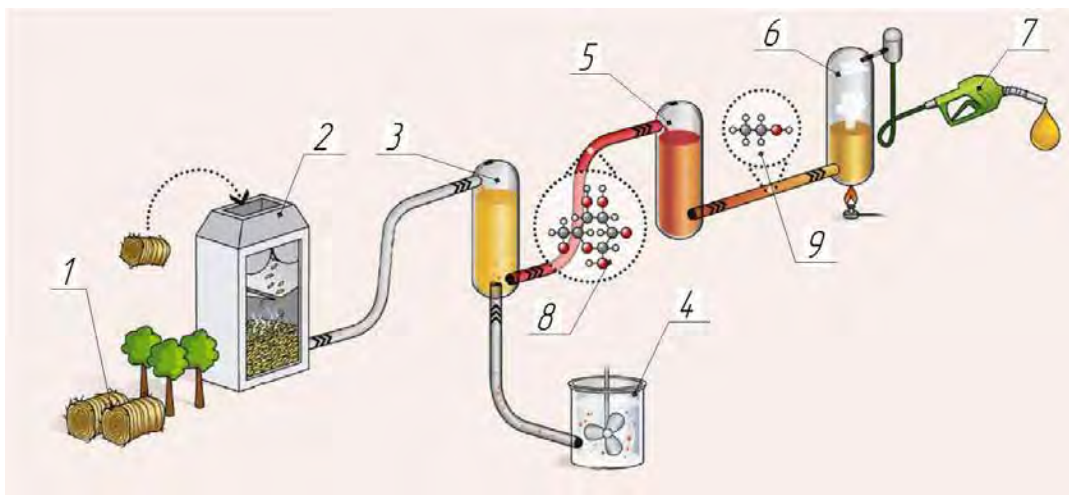
Деревина – це продукт біологічного, а саме рослинного походження. Як будь-який біологічний організм, деревина складається з клітин. Клітинні стінки приблизно на 99% складаються з органічних сполук. Мінеральні речовини становлять зазвичай не більше 1%.

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 із нього спирт; дріжджі направляють знову в бродильний чан. На заключному етапі спирт 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 целюлаз 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. 3.7). Тут гідроліз відбувається під дією ензимів (наприклад *Trichoderma viride*). Попередня обробка включає в себе усування лігнінової оболонки за допомогою спеціального обробітку із застосуванням розчинника кадоксену (розчин із 5-7% вмістом оксиду кадмію та 28% етилендіаміну) та обробку рідким аміаком під високим тиском, котрий руйнує волокна в 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. 3.7. Спрощена схема ензиматичного методу виробництва біоетанолу (джерело <http://www.ifpenergiesnouvelles.com/Research-themes/New-energies/Producing-fuels-from-biomass/Biocatalysts-one-of-IFPEN-s-expertise-field-Questions-to-Frederic-Monot-Head-of-the-Biotechnology-Department-at-IFPEN>)

Щоб розширити можливості застосування деревини для отримання біоетанолу інтенсивно розроблюються різні технології деструкції лігноцелюлози: механічні (розмельювання), 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 із морських водоростей. У таких процесах модифіковані бактерії безпосередньо конвертують бурі водорості в етанол за рахунок перетворення полісахариду - альгінової кислоти (альгінату), який у великій кількості міститься у водоростях.

3.6. Технічна реалізація виробництва біоетанолу

Технічне забезпечення виробництва біоетанолу подібне до забезпечення виробництва етанолу (рис. 3.8). 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. 3.8. Завод із виробництва біоетанолу

Ректифікаційна (дистиляційна) колона (рис. 3.9) – технологічний апарат, призначений для розділення рідких сумішей, складові яких мають різну температуру кипіння. Класична колона являє собою вертикальний циліндр із контактними пристроями всередині. У ректифікаційну колону подаються пари рідин, що переганяються. Пари піднімаються у верхню частину колони, охолоджуються, конденсуються в холодильнику і подаються назад на верхню тарілку колони. Стікаючи вниз по тарілках, рідина збагачується важкокиплячими компонентами, а пари, чим вище піднімаються в колоні, тим більше збагачуються легкокиплячими компонентами. Таким чином, з верхньої частини колони відводиться продукт збагачений легкокиплячими компонентами – дистилят (біоетанол).

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. 3.9. Загальний вигляд ректифікаційної колони та багатоклонного дистилятора

Промислові ректифікаційні колони можуть досягати 60 метрів у висоту і 6 метрів у діаметрі. У ректифікаційних колонах у якості контактних пристроїв застосовуються тарілки і насадки. Насадки, що заповнюють колону, можуть бути із металу, кераміки, скла та інших матеріалів. Конденсація здійснюється на поверхні цих елементів.

Важливим елементом виробництва біоетанолу є його зневоднення для уникнення розшарування при змішуванні з бензином. Для зневоднення можливе використання молекулярних сит (адсорбентів) – це найсучасніша низькоенергетична технологія зневоднювання. У цій технології перегріта суміш парів етанолу і води проходить через шар цеоліту, тобто пористого матеріалу із дуже точно витриманим розміром пор. Молекули етанолу трохи більші 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. Із одного боку мембрани створюється вакуум. Завдяки розходженню 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.

3.7. Основні властивості біоетанолу як моторного палива

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

Основні фізико-хімічні показники біоетанолу в якості моторного палива наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 Основні показники біоетанолу, який використовується в якості моторного палива у порівнянні з бензином

Показники	Од. виміру	Вид палива	
		бензин	біоетанол
Щільність при 20°C	кг/м ³	740	810
Нижча теплотворна здатність	МДж/кг	43,3-44	25-26,8
	МДж/л	32,5	20,25
Калорійність стехіометричної суміші	кДж/м ³	3439-3910	3850
Теплота пароутворення	кДж/кг	330	850
Температура кипіння	°C	30-205	78
Температура спалаху	°C	230-260	404
Стехіометрична потреба в повітрі у процесі згорання	кг. пов./кг пал.	14,9	9
Октанове число:			
– за моторним методом	–	82-84	94
– за дослідницьким методом	–	92-100	108
Цетанове число	-	3-14	8
Температура полум'я в повітрі	°C	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 більша 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 тетраетилсвинець, 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 CO_2 ;
- 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.

3.8. 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 із так званим "газоходом" – сумішшю біоетанолу з бензином (рис. 3.10). Крім Сполучених Штатів, біоетанол як пальне широко використовується в Бразилії, Угорщині, Австрії, Німеччині, Італії, Польщі, Чехії, Словаччині та інших країнах.

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 із 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 обсягу біоетанолу. 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 знизились 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.



Рис. 3.10. Паливна колонка в Іст-Лансінг, штат Мічиган для продажу сумішевого палива марок E10, E15, E30 і E85.

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 біоetanолу упродовж останніх 38 років. Із 1978 по 2004 роки Федеральний уряд запровадив для платників федерального акцизного збору на моторні палива податковий кредит на біоetanол, що домішується до бензину. Із 2005 до 2008 рр. він становив 51 цент за галон біоetanолу, 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 біоetanолу. Однак біоetanол 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 біоetanол, вироблений із зерна кукурудзи, не може отримувати податкового кредиту, але целюлозний біоetanол, вироблений зі стебла та качанів кукурудзи (без насіння) може підпадати під дану пільгу. Виробники стверджують, що у зв'язку із збільшенням обсягів виробництва біоetanолу 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.

У Європейському Союзі до 2005-го, за встановленими нормами, в бензин додавали 2% біоetanолу, 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 біоetanолу для неадаптованих транспортних засобів.

3.9. Перспективи використання біоetanолу в Україні

Виробництво біоetanолу в Україні як високооктанової кисневмісної добавки до бензинів було розпочато в 1999 році. Річна сумарна потужність спиртових заводів в Україні – 4,6 млн. т, 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 біоetanолу.

Упродовж останніх років виробництво біоetanолу 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 біоetanолу, 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. т в рік. Також є можливість отримати квоту на постачання біоетанолу в країни Євросоюзу в розмірі 100 тис. т 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 трактора ХТЗ-2511G (рис. 3.11). Замість стандартного дизельного двигуна на ньому був встановлений бензиновий мотор МеМЗ-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. 3.11. Багатопаливний трактор ХТЗ- 2511G

3.10. 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 E85 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 можуть 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. У 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. 3.12).

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

– вміст біоетанолу математично обчислюється 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).



Рис. 3.12. Маркування сучасних багатопаливних автомобілів, які приданні для використання біоетанолу

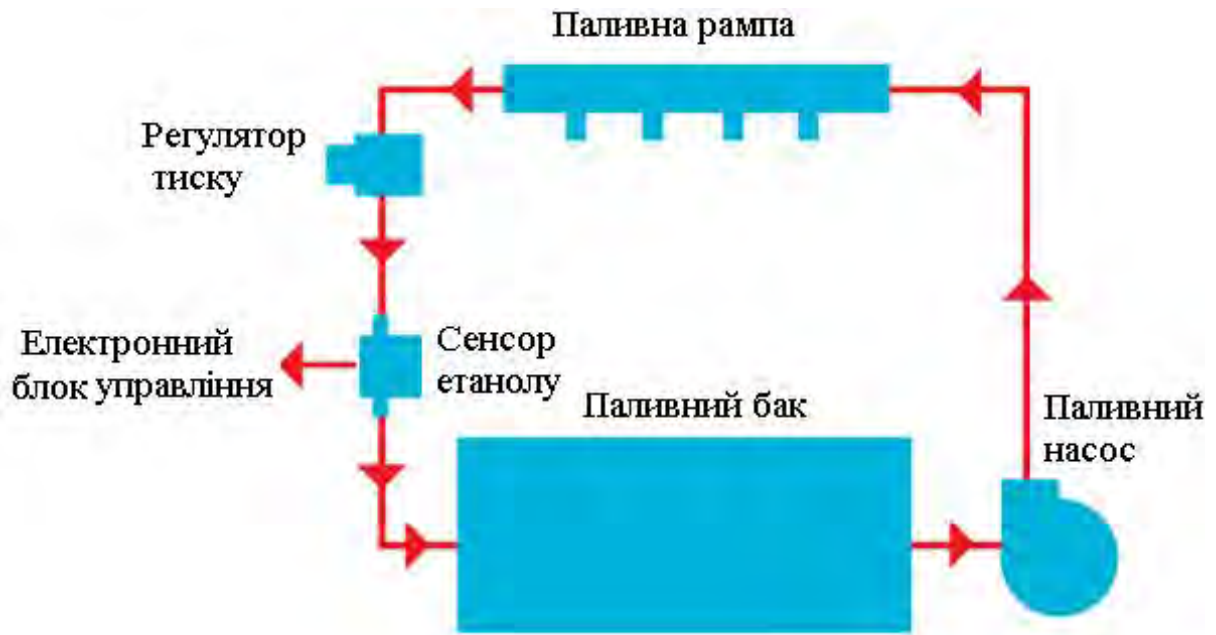


Рис. 3.13. Схема паливної системи FFV "flexible-fuel vehicle" із сенсором етанолу в паливній суміші

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 в 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.

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. 3.14 та 3.15).



Рис. 3.14. Автобус, що працює на паливі E95

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. 3.16). 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 іржостійку сталь та стійкий до біоетанолу пластик.

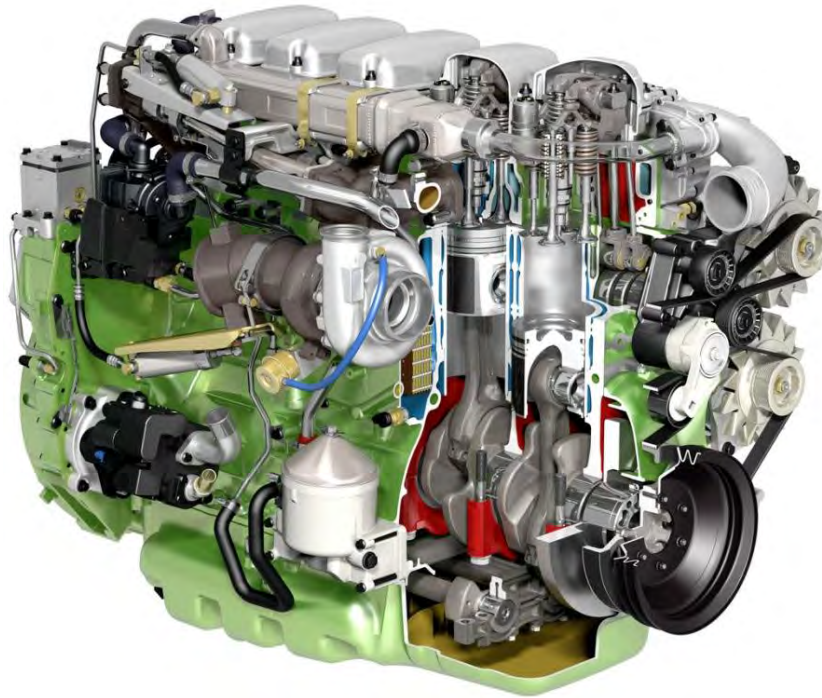


Рис. 3.15. Біоетанольний двигун Scania потужністю 270 к.с.



Рис. 3.16. Багатопаливний трактор фірми John Deere

Проте переваги використання біоетанолу незаперечні. Біоетанол 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.

3.11. 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 впорскування палива (рис. 3.17.). При використанні сумішей відбувається збільшення годинної витрати палива (рис. 3.18) та спостерігається покращення екологічних показників роботи двигуна (табл. 3.5)

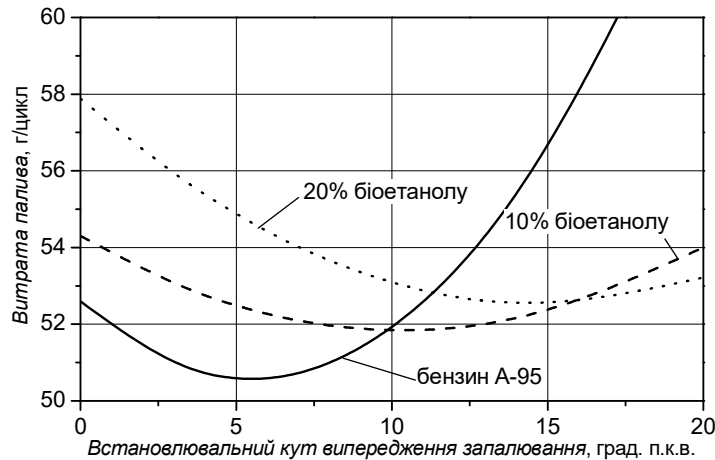


Рис. 3.17. Витрата палива автомобілем ЗАЗ-1102 залежно від кута випередження запалення при використанні бензину А-95 та його сумішей з додавання біоетанолу

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. 3.18) 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 згоряння бензину з додаванням біоетанолу та погіршенням процесу згоряння 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.

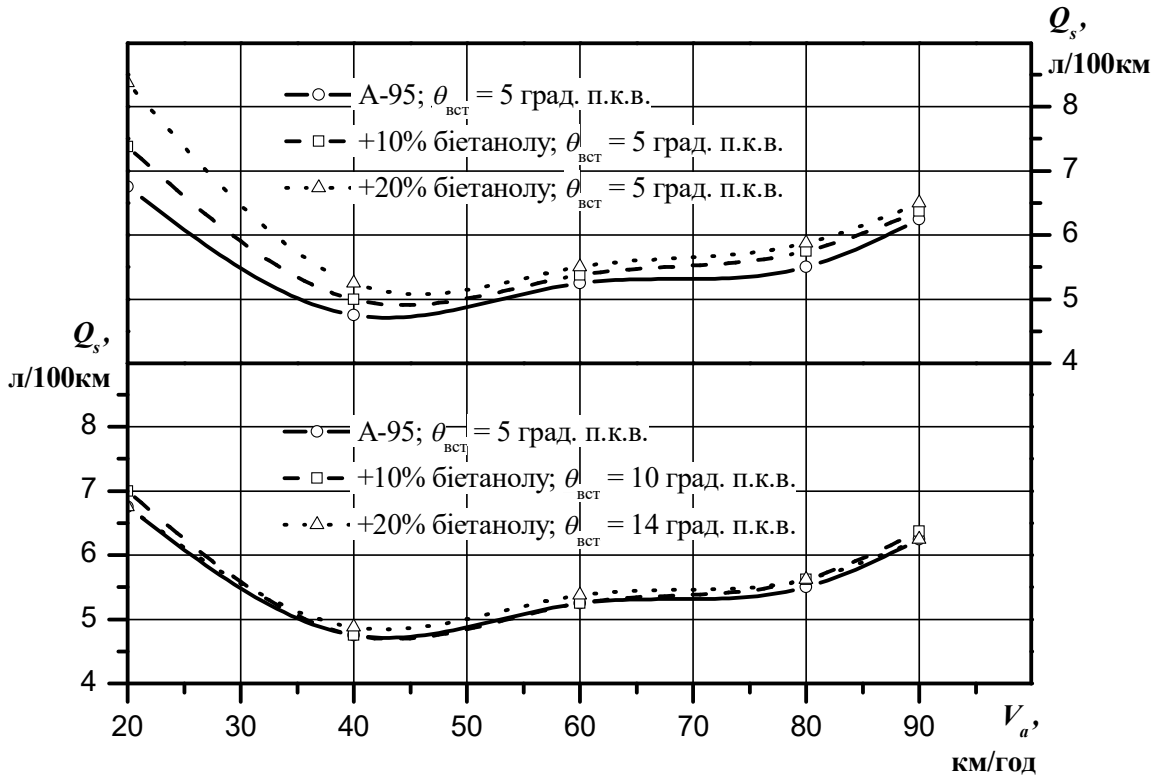


Рис. 3.18. Паливні характеристики усталеного руху автомобіля ЗАЗ-1102 при використанні бензину А-95 та його сумішей з додавання 10 % та 20 % біоетанолу

У табл. 3.5 наведено результати паливної економічності та екологічні показники автомобіля ЗАЗ-1102 "Таврія" при використанні бензинів з добавками біоетанолу. Екологічні показники оцінено за масовими викидами оксиду CO та діоксиду вуглецю CO_2 , вуглеводнів C_mH_n , оксидів азоту NO_x та сумарними масовими викидами, зведеними до CO . 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%.

Таблиця 3.5. Вплив величини ВКВЗ на витрату палива та екологічні показники автомобіля ЗАЗ-1102 "Таврія"

Паливо		А-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	CO	4,98	3,63	3,51	3,23	2,91
	C_mH_n	0,504	0,398	0,415	0,411	0,466
	NO_x	0,877	0,577	0,782	0,309	0,575
	CO_2	208,2	201,9	195,9	205,8	195,8
	зведені до CO	42,64	28,58	36,96	17,25	28,02

Масові викиди оксиду CO і діоксиду CO_2 вуглецю за оптимального ВКВЗ при живленні автомобіля бензином із 10% добавкою біоетанолу зменшились, відповідно, на 3,3 і 3% 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.

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 цюлюлозовмісної 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?
24. Про що свідчить аналіз фізико-хімічних властивостей біоетанолу?
25. Які основні переваги використання біоетанолу в якості моторного палива?
26. Які основні переваги використання біоетанолу в якості добавки до бензину?
27. Які основні недоліки використання біоетанолу в двигунах?
28. Чим обумовлені перспективи використання біоетанолу у світі?
29. У яких країнах біоетанол найбільш розповсюджений і чому?
30. Що Ви знаєте про використання біоетанолу в США?
31. Що Ви знаєте про використання біоетанолу в Бразилії?
32. Що Ви знаєте про використання біоетанолу в країнах Євросоюзу?
33. Які особливості багатопаливного двигуна системи FFV?
34. Чи є перспективи використання біоетанолу в Україні?
35. На яких сумішах бензину з біоетанолом можуть працювати звичайні двигуни внутрішнього згорання?
36. Що потрібно змінити порівняно з роботою на бензині при збільшенні вмісту біоетанолу в паливній суміші?
37. Розкрийте особливості використання біоетанолу в двигунах внутрішнього згорання?
38. Які види палива із вмістом біоетанолу Ви знаєте? Назвіть їх марки.
39. Які особливості двигунів, що використовують біоетанол?
40. Які способи подолання недоліків використання біоетанолу в двигунах?
41. Які переваги використання біоетанолу в двигунах?
42. Які є ризики при використанні біоетанолу в якості моторного палива?
43. При яких значеннях кута випередження запалення досягається мінімальна витрата бензину із 10% та 20% добавкою біоетанолу?
44. Яка перевитрата палива порівняно з штатним бензином при оптимальному значенні кута випередження запалення за умови живлення автомобіля бензином із 10% та 20% добавкою біоетанолу?
45. Наскільки сумарні масові викиди, зведені до CO, при живленні бензином з 10% та 20% добавкою біоетанолу менші порівняно з бензином?
46. Наскільки збільшується годинна та питома витрата палива при застосуванні суміші з вмістом 10% біоетанолу?

Література:

1. 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.
2. Карпов С.А. Автомобильные топлива с биоэтанолом / С.А. Карпов, В.М. Капустин, А.К. Старков – М.: Колос, 2007. – 216 с.
3. 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.
4. Міністерство сільського господарства США [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ers.usda.gov/media/521667/corndatatable.htm>.
5. 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.
6. 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.
7. Присяжнюк О.І. Аспекти використання біоетанолу як альтернативного джерела енергії / О.І. Присяжнюк, І.Л. Шевченко // Цукрові буряки. - №3, 2009. – С. 14-15.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Сергеева Н. Працюємо на перспективу. Аграрний тиждень. Україна. 17 липня 2015 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://a7d.com.ua/machines/21566-pracujuemo-na-perspektivu.html>.
12. Спиртовмісні палива /Є.В. Полункін, С.О. Зубенко, О.О. Гайдай, О.В. Кузнєцова // Вісник НАУ. – 2010. – №2. – С. 137-141.
13. 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.
14. Ткаченко Н.М. Шляхи подолання кризових явищ у цукровій промисловості / Н.М. Ткаченко, О.О. Ткаченко // Науковий журнал «Економіка АПК». – 2009. – № 8.
15. 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>.

16. Туркільян Т. «Укрспирт» врятує виробництво біоетанолу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ecotown.com.ua/news/Ukrspirt-vryatuye-vyrobnytstvo-bioetanolu/>.
17. Biofuels Annual report [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.usda-france.fr/media/Biofuels%20Annual_The%20Hague_EU-27_6-25-2012.pdf.
18. Bastos M.B. Brazil's Ethanol Program – An Insider's View /Milton Briquet Bastos // Energy Tribune. Retrieved 2008-08-14.
19. <https://uk.wikipedia.org/wiki/біоетанол>.
20. 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.
21. Бейли Дж. Основы биохимической инженерии /Дж. Бейли, Д. Оллис. – М.: Мир, 1989. – Т. I. – 692 с.; Т. II. – 590 с.
22. Голуб Г.А Інвестиційна привабливість виробництва і використання дизельного біопалива /Г.А. Голуб, С.В. Лук'янець// Економіка АПК. - 2013. - № 2. - С. 54-61.
23. Дебабов В.Г. Биотопливо / В.Г. Дебабов // Биотехнология. – 2008. – № 31. – С. 1–14.
24. Кириленко І.Г. Формування ринку українського біопалива: передумови, перспективи, стратегія /І.Г. Кириленко, В.В. Дем'янчук, Б.В. Андрущенко// Економіка АПК. – 2010 . – № 4. – С. 62.
25. 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.
26. Красінько В.О. Біоенергетика та охорона довкілля: конспект лекцій для студ. спец. 7.05140101 «Промислова біотехнологія» /В.О. Красінько. – К.:НУХТ, 2013. – 88 с.
27. Маринченко В.А. Спиртовые дрожжи в промышленном производстве спирта /В.А. Маринченко. – М.: Наука, 1999. – 230 с.
28. 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.
29. Нетрусов А.И. Микробиология / А.И. Нетрусов, И.Б. Котова. – М.: Академия, 2006. – 352 с.
30. Скорук О.П. Пріоритетні напрями виробництва біоетанолу в Україні /О.П. Скорук, І.В. Зубар// Економіка АПК. - 2014. - № 2. - С. 36-42.
31. 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.

4. ВИРОБНИЦТВО ТА ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗУ

4.1. 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 у переробці гною великої рогатої худоби (ВРХ) та свиней, питома вага яких в загальній кількості гною найбільша, в повноцінні органічні добрива з використанням технологій біогазового збродження і компостування.

У 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 збродження, 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 збродження. 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 збродження. Застосування рідкофазної 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 збродження 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 збродженні.

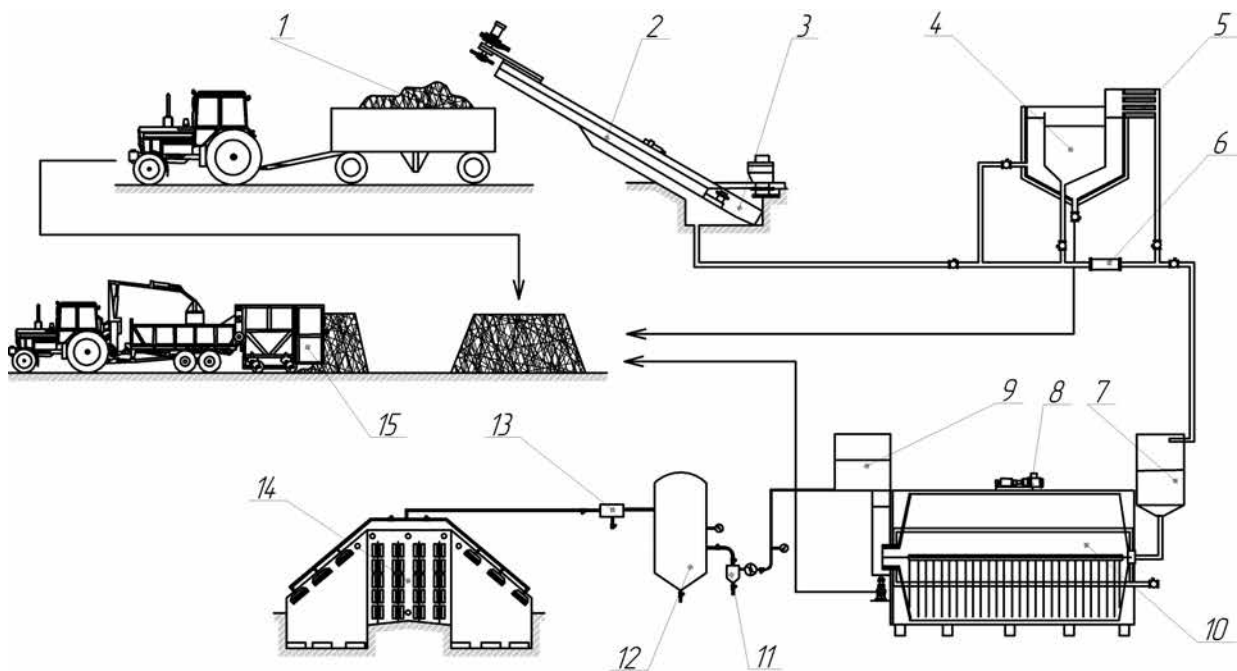
Система видалення гною із приміщень для тварин і добовий обсяг гною істотно позначаються на обсягах гноєсховищ, а отже, на капітальних витратах,

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 прийнятну в конкретному господарстві систему видалення гною із приміщень для тварин, добовий обсяг гною і його склад.

Нами запропоновано технологію (рис. 4.1), 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-витримувач; 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. 4.1. 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. 4.2).

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.

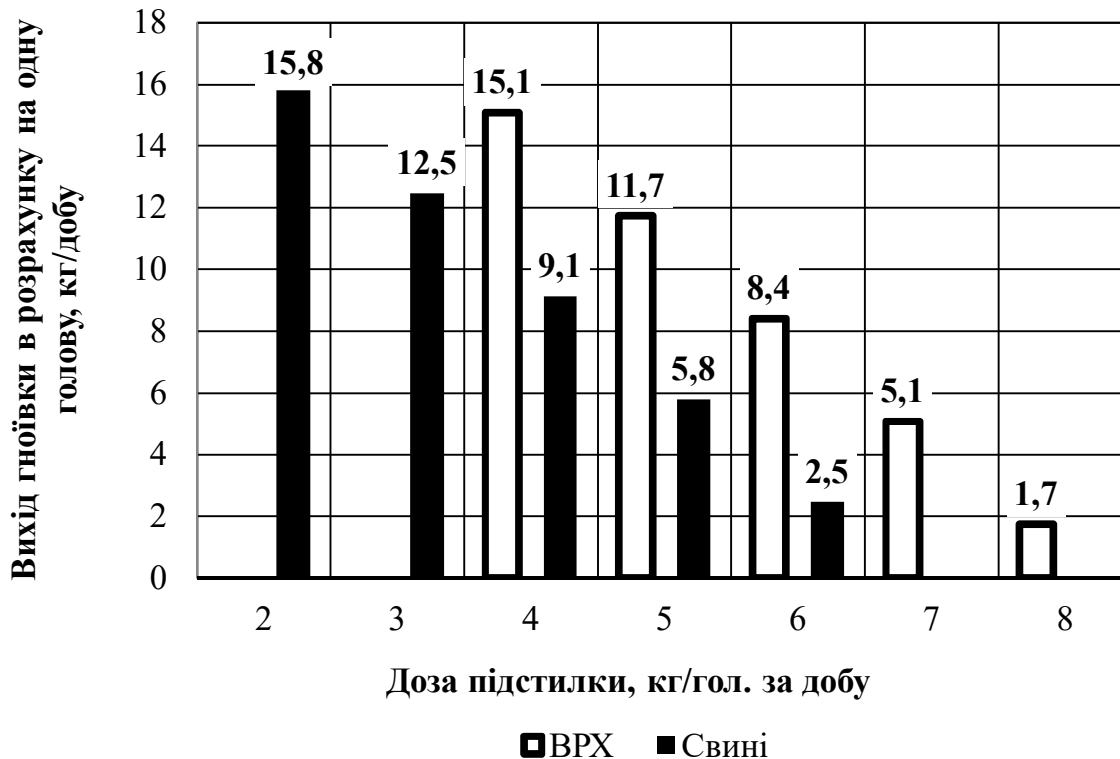
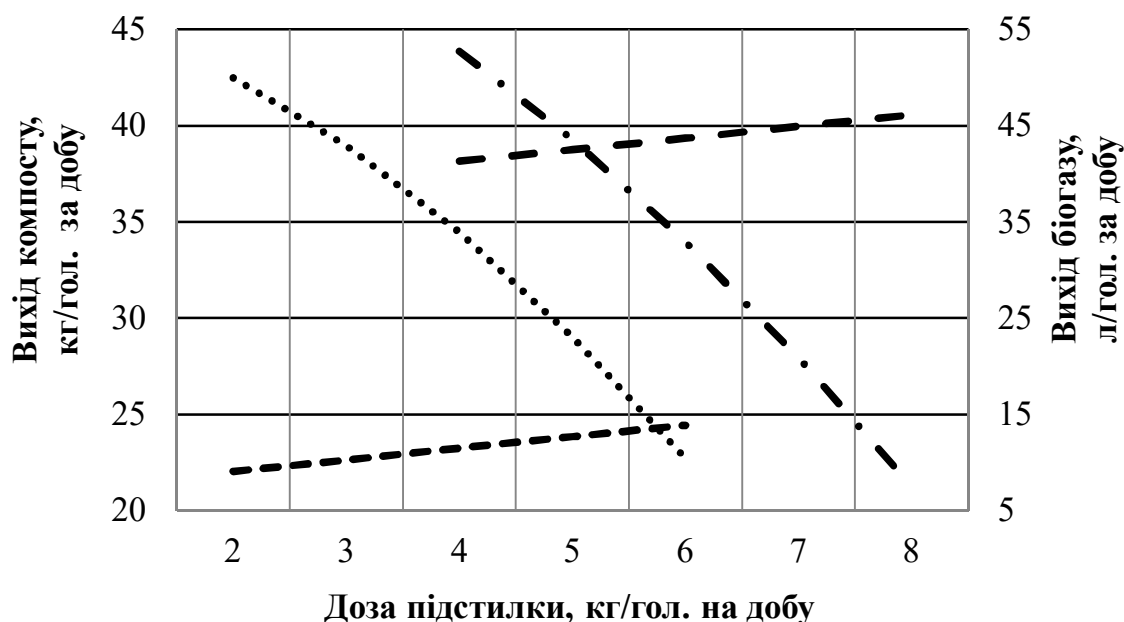


Рис. 4.2. Залежність виходу гноївки від дози підстилки

Розрахунки показують (рис. 4.3), 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 становитиме 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.



- вихід компосту з гною свиней
- вихід біогазу з гною свиней
- вихід компосту з гною ВРХ
- вихід біогазу з гною ВРХ

Рис. 4.3. 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.

4.2. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок

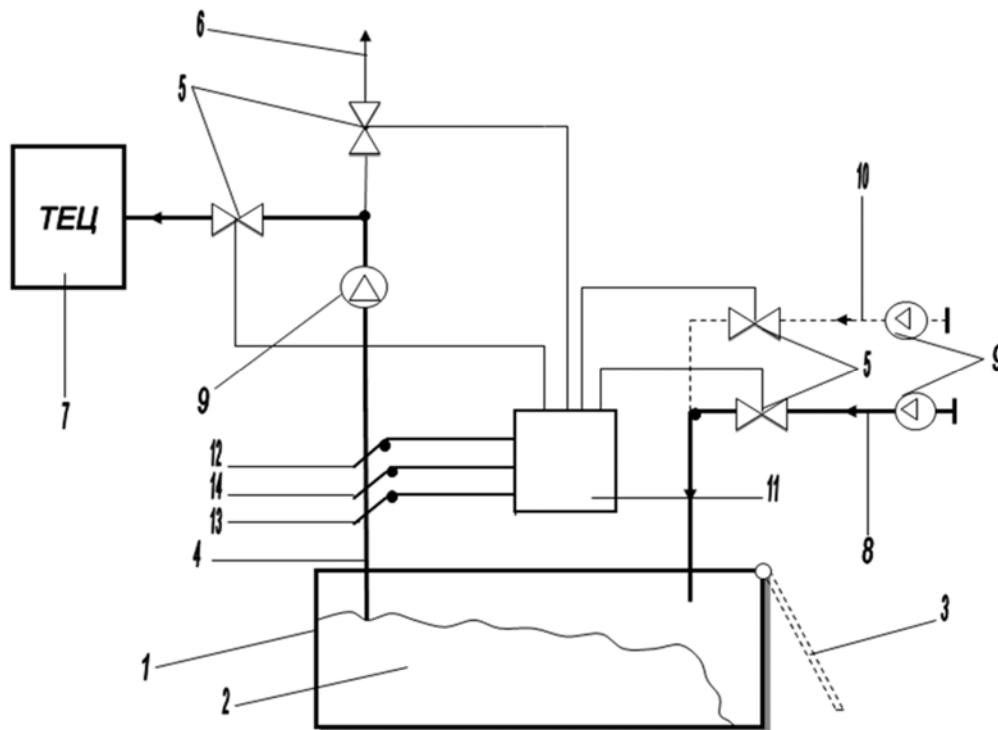
Необхідність переробки гною та посліду відкрила новий перспективний напрямок у конструюванні техніки та обладнання для агропромислового комплексу. Ще у XVII столітті Ян Баптист Ван Гельмонт виявив, що біомаса, яка розкладається, виділяє займісті газу. Алессандро Вольта в 1776 році прийшов до висновку 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 типи за технологією підготовки і бродіння сировини: рідкофазна технологія (вологість зброджуваної органічної маси більше 85 %) і твердофазна (вологість органічної маси менше 85 %).

Твердофазне бродіння являє собою серію послідовних операцій (рис. 4.4). 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 блоках 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. 4.4. 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. У 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 для автотранспорту. Після метанового зброджування залишковий субстрат практично не має неприємного запаху і застосовується як органічне добриво у сільськогосподарському виробництві.

Нами встановлено (рис. 4.5), 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.

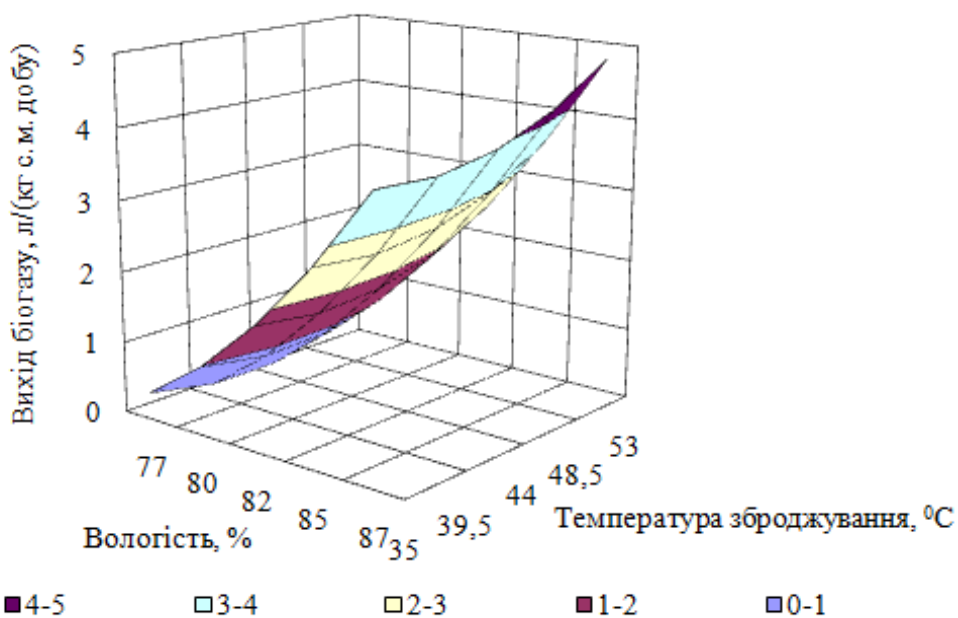


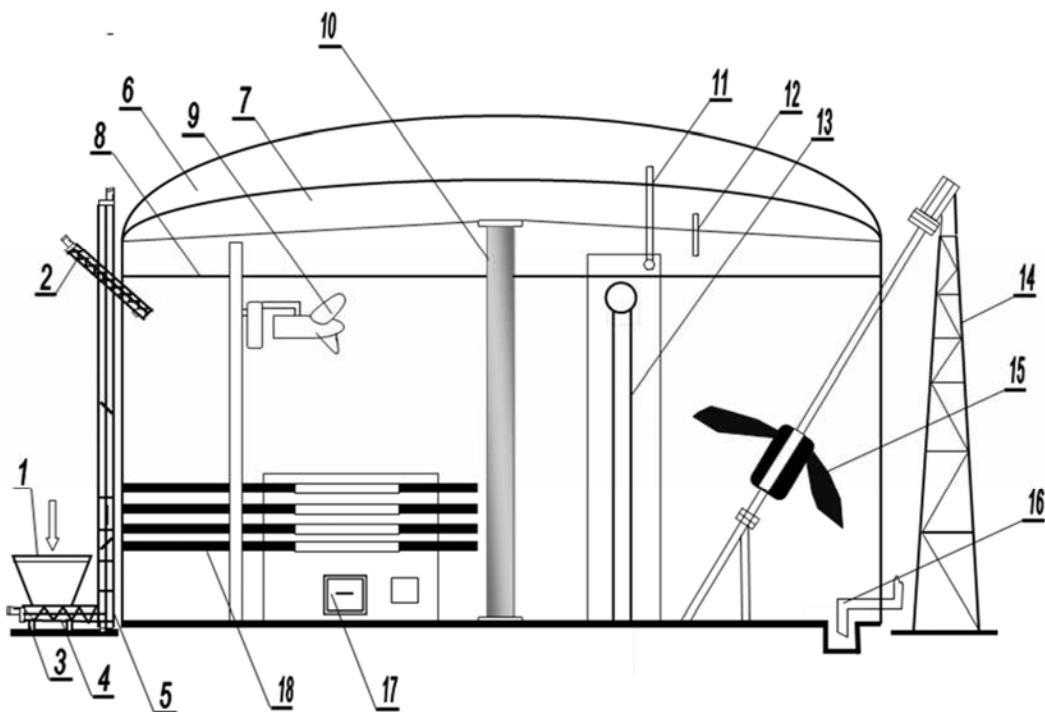
Рис. 4.5. Залежність виходу біогазу від температури зброджування і вологості біомаси

У питанні розвитку технологій твердофазного зброджування необхідно приділяти увагу удосконаленню мікробіологічних процесів ферментації біомаси та пошуку ефективних конструкційно-технологічних рішень ферментерів, особливо це стосується технологічних операцій завантаження

біомаси, її безперервного перемішування і дотримання стабільного температурного режиму роботи ферментера.

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

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. 4.6).



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. 4.6. Схема рідкофазної біогазової установки

Такі реактори виконуються із залізобетону або сталі і мають антикорозійне покриття. Спеціальні мішалки забезпечують перемішування сировини з основною реагуючою біомасою. Це сприяє певній однорідності

ферментаційної суміші, частково стримуючи утворення поверхневої кірки. Виділений в процесі ферментації біогаз накопичується під куполом, потім проходить 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 цього 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. 4.7, а їх основні показники в табл. 4.1.



Рис. 4.7. 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 4.1. 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 у 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 флоатації 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.

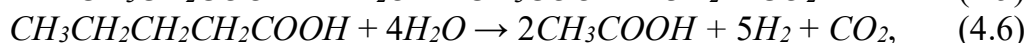
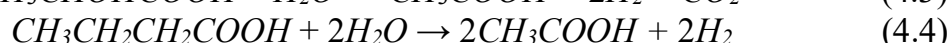
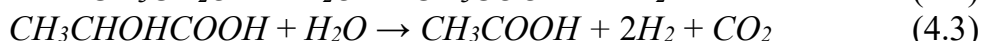
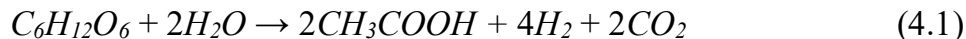
Плаваючі шари, особливо на основі волокнистих субстратів, часто утворюють кірку і якщо її не розмішати, то реактор також необхідно зупинити для її видалення. Вказані недоліки біогазових установок відмічалися в багатьох наукових роботах.

Таким чином, зброджування гною дає змогу вирішити економічні, екологічні та санітарно-епідеміологічні проблеми, що виникають унаслідок 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 й 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.

4.3. 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; $CH_3CHOHCOOH$ – 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.

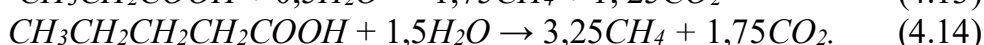
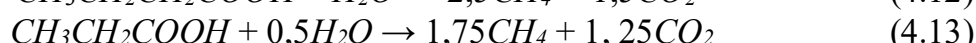
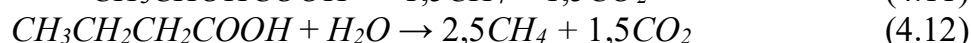
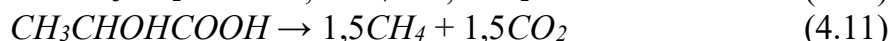
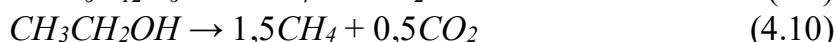
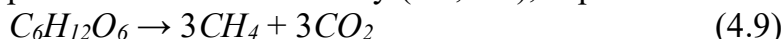
У подальшому, метаногенез відбувається за рахунок діяльності мікроорганізмів, які відновлюють вуглекислий газ до метану, а також таких, що розкладають в кінцевому підсумку оцтову кислоту на метан і вуглекислий газ. Рівняння біохімічних реакцій стадії метаногенезу анаеробної ферментації мають наступний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



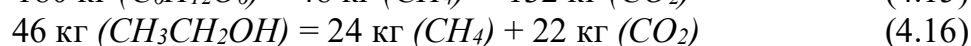
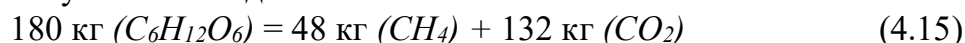
де CH_4 – метан.

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 (4.1-4.6) з рівняннями метаногенезу (4.7, 4.8), отримаємо:



Розрахунковий матеріальний баланс анаеробної ферментації вищенаведених органічних речовин біомаси у відповідності із рівняннями (4.9-4.14) буде мати наступний вигляд:



$$90 \text{ кг } (CH_3CH_2OHCOOH) = 24 \text{ кг } (CH_4) + 66 \text{ кг } (CO_2) \quad (4.17)$$

$$88 \text{ кг } (CH_3CH_2CH_2COOH) + 18 \text{ кг } (H_2O) = 40 \text{ кг } (CH_4) + 66 \text{ кг } (CO_2) \quad (4.18)$$

$$74 \text{ кг } (CH_3CH_2COOH) + 9 \text{ кг } (H_2O) = 28 \text{ кг } (CH_4) + 55 \text{ кг } (CO_2) \quad (4.19)$$

$$102 \text{ кг } (CH_3CH_2CH_2CH_2COOH) + 27 \text{ кг } (H_2O) = 52 \text{ кг } (CH_4) + 77 \text{ кг } (CO_2). \quad (4.20)$$

Дані розрахунку матеріального балансу (табл. 4.2) 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 4.2. Показники виходу біометану при анаеробній ферментації

№ п/п	Складова частина біомаси	Вихід біометану, %:		Масовий вихід у 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	$CH_3CH_2OHCOOH$	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 – метану і вуглекислого газу, для визначення щільності біогазу за нормальних умов скористаємося співвідношенням:

$$\rho_{BG}^H = \rho_{CH_4}^H k_{CH_4} + \rho_{CO_2}^H (1 - k_{CH_4}) \quad (4.21)$$

де $\rho_{CH_4}^H$ – щільність метану за нормальних умов, $kg_{CH_4}/M_{CH_4}^3$; $\rho_{CO_2}^H$ – щільність вуглекислого газу за нормальних умов, $kg_{CO_2}/M_{CO_2}^3$; k_{CH_4} – об'ємний вміст біометану в біогазі, $M_{CH_4}^3/M_{BG}^3$.

Щільність метану та вуглекислого газу за нормальних умов визначимо із урахуванням допущення, що біогаз є сумішшю ідеальних газів. Згідно рівняння стану ідеального газу при нормальних умовах можна записати:

$$\rho_{CH_4}^H = \frac{p_{BG}^H M_{CH_4}}{R_M T_{BG}^H}, \quad \rho_{CO_2}^H = \frac{p_{BG}^H M_{CO_2}}{R_M T_{BG}^H}, \quad (4.22)$$

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; $R_H=8314,41$ 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 в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3. 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	$^{\circ}C$	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	$^{\circ}C$	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:

$$V_{BG} = \rho_{BM} \left(1 - \frac{W_{BM}}{100} \right) k_{OM} k_{OM}^P \frac{m_{BG}}{\rho_{BG}}, \quad (4.23)$$

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, %; $(1 - W_{BM}/100)$ – вміст сухої речовини по відношенню до загальної кількості біомаси, кг_{СМ}/кг_{БМ}; k_{OM} – вміст органічної маси по відношенню до загальної кількості сухої маси у біомасі, що зброджується, кг_{ОМ}/кг_{СМ}; k_{OM}^P – кількість розкладеної органічної маси по відношенню до загальної кількості органічної маси, кг_{РОМ}/кг_{ОМ} за добу; m_{BG} – вихід біогазу в розрахунку на одиницю розкладеної

органічної маси, $k_{\text{БГ}}/k_{\text{РОМ}}$; $\rho_{\text{БГ}}^H$ – щільність біогазу за нормальних умов, $k_{\text{БГ}}/M_{\text{БГ}}^3$.

Схематичне зображення виходу біометану та біогазу із розкладеної органічної маси приведено на рис. 4.8. Залежність між інтенсивністю розкладу органічної маси та питомим виходом біометану і біогазу, а також часом зброджування, має вигляд приведений на рис. 4.9. 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.

Основним напрямком інтенсифікації процесу зброджування біомаси 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.

4.4. 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:

$$\frac{dM}{d\tau} = -k(M - M^*), \quad (4.24)$$

де M – уміст 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, дб^{-1} ; τ – час біогазової ферментації, дб.

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:

$$M = M^* + (M_0 - M^*) \exp(-k\tau), \quad (4.25)$$

де M_0 – загальний уміст органічної речовини біомаси на початок біогазової ферментації, кг.

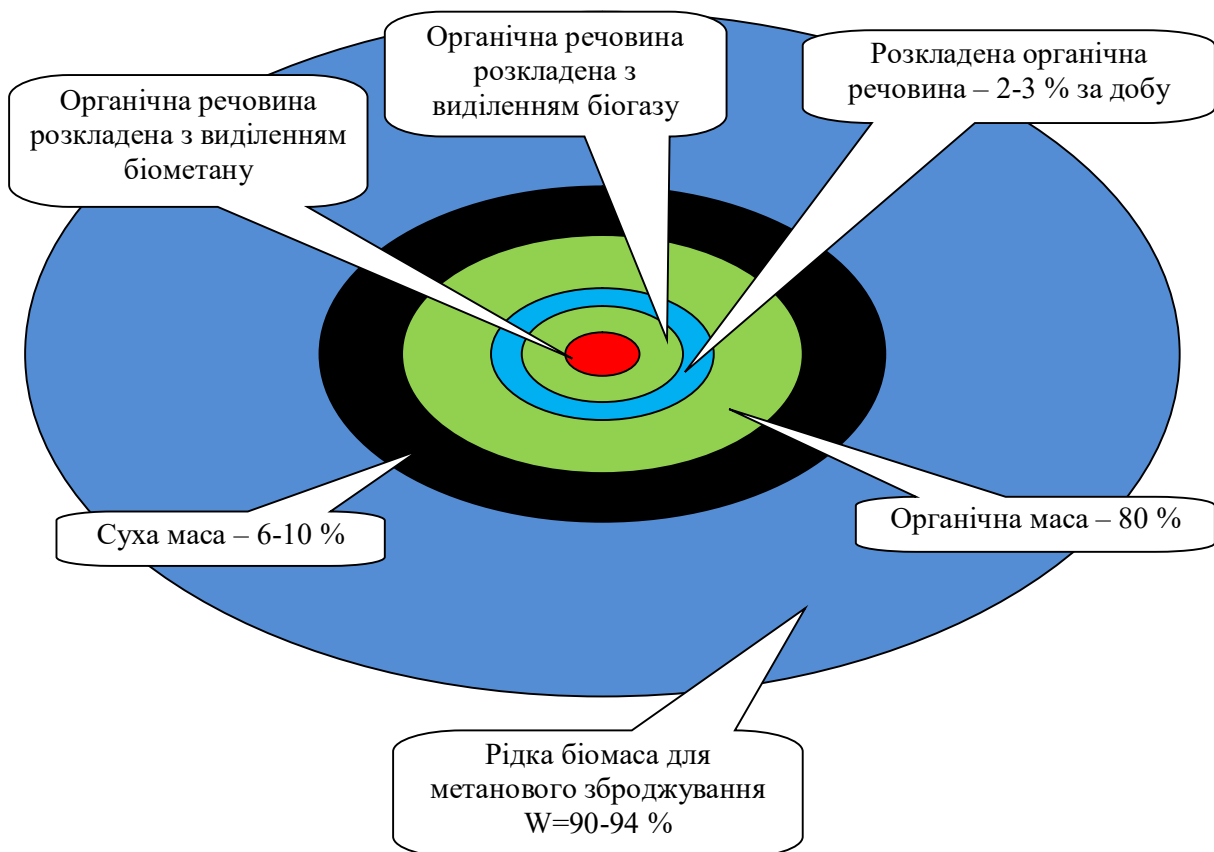


Рис. 4.8. Схематичне зображення виходу біометану та біогазу із розкладеної органічної маси

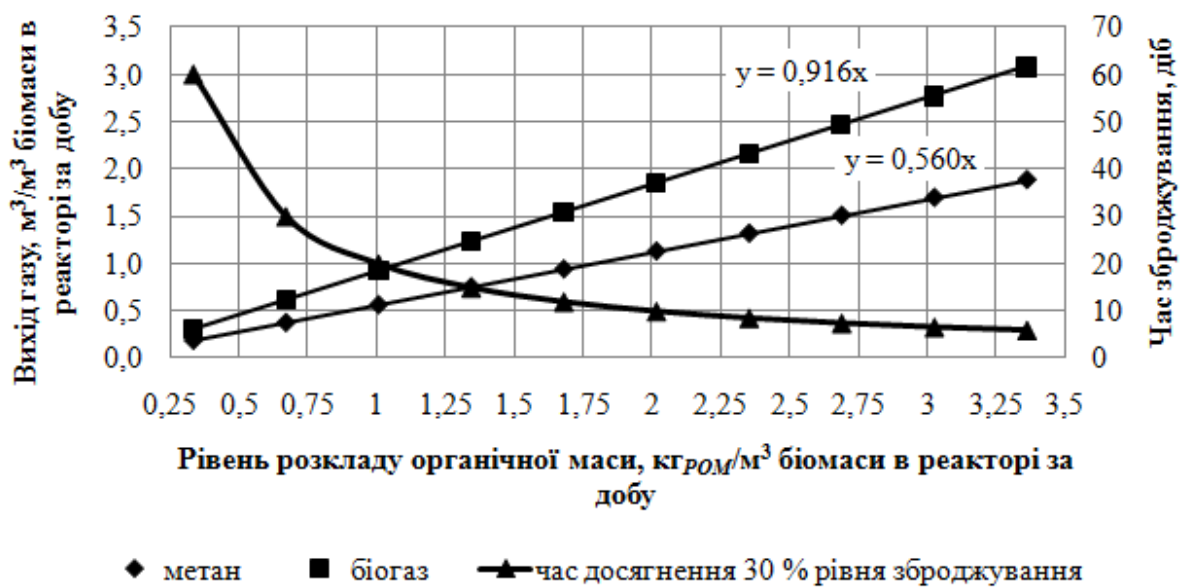


Рис. 4.9. Вплив інтенсивності розкладу органічної маси на питомий вихід біометану, біогазу та час зброджування

У той же час кількість органічної речовини біомаси, яка розклалася на поточний момент часу, становить:

$$M_0 - M = (M_0 - M^*)[1 - \exp(-k\tau)]. \quad (4.26)$$

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

$$\alpha = \alpha_0[1 - \exp(-k\tau)], \quad (4.27)$$

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

$$\alpha = 0,45[1 - \exp(-k_{ЗМТ}\tau)]; \quad (4.28)$$

– для кукурудзяного силосу

$$\alpha = 0,59[1 - \exp(-k_{КС}\tau)]. \quad (4.29)$$

Розрахунок параметра процесу анаеробної ферментації, який характеризує її швидкість, проводиться на основі експериментальних даних за загальновідомою формулою:

$$k = \exp \left[N^{-1} \left(\sum \ln \left(\ln \frac{\alpha_0}{\alpha_0 - \alpha_i} \right) - \sum \ln \tau_i \right) \right], \quad (4.30)$$

де N – кількість вимірів;

Для розрахунку швидкості процесу анаеробної ферментації біомаси зеленої маси трав та кукурудзяного силосу, скористаємося експериментальними даними.

Розрахунки на основі експериментальних досліджень показали, що для процесу анаеробної ферментації швидкість розкладу органічної речовини становить: для зеленої маси трав – $k_{ЗМТ} = 0,095 \text{ дїб}^{-1}$; для кукурудзяного силосу – $k_{ЗМТ} = 0,119 \text{ дїб}^{-1}$.

Таким чином, кінетичні рівняння процесу анаеробної ферментації біомаси зеленої маси трав та кукурудзяного силосу будуть мати наступний вигляд:

– для зеленої маси трав

$$\alpha = 0,45[1 - \exp(-0,095\tau)]; \quad (4.31)$$

– для кукурудзяного силосу

$$\alpha = 0,59[1 - \exp(-0,119\tau)]. \quad (4.32)$$

У графічному вигляді кінетичні рівняння (4.31, 4.32) приведені на рисунку 4.10.

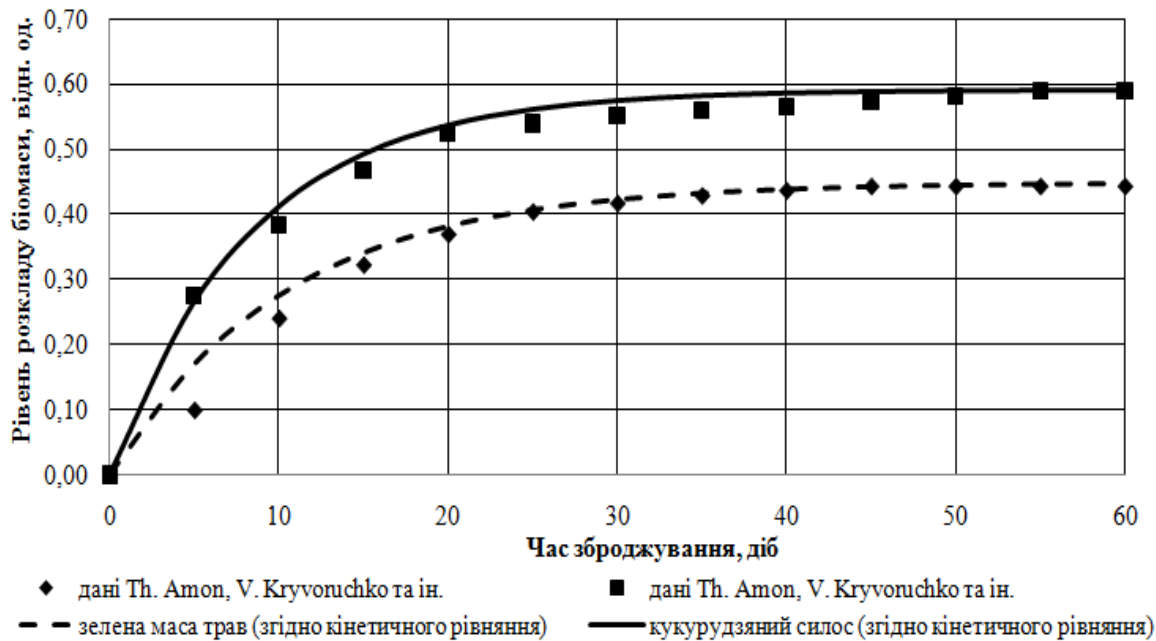


Рис. 4.10. Кінетика процесу біогазової ферментації органічної сировини

Таким чином, швидкість процесу анаеробної ферментації кукурудзяного силосу на чверть перевищує швидкість процесу анаеробної ферментації біомаси зеленої маси трав.

4.5. 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 наведені у таблиці 4.4.

Вихід біогазу при зброджуванні у перерахунку на нормальні умови може бути визначений наступним чином:

$$\begin{aligned}
 V_{\text{БГ}} &= \rho_{\text{БМ}} \left(1 - \frac{W_{\text{БМ}}}{100} \right) k_{\text{ОМ}} k_{\text{ОМ}}^P \frac{m_{\text{БГ}}}{\rho_{\text{БГ}}} = \\
 &= 1050 \left(1 - \frac{92}{100} \right) 0,8 \cdot 0,02 \frac{1,1}{1,199} = 1,23 \text{ м}^3_{\text{БГ}} / \text{м}^3_{\text{БМ}} \text{ за добу,}
 \end{aligned}$$

де $V_{\text{БГ}}$ – питомий вихід біогазу із реактора за нормальних умов, $\text{м}^3_{\text{БГ}}/\text{м}^3_{\text{БМ}}$ за добу; $\rho_{\text{БМ}}$ – щільність біомаси, $\text{кг}_{\text{БМ}}/\text{м}^3_{\text{БМ}}$; $W_{\text{БМ}}$ – вологість біомаси, %; $(1 - W_{\text{БМ}}/100)$ – вміст сухої речовини по відношенню до загальної кількості біомаси, $\text{кг}_{\text{СМ}}/\text{кг}_{\text{БМ}}$; $k_{\text{ОМ}}$ – 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_{ROM}/k_{OM} за добу; m_{BG} – вихід біогазу в розрахунку на одиницю розкладеної органічної маси, k_{BG}/k_{ROM} ; $\rho_{BG}^H = 1,199 \text{ кг}_{BG} / \text{м}^3_{BG}$ – щільність біогазу за нормальних умов.

Таблиця 4.4. Параметри біомаси гноївки

Показник	Од. виміру	Значення
Густина біомаси (БМ) гноївки	$\text{кг}_{БМ}/\text{м}^3_{БМ}$ ($\text{т}_{БМ}/\text{м}^3_{БМ}$)	1050 (1,05)
Вологість	%	92
Вміст води (В)	$\text{кг}_{В}/\text{кг}_{БМ}$	0,92
	$\text{кг}_{В}/\text{т}_{БМ}$	920
Вміст сухої маси (СМ)	% від БМ	8
	$\text{кг}_{СМ}/\text{кг}_{БМ}$	0,08
	$\text{кг}_{СМ}/\text{т}_{БМ}$	80
Вміст органічної маси (ОМ)	% від ОМ	80
	$\text{кг}_{ОМ}/\text{кг}_{СМ}$	0,8
	$\text{кг}_{ОМ}/\text{т}_{БМ}$	64
Інтенсивність розкладу органічної біомаси гноївки	% ОМ за добу	2,0
	$\text{кг}_{ROM}/\text{кг}_{ОМ}$ за добу	0,02
Максимальний рівень розкладу органічної біомаси	%	30

У той же час питомий вихід біометану становитиме (табл. 4.5):

$$V_{CH_4} = V_{BG} k_{CH_4} = 1,23 \cdot 0,611 = 0,752 \text{ м}^3_{BG} / \text{м}^3_{БМ} \text{ за добу ,}$$

Таблиця 4.5. Розрахунок виходу біогазу та біометану

Концентрація метану в біогазі	%	61,1
Вихід біогазу із розкладеної органічної маси за нормальних умов	$\text{кг}_{BG}/\text{кг}_{ROM}$	1,1
	$\text{м}^3_{BG}/\text{кг}_{ROM}$	$1,1/1,199=0,92$
Вихід біогазу із реактора за нормальних умов	$\text{м}^3_{BG}/\text{м}^3_{БМ}$ за добу	1,23
	$\text{м}^3_{BG}/\text{т}_{БМ}$ за добу	$1,23/1,05=1,17$
Вихід біометану за нормальних умов	$\text{м}^3_{CH_4}/\text{м}^3_{БМ}$ за добу	$1,23 \times 0,611=0,752$
Час зброджування	діб	$30/2=15$
Загальний вихід біогазу	$\text{м}^3_{BG}/\text{м}^3_{БМ}$	$1,23 \times 15=18,45$

де V_{CH_4} – питомий вихід біометану із реактора за нормальних умов, $\text{м}^3_{CH_4}/\text{м}^3_{БМ}$ за добу; $k_{CH_4} = 0,611 \text{ м}^3_{CH_4} / \text{м}^3_{BG}$ – 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.

4.6. 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. 4.11.

У 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 накопичення зануреного мінерального осаду.

Для того щоб забезпечити обертання реактора необхідно прикласти крутний момент, величина якого становить:

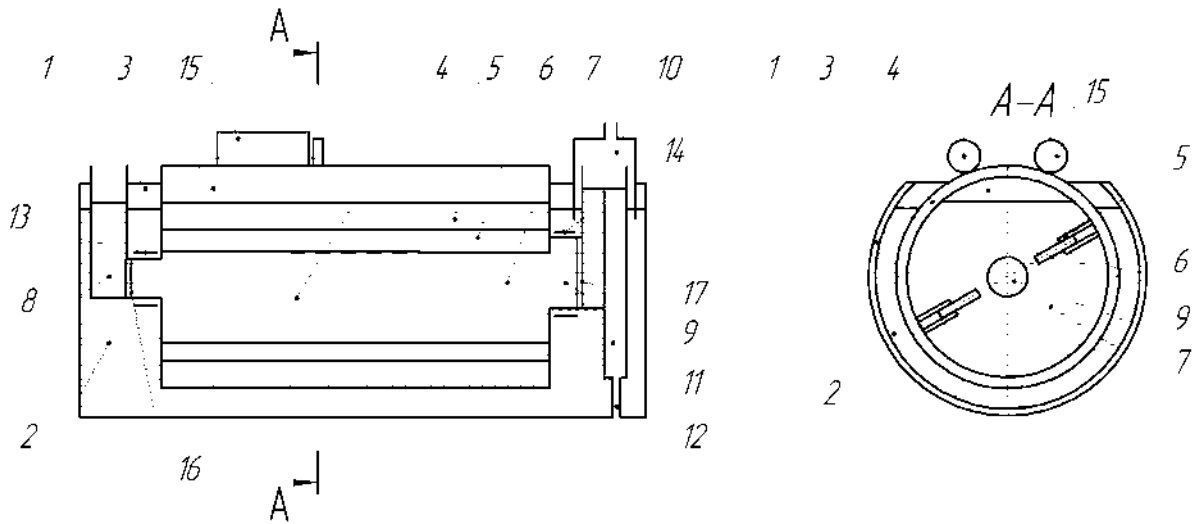
$$M_{KP} = M_{OP} + M_{BTZ} + M_{BTV} + M_{PB} - M_{OB} + J \frac{d\omega}{dt}, \quad (4.33)$$

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.

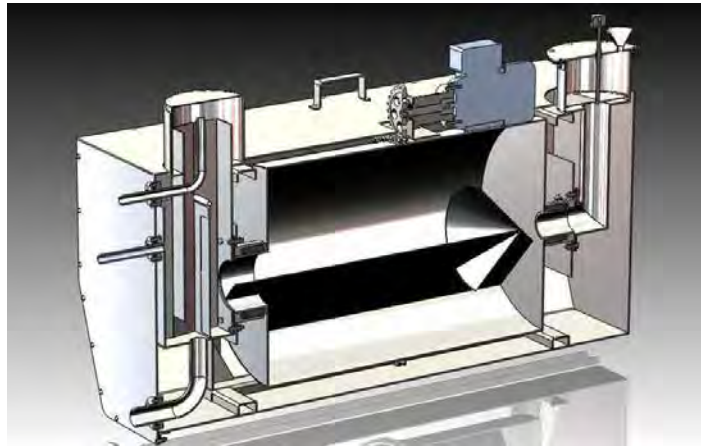
Помноживши кожен член рівняння (4.33) на кутову швидкість обертання реактора отримаємо:

$$P_{KP} = P_{OP} + P_{VTЗ} + P_{VTВ} + P_{ПБ} - P_{OB} + J\omega \frac{d\omega}{dt}, \quad (4.34)$$

де ω – кутова швидкість обертання реактора, рад./с; P_{KP} – потужність для забезпечення обертання реактора, Вт; P_{OP} – потужність опору підшипникових вузлів, Вт; $P_{VTЗ}$ – потужність в'язкого тертя зовнішньої поверхні реактора об рідину, в яку занурений реактор, Вт; $P_{VTВ}$ – потужність в'язкого тертя внутрішньої поверхні реактора об рідину біомасу, яка знаходиться в реакторі, Вт; $P_{ПБ}$ – 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.



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. 4.11. Установка біогазова модульного типу

Потужність, яка споживається привідним електродвигуном із електричної мережі, таким чином становитиме:

$$P = \left(P_{OP} + P_{BT3} + P_{BTV} + P_{PB} - P_{OB} + J\omega \frac{d\omega}{dt} \right) (\eta_{ED} \eta_{II} \cos\varphi)^{-1}, \quad (4.35)$$

де P – потужність, яка споживається привідним електродвигуном із електричної мережі, Вт; η_{EL} – коефіцієнт корисної дії електродвигуна, відн. од.; η_{II} – 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. 4.12).

Середнє значення споживаної потужності необхідної для приводу обертового реактора в залежності від його коефіцієнта занурення приведена на рис. 4.13.

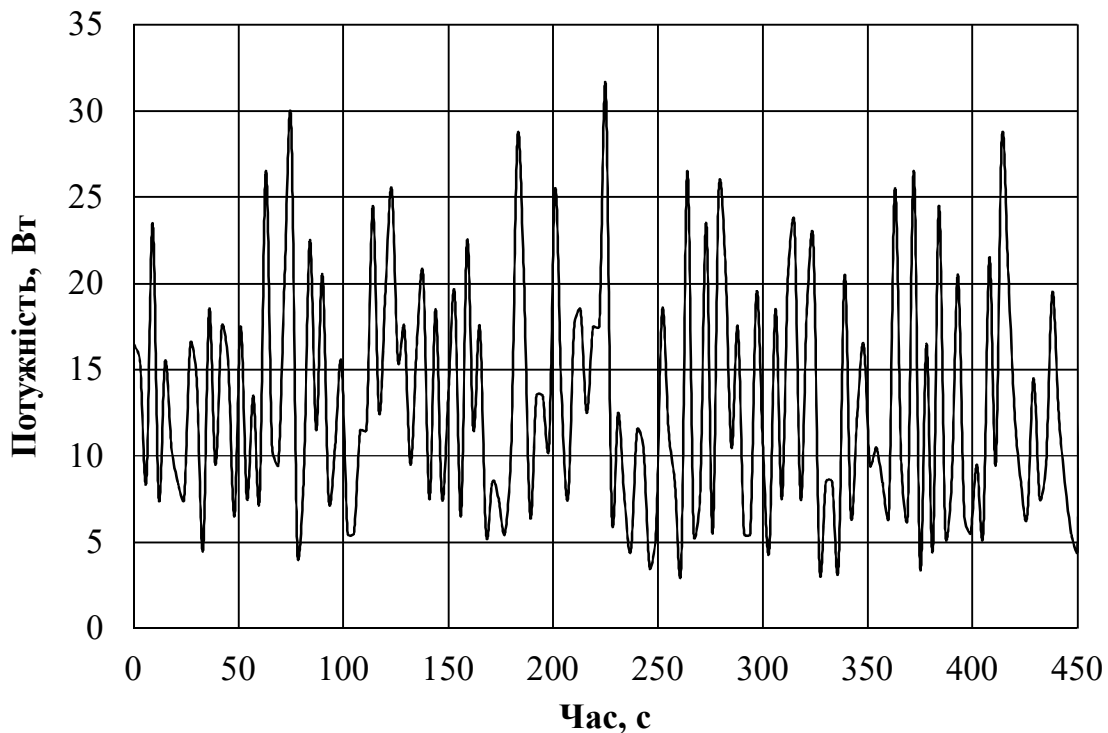


Рис. 4.12. Зміна споживаної електричної потужності під час роботи обертового реактора

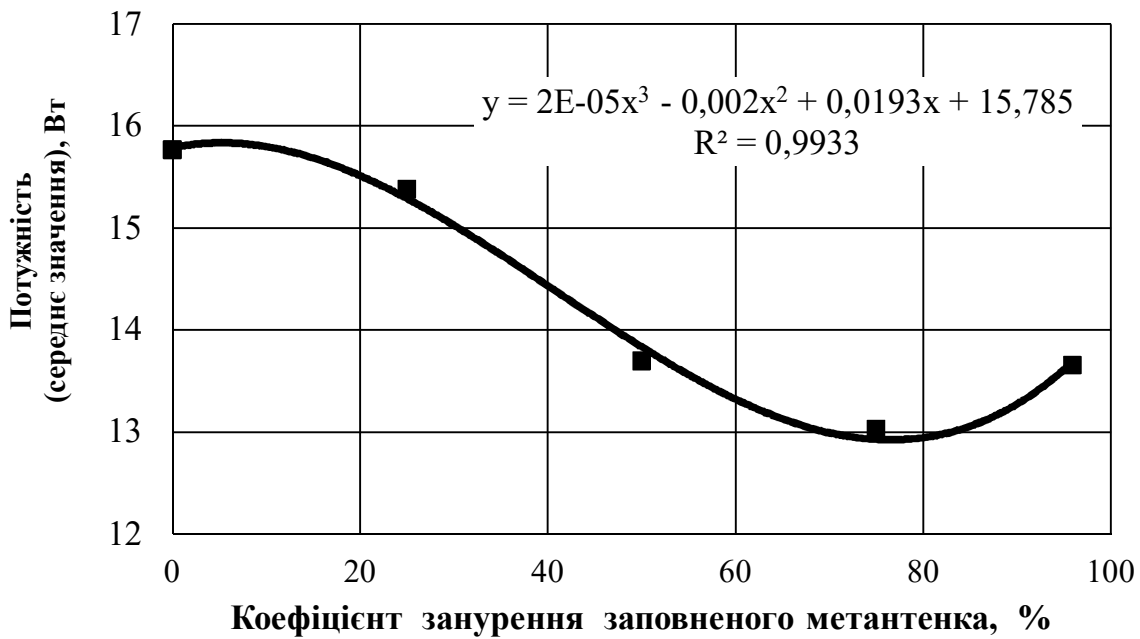


Рис. 4.13. Вплив коефіцієнта занурення заповненого обертового метантенка на потужність приводного механізму

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 ваги реактора силою Архімеда. При подальшому збільшенні коефіцієнта занурення обертового реактора середнє значення споживаної потужності дещо збільшується за рахунок збільшення тертя в підшипниках метантенка, через перекомпенсацію ваги реактора 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. 4.6).

4.7. Технологічний процес отримання біогазу за допомогою біогазової установки з обертовим біореактором

У залежності від системи утримання тварин, видалення гною з приміщень може здійснюватись скребковими транспортерами або гідравлічним зливом. Зважаючи на фізичний, хімічний та фракційний склад 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 4.6. Рациональні конструкційні параметри біогазових обортових реакторів

Робочий діаметр реактора, D , м	Товщина стінок реактора s , м	Діаметр зовнішнього корпусу D_s , м	Робоча довжина L , м	Вага реактора m_p , кг	Коефіцієнт заповнення біомасою k_b	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 (рис. 4.14).

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 у 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. 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.

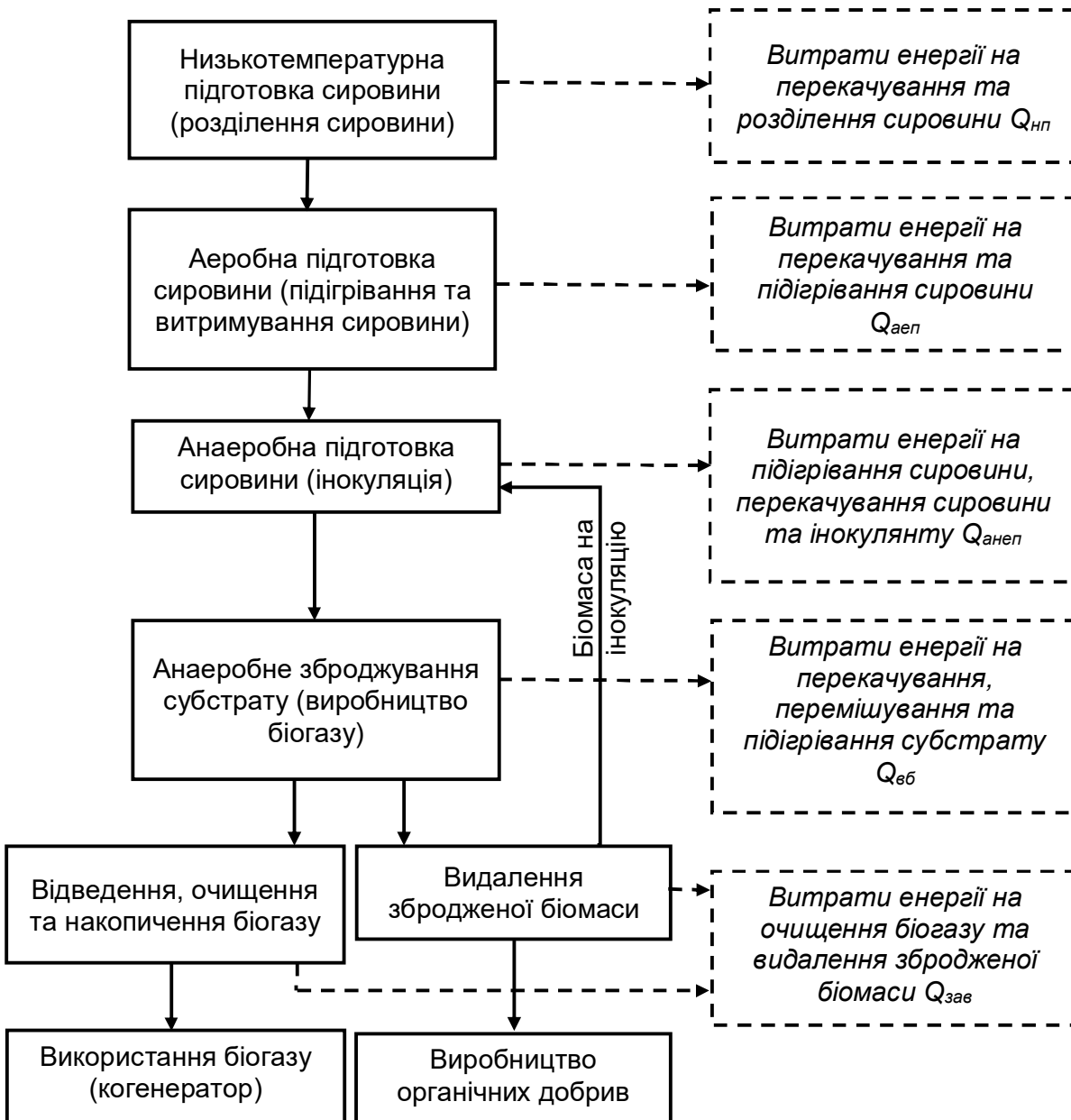


Рис. 4.14. Блок-схема технологічних етапів отримання біогазу за допомогою модульних біогазових установок

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 інокулянта 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 (CH_4 – 72 %, CO_2 – 25 % та інші) проходить очистку від CO_2 і H_2S та зберігається в газгольдерах. Стабілізований по тиску і хімічному складу біогаз надходить на теплові потреби.

Зброджена біомаса видаляється з біореактора через гідрозатвор і направляється в місце її накопичення. Частина 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 ($+42^\circ C$), в яку занурено обертовий корпус реактора. Нерухомий циліндричний корпус, який заповнений теплою водою, має трубчаті нагрівальні елементи, теплоносієм в яких є вода ($+75^\circ C$). Корпус біогазової установки має зовнішню термоізоляцію.

4.8. 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 приміщення (рис. 4.15). Потужність таких котлів в основному лежить в діапазоні від 15 до 100 кВт. Також широко використовують промислові котли (рис. 4.16), потужністю до 40 МВт і навіть більше для опалення групи приміщень, підприємств чи мікрорайонів міста, села, селища.



Рис. 4.15. Побутовий газовий котел потужністю до 100 кВт

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 у 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. Дифузійний пальник - при згорянні газу відбувається його змішування з повітрям, цей 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.



Рис. 4.16. Промисловий газовий котел потужністю до 40 МВт

Крім способу подачі і варіантів змішування газу з повітрям існує поділ пальників за основним призначенням. Побутові газові пальники для котлів мають відносно невелику потужність, у той час, як промислові газові пальники (рис. 4.17) мають значну теплову потужність.

У порівнянні з іншими газами (табл. 4.7) біогазу потрібно менше повітря для загорання. Для повного згорання 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 газОВО-

повітряної суміші. В іншому пальники для біогазу не відрізняються від пальників для природного газу.

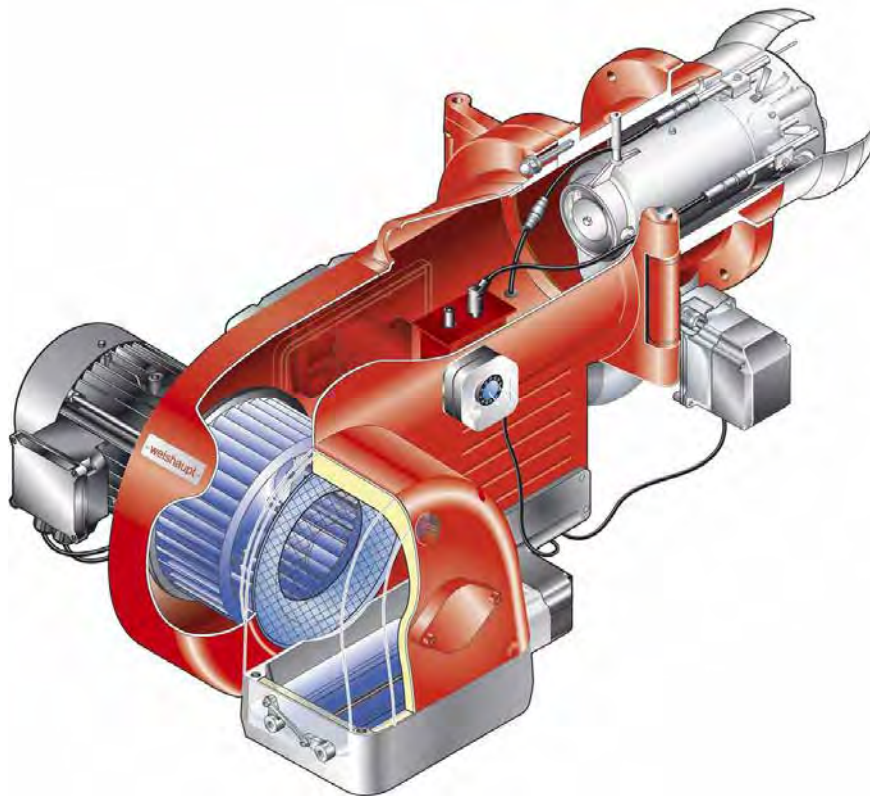


Рис. 4.17. Пальник промислового газового котла

Також можливе спалювання біогазу в кухонних плитах, проте необхідно забезпечити очищення біогазу від вісту сірчаних 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 підприємств громадського харчування та інших господарських цілях, наприклад, нагрівання великих обсягів води для потреб сільського господарства.

Таблиця 4.7. Порівняння природного газу (метану) та біогазу

Складова	Од. виміру	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_2S	мг/м ³	50...100	500...5000
Теплота згоряння	МДж/м ³	32...35	20...29

Біогазові плити (рис. 4.18) 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. 4.18. Пальник біогазової кухонної плити

Також можливе, після відповідного очищення, використання біогазу в сушарках сільськогосподарської продукції (рис. 4.19).

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. У 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 відрізнятися. Сушарки, що використовують біогаз, конструкційно не відрізняються від традиційних сушарок, окрім встановлення відповідного пальника.



Рис. 4.19. Зернова сушарка із використанням біогазу

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. 4.20). Станом на 2015 рік таких установок у Німеччині було біля двох сотень. Уряд цієї країни має амбіційні цілі до 2020 року щорічну заміну 6 млрд. м³ природного газу біометаном.

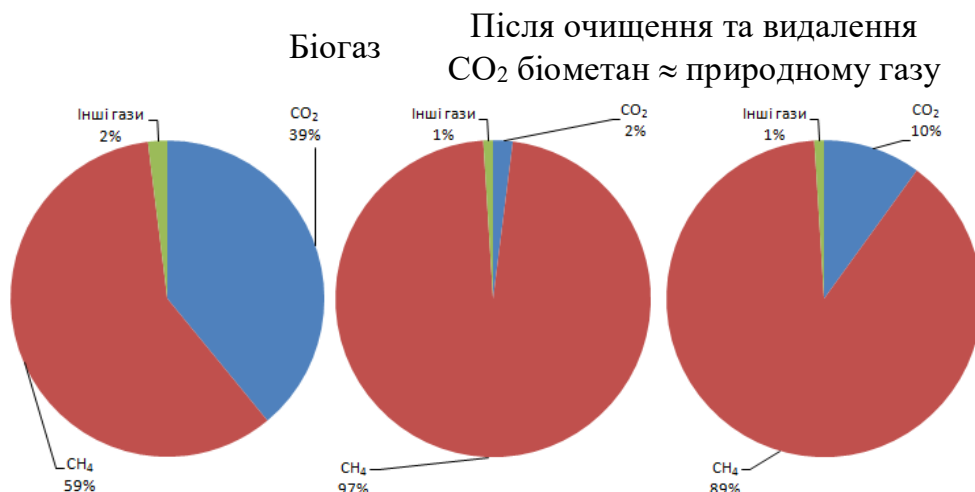


Рис. 4.20. Співвідношення компонентів біометану та природного газу

4.9. 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:

$$B_{\text{БМ}} = V_{\text{БМ}} C_{\text{БМ}} = m_{\text{ГН}} \Pi_{\text{ГН}} - m_{\text{ОД}} \Pi_{\text{ОД}} + E_{\text{ВБМ}}, \quad (4.36)$$

звідки виробнича собівартість виробництва біометану, з урахуванням того, що $m_{\text{ГН}} \approx m_{\text{ОД}} = m_{\text{ПБ}}$, становить:

$$\begin{aligned} C_{\text{БМ}} &= \frac{m_{\text{ПБ}}}{V_{\text{БМ}}} (\Pi_{\text{ГН}} - \Pi_{\text{ОД}}) + E_{\text{БМ}} = \frac{V_{\text{ПБ}} \rho_{\text{ПБ}}}{V_{\text{БМ}}} (\Pi_{\text{ГН}} - \Pi_{\text{ОД}}) + E_{\text{БМ}} = \\ &= 365 \frac{V_{\text{Р}} \rho_{\text{ПБ}}}{V_{\text{БМ}} \tau_{\text{ЗБ}}} (\Pi_{\text{ГН}} - \Pi_{\text{ОД}}) + E_{\text{БМ}} = \frac{\rho_{\text{ПБ}}}{k_{\text{БМ}} \tau_{\text{ЗБ}}} (\Pi_{\text{ГН}} - \Pi_{\text{ОД}}) + E_{\text{БМ}}, \end{aligned} \quad (4.37)$$

а перевищення ціни органічних добрив над ціною гною для забезпечення нульової собівартості біометану становитиме:

$$\Pi_{\text{ОД}} - \Pi_{\text{ГН}} = \frac{E_{\text{БМ}} k_{\text{БМ}} \tau_{\text{ЗБ}}}{\rho_{\text{ПБ}}}, \quad (4.38)$$

або з урахуванням амортизаційних витрат:

$$\Pi_{\text{ОД}} - \Pi_{\text{ГН}} = \frac{(E_{\text{БМ}} + A_{\text{БМ}}) k_{\text{БМ}} \tau_{\text{ЗБ}}}{\rho_{\text{ПБ}}}, \quad (4.39)$$

де $B_{\text{БМ}}$ – витрати на виробництво біометану, грн; $V_{\text{БМ}}$ – об'єм одержаного біометану, м³; $C_{\text{БМ}}$ – виробнича собівартість біометану, грн/м³; $m_{\text{ГН}}$ – маса рідкого гною, що надходить на зброджування, т; $m_{\text{ОД}}$ – маса органічних добрив, отриманих після зброджування, т; $m_{\text{ПБ}}$ – маса переробленої в біогазовому реакторі біомаси, т; $\Pi_{\text{ГН}}$ – ціна рідкого гною, грн/т; $\Pi_{\text{ОД}}$ – ціна органічних добрив, грн/т; $E_{\text{ВБМ}}$ – виробничі витрати на виробництво біометану без урахування вартості рідкого гною та органічних добрив, грн; $E_{\text{БМ}}$ – питомі виробничі витрати на виробництво біометану, грн/м³; $V_{\text{ПБ}}$ – об'єм переробленої в біогазовому реакторі біомаси, м³; $\rho_{\text{ПБ}}$ – густина переробленої в біогазовому реакторі біомаси, т/м³; $V_{\text{Р}}$ – об'єм біомаси в біогазовому реакторі, м³; $\tau_{\text{ЗБ}}$ – час утримання біомаси в реакторі під час зброджування, діб; $k_{\text{БМ}}$ – вихід біометану за добу із розрахунку на одиницю об'єму біогазового реактора, м³/м³ добу; $A_{\text{БМ}}$ – амортизаційні витрати на виробництво біометану, грн/м³.

Подальша деталізація виразу (7.5), шляхом розкриття структури питомих виробничих витрат на виробництво біометану, дозволяє записати:

$$C_{\text{БМ}} = \frac{\rho_{\text{ПБ}}}{k_{\text{БМ}} \tau_{\text{ЗБ}}} (\Pi_{\text{ГН}} - \Pi_{\text{ОД}}) + (1 + k_{\text{ЗБ}} + k_{\text{ЗГ}}) (ТОР_{\text{БМ}} + ЕЛ_{\text{БМ}} + 3П_{\text{БМ}}), \quad (4.40)$$

де $k_{\text{ЗБ}}$ – коефіцієнт, що враховує загальногосподарські витрати, відносних од.; $k_{\text{ЗГ}}$ – коефіцієнт, що враховує загальногосподарські витрати, відносних од.; $ТОР_{\text{БМ}}$ – відрахування на технічне обслуговування і ремонт біогазової установки

з виробництва біометану, грн/м³; $E_{ЛБМ}$ – вартість витраченої електричної енергії при виробництві біометану, грн/м³; $ЗП_{БМ}$ – фонд заробітної плати з нарахуваннями при виробництві біометану, грн/м³.

Враховавши відносну постійність деяких складових виразу (4.40) можна записати:

$$C_{БМ} = a_{БМ} \delta \Pi_{ОД} + b E_{БМ}, \quad (4.41)$$

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.; $E_{БМ} = ТОР_{БМ} + E_{ЛБМ} + ЗП_{БМ}$ – питомі виробничі витрати на виробництво біометану без ураховання вартості органічних добрив, грн/м³.

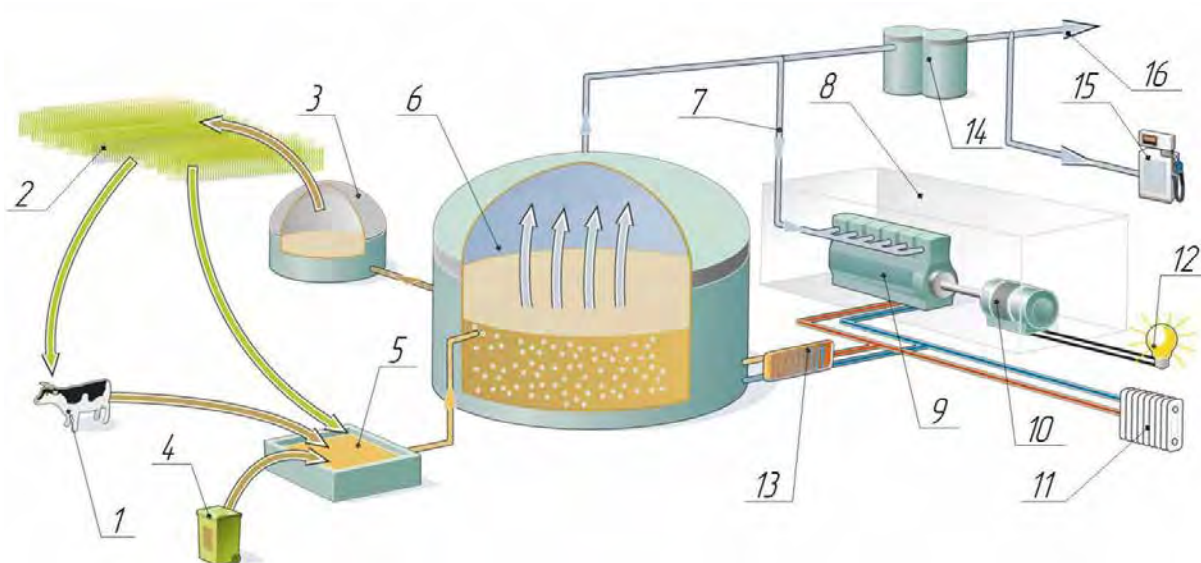
4.10. Виробництво біометану. Очищення та збагачення біогазу

Біогаз може використовуватися децентралізованими блочними теплоелектроцентралями для електро- і теплопостачання (когенерація) або подаватися як очищений і збагачений біогаз (біометан) в існуючу газотранспортну мережу (рис. 4.21). 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.

Застосування біогазу в децентралізованому енергопостачанні сприяє скороченню імпорту енергоносіїв та підвищенню надійності енергопостачання, зокрема, у сільській місцевості. В нинішній час біометан виробляється в п'ятнадцятьох європейських країнах (рис. 4.22). Подача біометану в мережу природного газу відбувається в одинадцятьох країнах (Австрія, Чехія, Німеччина, Данія, Фінляндія, Франція, Люксембург, Нідерланди, Норвегія, Швеція, Великобританія). В дванадцятьох 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., із 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.

Важливу роль в отриманні біометану відіграє збагачення і очищення біогазу. Для того, щоб вироблений біогаз можна було подавати до мережі, його очищують у декілька етапів (рис. 4.23).

Методи очистки біогазу від домішок (табл. 4.8) залежать від способів його подальшого використання. Так, наприклад, при використанні біогазу для виробництва тепла в котлах, обмеження стосуються лише концентрації H_2S (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 H_2S . При спалюванні біогазу в двигунах внутрішнього згоряння, також існують певні вимоги до вмісту H_2S (не більше 200 млн.^{-1}) та силексанів, 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.



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 – когенерація, 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. 4.21. Схема використання біогазу та біометану (джерело Agentur für Erneuerbare Energien, Німеччина)

Значна частина домішок міститься у біогазі в концентраціях значно менших допустимих. І навіть якщо їх концентрації перевищують допустимі (бензол, толуол, ксилол), 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

пошкодженнь обладнання, газових труб, газоводяних теплообмінників, клапанів. Тому знесірчення має найвищий пріоритет в процесі очищення.

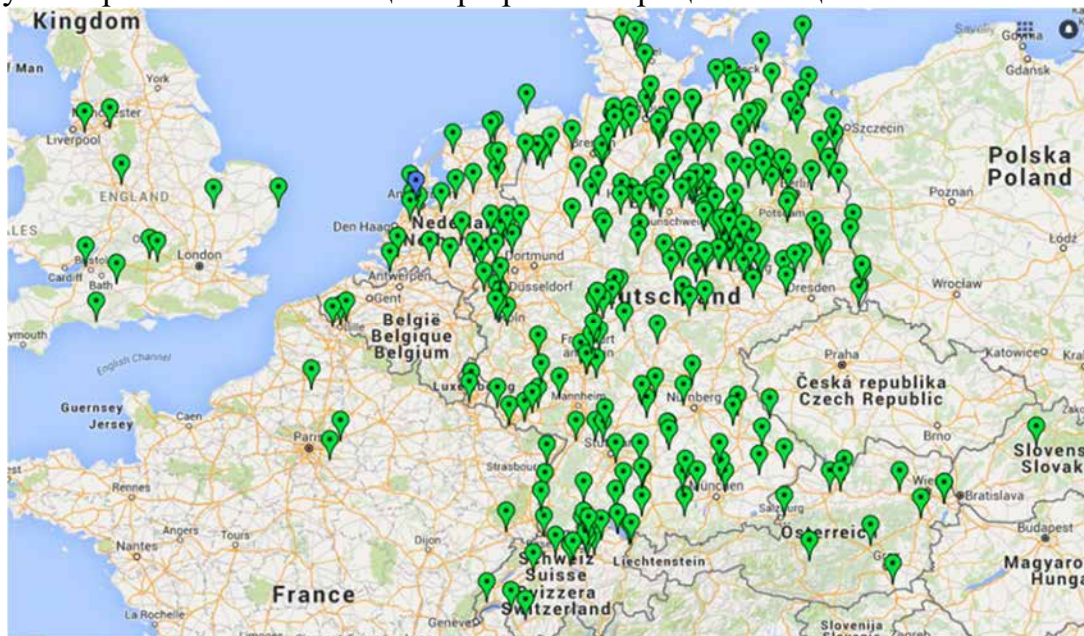


Рис. 4.22. Розташування станцій з виробництва біометану в Європі. (джерело: Google Maps, biogaspartner)

Очищення біогазу від сірководню є серйозною проблемою. Якщо мова йде про видалення H_2S із 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.



Рис. 4.23. Етапи очищення та збагачення біогазу

Таблиця 4.8. Вміст домішок у біогазі

Назва сполуки (домішки)	Формула сполуки (домішки)	Можлива концентрація, млн. ⁻¹	Допустима концентрація, млн. ⁻¹
Сірководень	H_2S	50000	10
Толуол	$C_6H_5CH_3$	210	100
Ксілол	$C_6H_4(CH_3)_2$	120	100
Етилбензол	$C_6H_5C_2H_5$	55	100
Тетрахлоретилен	Cl_2C-CCl_2	35	35
Гексан	C_6H_{14}	30	100
Ізопропілбензол	$C_6H_5C_3H_7$	30	50
Бензол	C_6H_6	25	10
Діхлорметан	CH_2Cl_2	15	200
Нонан	C_9H_{20}	15	-
Хлорбензол	C_6H_5Cl	12	75
Трихлоретан	Cl_2HC-CH_2Cl	10	10
1,1-Діхлоретан	$CH_3CH_2Cl_2$	10	10
1,2-Діхлоретан	$ClCH_2CH_2Cl_2$	8	50
Пентан	C_5H_{12}	7	600
Ізооктан	C_8H_{18}	5	300
Індол	C_8H_7N	5	-
1,1-Діхлоретилен	$Cl_2C_2-CH_2$	2	10
Нафталін	$C_{10}H_8$	0,2	10
Трихлоретилен	$Cl_2C-CHCl$	0,2	35

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 із рідким поглиначем. Найбільший практичний інтерес представляють методи рідинної адсорбції, при яких газова суміш пропускається через розчин поглиначя, який

після насичення його сірководнем всередині пристрою надсилається на регенерацію.

Біогаз з біореакторів і метантенків має відносну вологість близько 100 %, а оскільки він виходить із 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 із 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 відділювачам вологи у 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 прийняттого 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 відрізнитися 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. 4.24). При цьому частка вуглекислого газу (CO_2) 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 (CO_2), що міститься в біогазі, абсорбується водою. При цьому частково видаляються сірководень (H_2S) і аміак, а також різноманітні домішки та мікроорганізми. Водяна пара у біогазі після очищення вологим способом зріджується. Таким способом можна досягти вмісту CH_4 понад 96 %.



Рис. 4.24. Установа для очищення та збагачення біогазу в Швандорфі, Німеччина

У технології адсорбції під змінним тиском попередньо знесірчений і висушений біогаз піддається дії змінного тиску (до 1 МПа). При цьому вуглекислий газ (CO_2) адсорбується відновлюваним активованим вугіллям. Крім вуглекислого газу адсорбуються гази, що містяться в домішках. Таким способом також можна досягти вмісту CH_4 до 96 %.

Крім вищезазначених 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 адсорбується 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.

При 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. Температура кипіння метану мінус $161,5^\circ C$, а вуглекислого газу – мінус $78,5^\circ C$. При пониженні температури в умовах надлишкового тиску CO_2 переходить в рідкий стан, в той час коли метан знаходиться ще в газоподібному стані. При цьому CO_2 можна відносно легко відділити від метану. Виділений таким способом CO_2 є достатньо чистим та може бути товарним продуктом.

4.11. Когенераційні установки

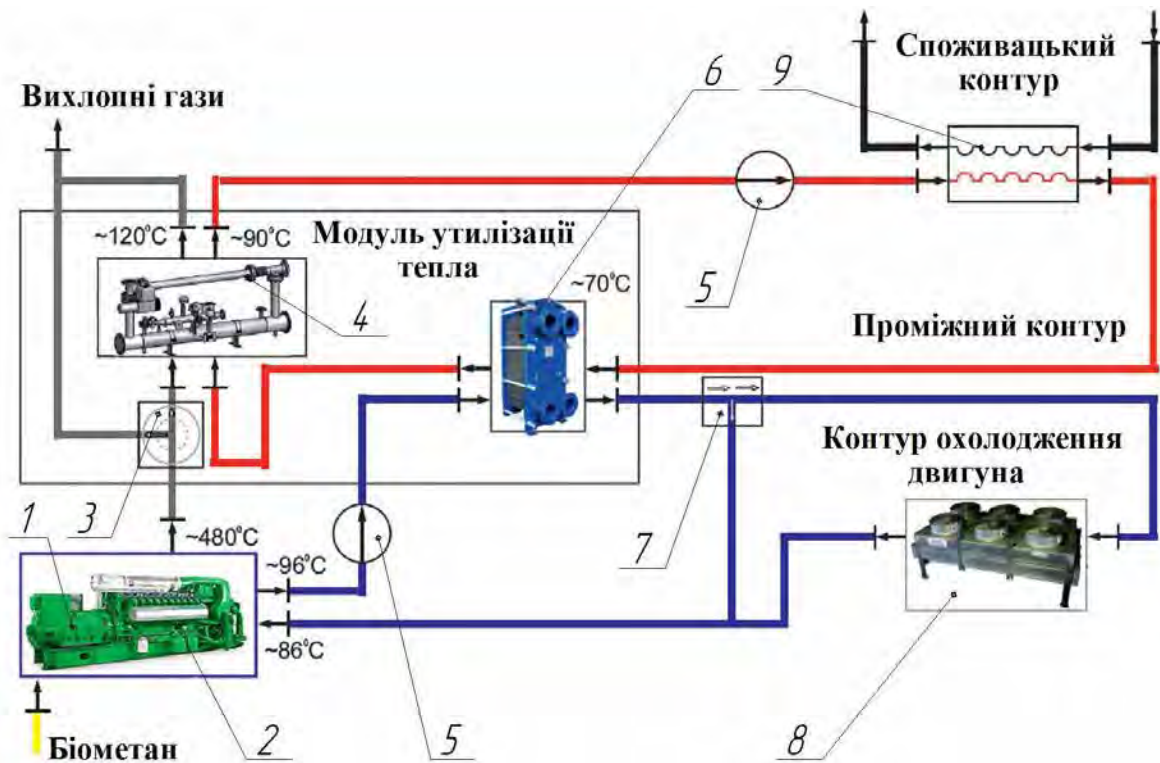
Когенерація – це комбіноване виробництво тепла та електроенергії. На електростанції із застосуванням технології когенерації паливо використовується для отримання двох форм енергії – теплової і електричної. Приставка «ко» в слові когенерація і означає комбіноване виробництво теплової та електричної енергії. 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. 4.25). 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 побутових об'єктів.

Когенераційні електростанції з надлишком покривають потреби споживачів у електричній і дешевій тепловій енергії. Надлишкова теплова енергія може направлятися у парову турбину, 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.



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. 4.25. Схема когенераційної установки

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 біогаз після очищення від вуглекислого газу та інших домішок, який виробляється біогазовими установками і може слугувати важливим джерелом підвищення їх економічної ефективності.

Газотурбінні установки (рис. 4.26) 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.

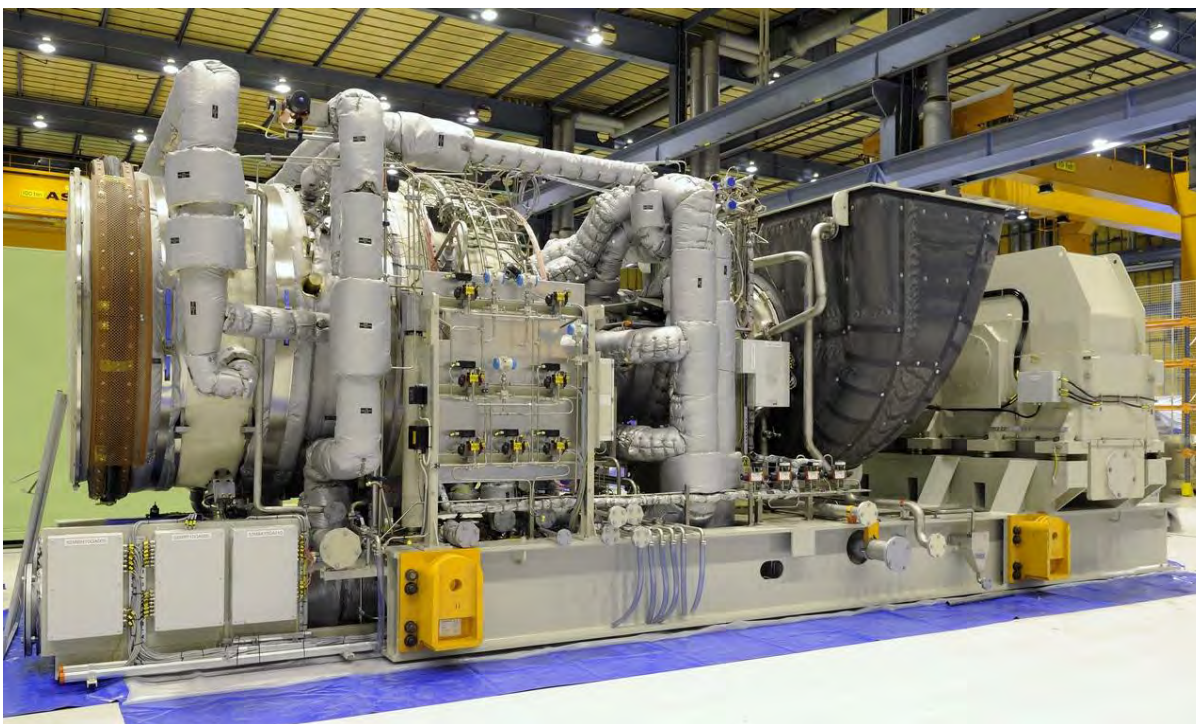


Рис. 4.26. Газова турбіна SGT-800 виробництва Siemens потужністю 47 МВт

Електричний ККД (частка електроенергії від загальної енергії згоряння палива) систем подібного типу може досягати 39 %. Газотурбінні установки, як правило, виробляють у 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 із 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.

Мікротурбінні установки (рис. 4.27) 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, назвні виведені тільки система вихлопу і тепла 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. 4.28). 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.

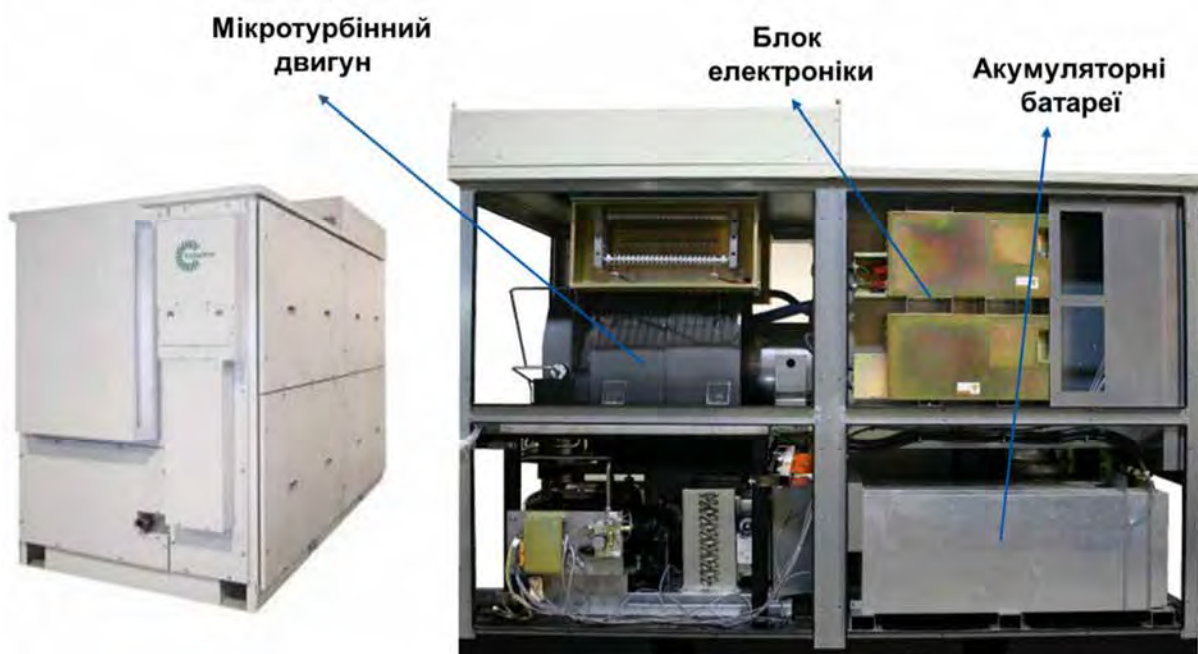


Рис. 4.27. Мікротурбінна установка Capstone C200 з електричною потужністю 200 кВт

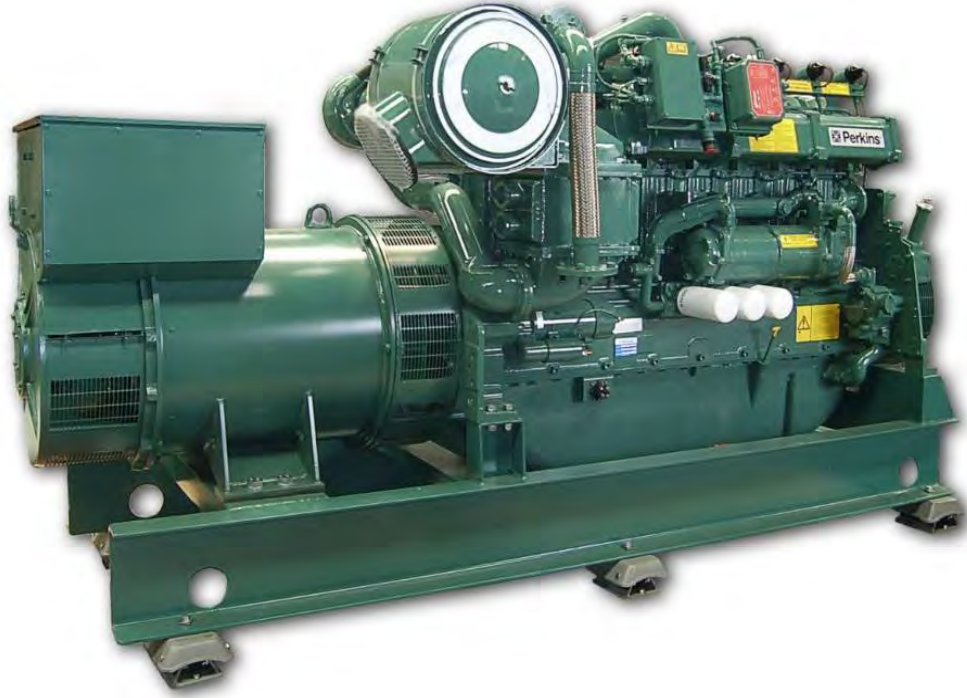


Рис. 4.28. Газопоршнева установка Perkins TRS1 електричною потужністю 310 кВт

4.12. 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:

$$B_{\text{ЕЛ}} = W_{\text{ЕЛ}} C_{\text{ЕЛ}} = m_{\text{ГН}} \Pi_{\text{ГН}} - m_{\text{ОД}} \Pi_{\text{ОД}} + E_{\text{ВЕЛ}}, \quad (4.42)$$

звідки виробнича собівартість виробництва електроенергії на основі біометану, з урахуванням того, що $m_{\text{ГН}} \approx m_{\text{ОД}} = m_{\text{ПБ}}$, становить:

$$\begin{aligned} C_{\text{ЕЛ}} &= \frac{m_{\text{ПБ}}}{W_{\text{ЕЛ}}} (\Pi_{\text{ГН}} - \Pi_{\text{ОД}}) + E_{\text{ЕЛ}} = \frac{V_{\text{ПБ}} \rho_{\text{ПБ}}}{W_{\text{ЕЛ}}} (\Pi_{\text{ГН}} - \Pi_{\text{ОД}}) + E_{\text{ЕЛ}} = \\ &= 365 \frac{V_{\text{Р}} \rho_{\text{ПБ}}}{W_{\text{ЕЛ}} \tau_{\text{ЗБ}}} (\Pi_{\text{ГН}} - \Pi_{\text{ОД}}) + E_{\text{ЕЛ}}, \end{aligned} \quad (4.43)$$

а врахувавши, що

$$W_{\text{ЕЛ}} = \frac{V_{\text{БМ}} q_{\text{БМ}} \eta_{\text{Г}}}{3,6}, \quad (4.44)$$

отримаємо:

$$C_{\text{ЕЛ}} = 365 \frac{3,6 V_{\text{Р}} \rho_{\text{ПБ}}}{V_{\text{БМ}} q_{\text{БМ}} \eta_{\text{Г}} \tau_{\text{ЗБ}}} (\Pi_{\text{ГН}} - \Pi_{\text{ОД}}) + E_{\text{ЕЛ}} = \frac{3,6 \rho_{\text{ПБ}}}{k_{\text{БМ}} q_{\text{БМ}} \eta_{\text{Г}} \tau_{\text{ЗБ}}} (\Pi_{\text{ГН}} - \Pi_{\text{ОД}}) + E_{\text{ЕЛ}}, \quad (4.45)$$

а перевищення ціни органічних добрив над ціною гною для забезпечення нульової собівартості електроенергії на основі біометану становитиме:

$$C_{ОД} - C_{ГН} = \frac{E_{ЕЛ} k_{БМ} q_{БМ} \eta_{Г} \tau_{ЗБ}}{3,6 \rho_{ПБ}}, \quad (4.46)$$

або з урахуванням амортизаційних витрат:

$$C_{ОД} - C_{ГН} = \frac{(E_{ЕЛ} + A_{ЕЛ}) k_{БМ} q_{БМ} \eta_{Г} \tau_{ЗБ}}{3,6 \rho_{ПБ}}, \quad (4.47)$$

де $E_{ЕЛ}$ – 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:

$$C_{ЕЛ} = \frac{3,6 \rho_{ПБ}}{k_{БМ} q_{БМ} \eta_{Г} \tau_{ЗБ}} (C_{ГН} - C_{ОД}) + (1 + k_{ЗВ} + k_{ЗГ}) (ТОР_{ЕЛ} + ЕЛ_{ЕЛ} + ЗП_{ЕЛ}), \quad (4.48)$$

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 (4.48) можна записати:

$$C_{ЕЛ} = a_{ЕЛ} \delta C_{ОД} + b E_{ЕЛ}, \quad (4.49)$$

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 4.9.

Таблиця 4.9. 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_{EL}	13,6
Коефіцієнт, що враховує загальновиборничі та загальногосподарські витрати, відн. од.	b	1,15

За технічними і вартісними показниками обертових (потужність від 10 до 80 кВт) та ємнісних (потужність від 100 до 500 кВт) біогазових установок, що пропонуються на ринку в Україні, можна визначити питомі виробничі витрати на виробництво біометану та електроенергії на його основі, без урахування вартості органічних добрив. Собівартість виробництва біометану та собівартість виробництва електроенергії на основі біометану, а також термін окупності біогазових установок залежить від потужності біогазових установок, вартості електроенергії, середньомісячної зарплати працівників та типу біогазової установки.

Перевищення ціни органічних добрив на виході з біогазової установки над ціною гною на вході в установку дозволяє в деяких випадках навіть забезпечити нульову собівартість біометану та електроенергії на його основі. Нагальним є також необхідність підсилення економічних механізмів інвестиційної підтримки сільськогосподарських підприємств, які впроваджують біогазові установки для виробництва біометану та електроенергії. Зазвичай підтримка впровадження біогазових установок здійснюється за рахунок надання "зеленого" тарифу на вироблену електроенергію на основі біометану. Існують різні механізми встановлення "зеленого" тарифу і від цього також залежить ефективність виробництва біометану та електроенергії на його основі. Однак необхідність використання біогазу як відновленого джерела енергії сприяє встановленню справедливого "зеленого" тарифу для біогазових установок.

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?
24. Які основні способи переробки гною?
25. Яке повинно бути співвідношення вуглецю і азоту у компостній суміші?
26. Які бувають способи анаеробної ферментації?
27. Як система видалення і переробки гною впливає на обсяги гноєсховищ?
28. Що таке біогаз?
29. Завдяки якому процесу утворюється біогаз?
30. Чим біогаз вироблений із біомаси відрізняється від природного газу?
31. З якої сировини може вироблятися біогаз?
32. Охарактеризуйте сучасний стан біогазових технологій.
33. Чому виробництво біогазу є однією з безвідходних технологій?
34. Які два основні види підготовки і бродіння сировини використовуються у біогазових технологіях?
35. Охарактеризуйте мікробіологічні основи процесу виробництва біогазу.
36. Скільки груп бактерій бере участь у виробництві біогазу? Назвіть їх.
37. Дайте класифікацію метаноутворюючим бактеріям за температурним режимом.
38. Які основні елементи конструкції мають твердофазні біогазові установки?
39. Які основні показники твердофазного бродіння в існуючих біореакторах?
40. Чим обумовлена низька ефективність процесу виділення метану під час твердофазного бродіння?
41. Які основні елементи конструкції мають рідкофазні біогазові установки?

42. Які основні недоліки рідкофазних біогазових реакторів?
43. Охарактеризуйте першу та другу стадії анаеробного зброджування біомаси.
44. Який масовий вихід метану та вуглекислого газу під час анаеробної ферментації 1 кг органічної речовини?
45. Який основний напрям інтенсифікації процесу рідкофазного зброджування біомаси гною?
46. В яких межах повинна бути вологість біомаси при використанні рідкофазного анаеробного зброджування?
47. Чим обумовлена нижня межа вологості біомаси при використанні рідкофазного анаеробного зброджування?
48. Чим обумовлена верхня межа вологості біомаси при використанні рідкофазного анаеробного зброджування?
49. Які основні типи мішалок використовуються для перемішування біомаси при рідкофазному анаеробному зброджуванні?
50. Який вихід біогазу можна отримати з 1 т біомаси при рідкофазному анаеробному зброджуванні?
51. Який питомий вихід біогазу мають сучасні рідкофазні біогазові установки?
52. Який максимальний рівень розкладу органічної речовини біомаси під час рідкофазного анаеробного зброджування?
53. Запитання для самоконтролю:
54. Назвіть основні способи використання біометану.
55. Для чого необхідно проводити очищення та збагачення біогазу?
56. Який газ називають біометаном?
57. Назвіть основні вимоги до якості біометану.
58. Назвіть основні етапи очищення та збагачення біометану.
59. Скажіть за яких умов можливе постачання біогазу в загальну мережу природного газу?
60. Яким чином здійснюється видалення сірководню із біогазу?
61. Як відбувається осушення біогазу?
62. Який процес називають збагаченням біогазу?
63. Як відбувається збагачення біогазу?
64. Що називають когенерацією?
65. Що називають когенератором?
66. Що являє собою когенераційна установка для переробки отриманого біогазу?
67. Яким чином можна забезпечити нагрів біомаси у біогазових реакторах?
68. Як визначити виробничу собівартість виробництва електроенергії на основі біометану?
69. Який показник дизель-генератора визначає економічну ефективність виробництва електроенергії на основі біометану?
70. Яка потреба в біомасі для отримання 1 м³ біометану за час зброджування?

71. Яка потреба в біомасі для отримання 1 кВт год. електроенергії за час зброджування?
72. Яка собівартість виробництва електроенергії на основі біометану?
73. Який орієнтовний термін окупності біогазових установок?
74. Що являє собою "зелений тариф" та яке він має відношення до роботи біогазових установок?
75. Яка частина теплової енергії біогазу може бути перетворена в електроенергію?

Література:

1. 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.
2. Голуб Г.А. Управління технологічними процесами у тваринництві: навч. посіб. / Г.А. Голуб - К., НУБіП України, 2016. - 148 с.
3. 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.
4. 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.
5. Голуб Г.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. – К., 2016. – Вип. 241. – 396 с. – С. 350–358.
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.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. Голуб Г.А. Агропромислове виробництво їстівних грибів. Механіко–технологічні основи /Г.А. Голуб. – К.: Аграрна наука, 2007. – 332 с.
10. 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.
11. Голуб Г. А. Газова автономія / Г. А. Голуб, С. М. Кухарець // The Ukrainian Farmer. – 2016. - №3. – С. 181-182.

12. Гелетуха Г.Г. Перспективы виробництва та використання біометану в Україні. /Г.Г. Гелетуха, П.П. Кучерук, Ю.Б. Матвєєв// Аналітична записка Біоенергетичної асоціації України №11 – 2014 г. – 42 с.
13. Експериментальне визначення питомої потужності перемішування біомаси в обертовому реакторі /Голуб Г.А., Дубровіна О.В., Чуба В.В., Павленко М.Ю.// Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК – К., 2013. – Вип. 185, ч. 1. – 372 с. – С. 272-277.
14. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. Підручник / С. О. Кудря // – К.: НТУУ«КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка», 2012. – 489 с.
15. Кудря С. О. Стан та перспективи розвитку відновлюваної енергетики в Україні (за матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 7 жовтня 2015 р.) / С. О. Кудря // Вісник Національної академії наук України. - 2015. - № 12. - С. 19-26.
16. Кузьменко М. Фермерський біогаз / М. Кузьменко, Г. Голуб, С. Кухарець // The Ukrainian Farmer. – 2016. - №7. – С. 70-71.
17. 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 наукових праць. 2014. – Вип. 18 (32), книга 2. – 387 с. – С. 356-364.
18. Кухарець С.М. Підвищення енергетичної автономності агроєкосистем. Механіко-технологічні основи: монографія / С.М. Кухарець – Житомир: ЖНАЕУ, 2016. – 192 с.
19. Кухарець С. Н. Производство биометана в сельском хозяйстве /С. Н. Кухарець // AgroOne. – 2016. №3 (5). – С.24–25.
20. Марус О.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 – К., 2016. – Вип. 241. – 396 с. – С. 380–387.
21. Механіка руху частинок по обертових лопатках реакторів зброджування /Г.А. Голуб, С.М. Кухарець, О.А. Марус, Я.Д. Ярош/ Техніка і технології АПК (Науково-виробничий журнал). – 2016. – № 3 (78). – С. 10–13
22. Пат. 110077 Україна, МПК C02F 11/04, C02F 3/28. Метантенк /Голуб Г.А., Кухарець С.М.; заявник і патентовласник Нац. ун.-т. біоресурсів і природокористування України. – №a2014 09259; заявл. 19.08.2014; дата публікації 10.11.2015, Бюл. № 21.
23. Руководство по биогазу. От получения до использования / Специальное агентство возобновляемых ресурсов (FNR). 5-е издание. – Гюльцов: Германия, 2012. – 213 с.
24. Системи видалення, обробки, підготовки, та використання гною: ВНТП–АПК 09.06. Офіц. видання / – К.: Міністерство аграрної політики України 2006. – 100 с.

25. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок /Голуб Г., Войтенко В., Рубан Б, Єрмоленко В.// Техніка і технології АПК. – 2012. – № 2 (29). – С. 18-21.
26. Технологія переробки біологічних відходів у біогазових установках з обертовими реакторами / [Г. А. Голуб, О. В. Сидорчук, С. М. Кухарець, В. В. Гох, С. В. Осауленко, О. А. Завадська, Б. О. Рубан, Н. Л. Поліковська, Р. Л. Швець, В. В. Чуба, М. Ю. Павленко]. – К.: НУБіП України, 2014. – 106 с.
27. Эдер Барбара. Биогазовые установки. Практическое пособие / Б. Эдер, Х. Шульц // Zorg Biogas, 2008 – 268 с.
28. 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.
29. Golub G. Biomethane formation in biogas installations /G. Golub, O. Dubrovina// 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.
30. Handreichung. Biogasgewinnung und – nutzung. / [Amon Tomas, fon Bredov Hartvig, Doeler Helmut ets.]. – Gulzow: FNR, 2010. – 234 p.
31. Tasneem Abbasi. Biogas Energy. /T Abbasi, S. Tauseet, S. Abbasi. New York: Springer, 2012. – 169 p.

5. МЕХАНІЗАЦІЯ ЗАГОТІВЛІ ТА ВИКОРИСТАННЯ СОЛОМИ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТРЕБ

5.1. 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 для 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 реалізувати гаряче водопостачання та опалення приміщень. Ці процеси забезпечується автономними 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 традиційним паливом. 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 від 0,1 до 1 МВт. Але широке використання цих технологій потребує вирішення ряду питань організації збору соломи, 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. Менш значимими перешкодами є:

- 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 упродовж 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 не перевищує 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. 5.1.

Таблиця 5.1. Характеристика твердих видів біопалива в залежності від технології їх підготовки до спалювання

Вид соломи	Об'ємна маса (щільність), кг/м ³	Питомий об'єм, м ³ /т	Питома енергомісткість, 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 5.2.

Таблиця 5.2. 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, оскільки забезпечення нею котла ускладнено негомогенною структурою соломи, відносно великою вологістю і великим об'ємом порівняно з вмістом енергії. Більш того, 70 % компонентів соломи, що згорають, 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. 5.1), що містить різнонаправлені технологічні операції (фактори).



Рис. 5.1. Технологічний ланцюг енергетичного використання соломи

5.2. 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 із різним ступенем щільності (табл. 5.3, 5.4).

Малі тюки були найбільш поширеним видом тюків, які використовувались в присадибному господарстві в котлах малої потужності упродовж багатьох років. Основною їх перевагою є можливість переміщення тюків вручну. У 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 5.3. 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 5.4. 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. 5.2.

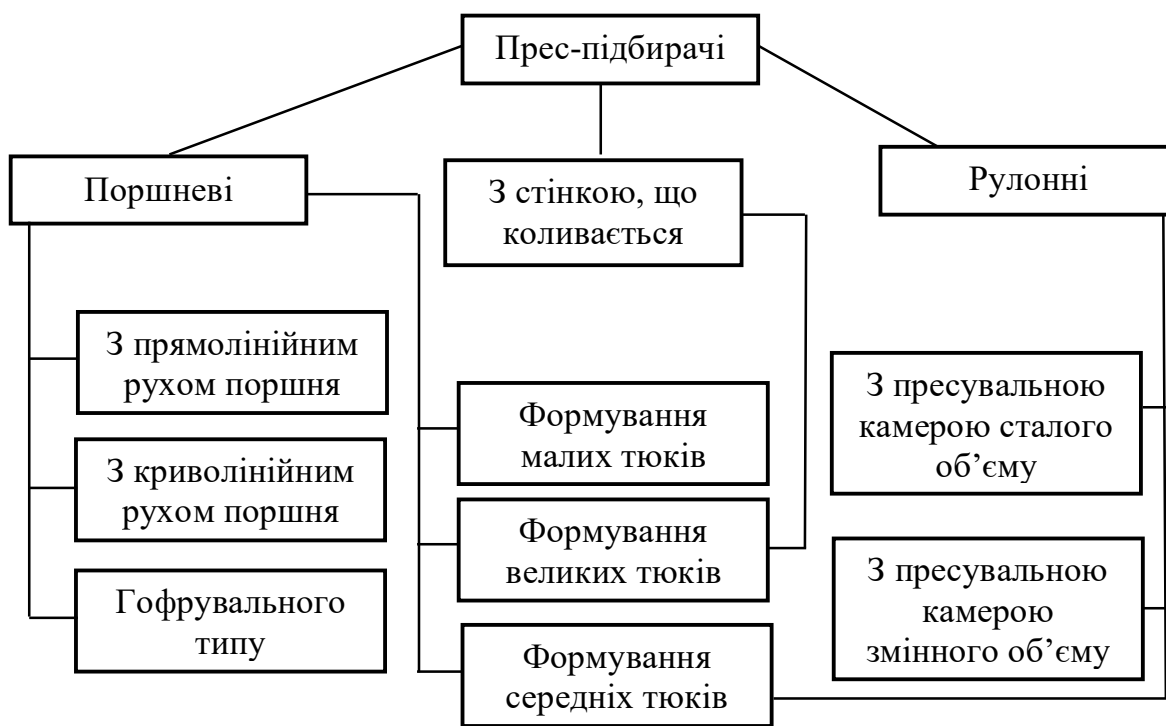


Рис. 5.2. Класифікація прес-підбирачів

Пресування соломи у тюки прямокутної або циліндричної форми успішно застосовується в сучасному сільськогосподарському виробництві і стає однією із 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 “Русхиммаш”, ОАО “Нефаз”, ОАО “Бобруйскагромаш”, ВАТ “Ірпінмаш”, ВАТ “Чернівцісільмаш” та іншими.

Для збирання соломи в малогабаритні тюки використовують прес підбирачі поршневого типу (рис. 5.3), що знайшли широке застосування у малих та середніх аграрних підприємствах.

Для формування тюків середнього типорозміру останнім часом широко використовують рулонні прес підбирачі (рис. 5.4). Це пояснюється простотою конструкції рулонних прес-підбирачів і, відповідно, меншою їх вартістю порівняно із 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.



Рис. 5.3. Прес-підбирач поршневого типу для формування малогабаритних тюків, марки FAMAROL Z-511 (Unia Group)

Водночас дедалі більше користується попитом технологія із застосуванням прес-підбирачів великогабаритних тюків (рис. 5.5).



Рис. 5.4. Прес-підбирач рулонного типу для формування тюків середнього та великого типорозмірів, марки Rollant 250 (Claas)

Після формування тюків, рулонів їх навантажують на транспортні засоби та доставляють до місць зберігання (рис. 5.6).



Рис. 5.5. Прес-підбирач поршневого типу для формування тюків середнього та великого типорозмірів, марки Krone "BigPack VFS1290"



Рис. 5.6. 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 %.

5.3. Технології виробництва паливних гранул та брикетів

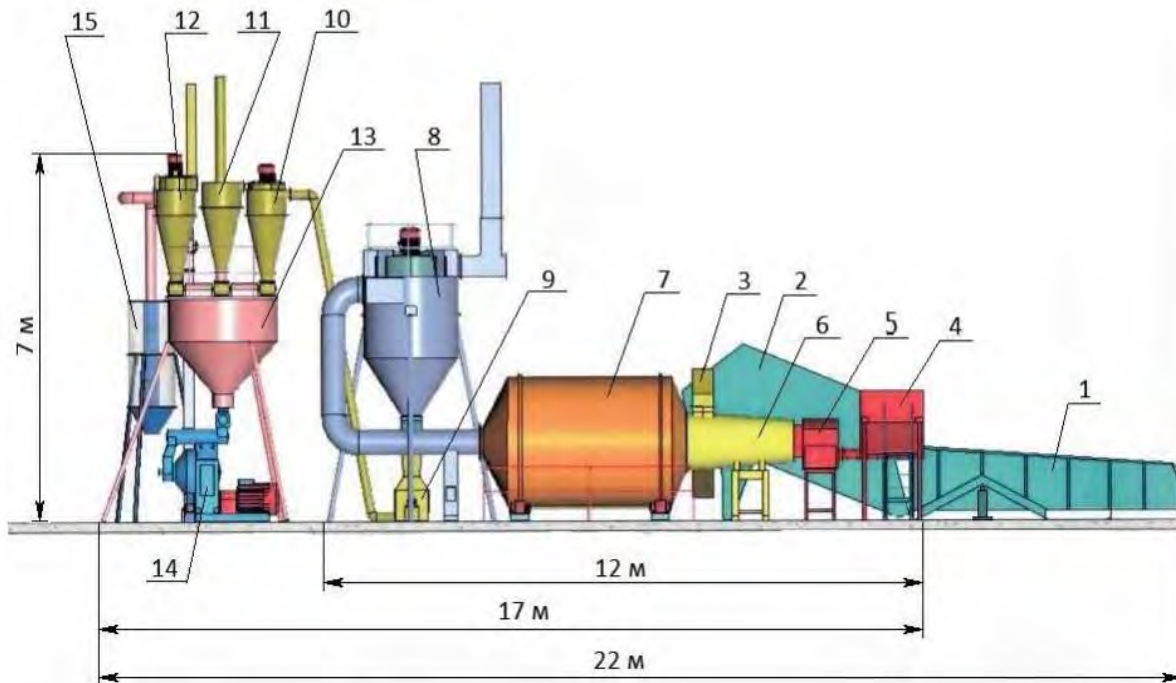
Розвиток технологій та обладнання для виробництва біопаливних гранул та брикетів започаткував створення нових типів котлів з повною механізацією процесу завантаження палива і автоматизацією контролю процесу горіння.

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. 5.7), а також сучасні лінії гранулювання та брикетування біомаси для теплових потреб (рис. 5.8, рис. 5.9).



1 – завантажувач; 2 – живильник; 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. 5.7. Лінія грануляції соломи на базі ОГМ-1,5

Після пропускання через матрицю, пеллети ріжуться на необхідну довжину, і, оскільки в процесі пресування вони нагріваються, їх охолоджують під дією навколишнього повітря в охолоджувачі. У результаті цього вони набувають необхідної твердості та міцності. Перед пакуванням та

складуванням пеллет виконується сепарація, що дозволяє відділити пи́л, дрібні часточки та пеллети, що не мають достатньої механічної міцності.



Рис. 5.8. Лінія гранулювання біомаси ECO-BIO-100 виробництва НУБіП України (Чехія-Україна)



Рис. 5.9. Машина брикетувальна В-80 виробництва ВАТ «Пресмаш» (Україна)

Пакування пеллет залежить від способу їх подальшого транспортування. Пеллети транспортують: насипом; у мішках по 10-20 кг; у 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 або бункери із дозувальними пристроями для заповнення мішків типу «Big-Bag» або агрегат для наповнення малих мішків.

Процес виробництва паливних брикетів і гранул із біомаси включає наступні технологічні операції (рис. 5.10):

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. 5.10. Технологічний процес виробництва пеллет із соломи

Загальний вигляд отримуваних гранул та брикетів наведений на рис. 5.11 та рис. 5.12.

Технологія виробництва паливних брикетів із соломи відрізняється від технології отримання паливних брикетів із тирси відсутністю операції сушіння. Розрізані солом'яні тюки подаються в завантажувальний бункер роторної дробарки. Під дією 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 направляється в прес-брикетувальник де відбувається її пресування. Під дією сили власної ваги готові брикети відламуються і падають у вивантажувальний бункер.



Рис. 5.11. Паливні гранули – пеллети



Рис. 5.12. Паливні брикети

Класифікація машин для виготовлення паливних гранул та брикетів наведена на рис. 5.13.

Оскільки виробництво пеллет в Україні є новою галуззю, яка здебільшого орієнтована на експорт, поширення набули стандарти виробництва пеллет прийняті у Німеччині та Австрії (табл. 5.5).

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 %.

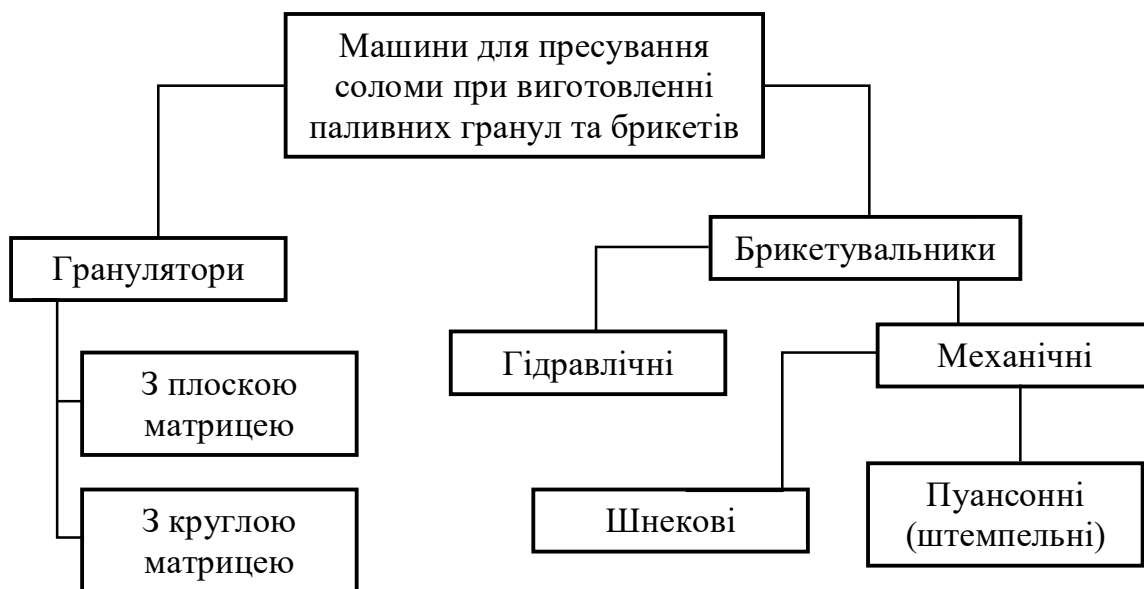


Рис. 5.13. Класифікація машин для виготовлення паливних гранул та брикетів

Таблиця 5.5. 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	менше 50
Густина (щільність)	кг/дм ³	більше 1,12	1,0-1,4
Вміст вологи	%	менше 10	менше 12
Вміст золи	%	менше 0,50	менше 1,50
Теплота згоряння	МДж/кг	більше 18	17,5-19,5
Вміст сірки	%	менше 0,04	менше 0,08
Вміст азоту	%	менше 0,3	менше 0,3
Вміст хлору	%	менше 0,02	менше 0,03
Вміст пилу (стирання)	%	менше 2,3	-
Вміст допоміжних компонентів	%	менше 2	менше 2

Продуктивність лінії гранулювання біомаси ECO-BIO-100 становить 80 кг/год. при встановленій потужності 8,85 кВт. Продуктивність машини брикетувальної В-80 становить 1,20 т/год. при встановленій потужності 40,2 кВт.

5.4. 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 та 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. 5.14), 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. 5.14. 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 також конструкції газогенераторних котлів HERLT для спалювання соломи (рис. 5.15).

На відміну від традиційних твердопаливних котлів, у піролізних (газогенераторних) котлах горить газ, що виділяється із соломи завдяки високій температурі в камері згорання. Під час такого спалювання не утворюється сажа, а утворення попелу зводиться до мінімуму. Котли із піролізним спалюванням

соломи мають високий ККД (до 92 %). Конструкція і принцип роботи котлів дозволяють автоматизувати регулювання їх потужності.

Котли для спалювання соломи виготовляються ізольованими, готовими до експлуатації і вони не вимагають ніяких додаткових робіт, підготовки і будівлі споруд, окрім монтажу фундаменту, димаря та 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 вискоелективні і економічні системи.



Рис. 5.15. 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. 5.16) 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. 5.16. Побутовий універсальний твердопаливний котел фірми DEFRO (Польща)

Великі промислові котли на пеллетах, також оснащені системою автоматичної подачі палива (рис. 5.17). 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 у якості палива брикети, аналогічні котлам в яких спалюють дрова (рис. 5.18).

Проте при спалюванні соломи виникають деякі труднощі, пов'язані із неоднорідністю біомаси, відносно високою вологістю, малим питомим енерговмістом, низькою температурою плавлення золи. Тому в 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. 5.19). У таких котлах є можливість регулювання процесу тепловиділення за рахунок зміни об'ємів повітря, що надходить в робочу зону котла.



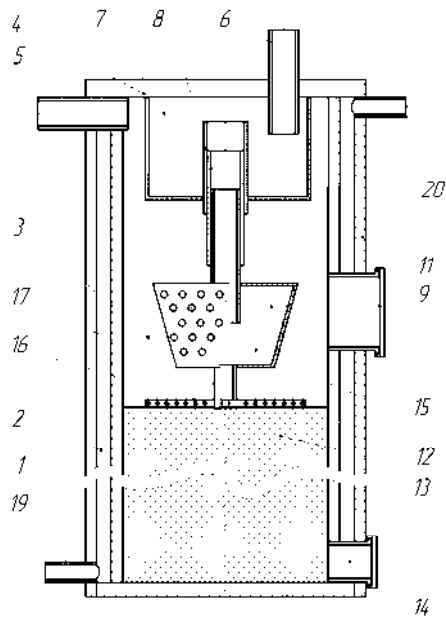
Рис. 5.17. Промисловий котел, що працює на пеллетах



Рис. 5.18. 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, необхідно використовувати автоматичну систему керування подачею повітря в топку, що складається із мікропроцесорного пристрою, датчик температури, встановленого в нагрівну порожнину котла (рис. 5.20) 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. 5.21).



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

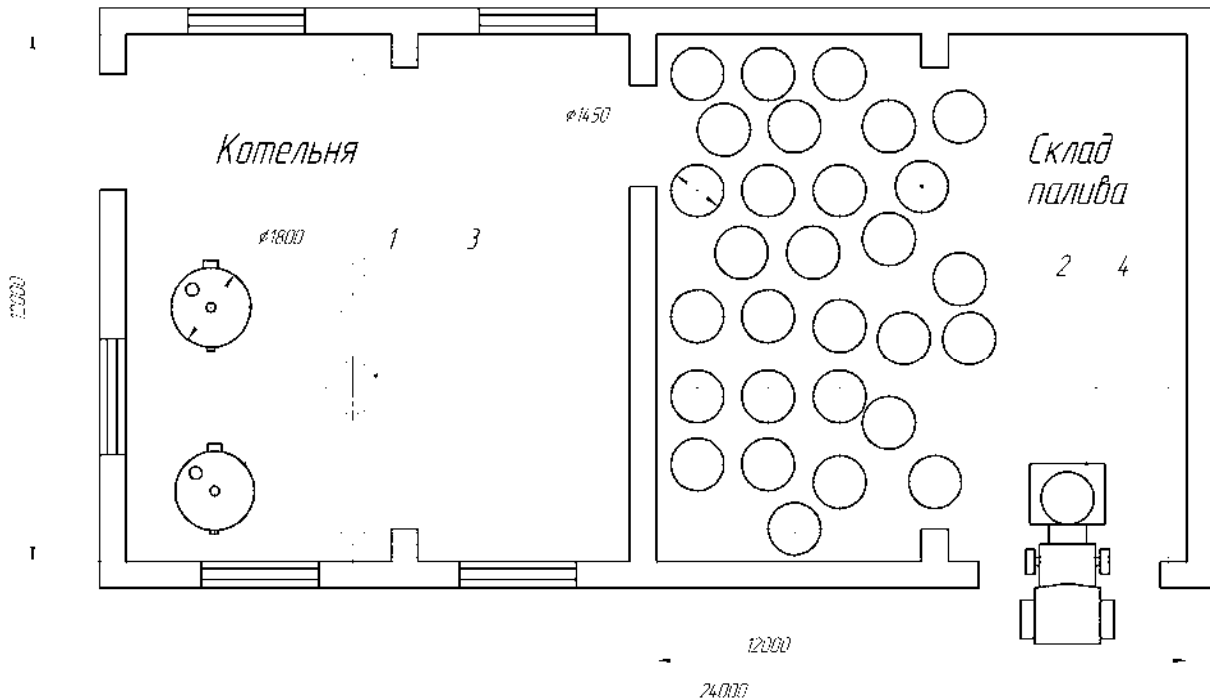
а – схема, б – загальний вигляд

Рис. 5.19. Котел для спалювання соломи із верхнім горінням



1 – вентилятор подачі повітря в топку котла; 2 – мікропроцесорний блок керування; 3 – температурний датчик

Рис. 5.20. Система керування котлом



1 – котел ($P_k=200$ кВт); 2 – рулони 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. 5.21. 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 %.

5.5. Паливні властивості соломи та інших рослинних залишків

Класифікація рослинних залишків аграрного виробництва з метою їх подальшого використання для виробництва теплової енергії наведена на рис. 5.23, згідно з яким усі рослинні залишки поділяються за гранулометричним складом, насипною щільністю, вмістом вологи, етапом утворення і т.д. Придатність сировини до використання в енергетичних цілях оцінюється за паливно-технологічними характеристиками, а саме: реактивною здатністю, щільністю, механічною міцністю, вмістом смолистих речовин, здатністю до спікання, розміром частинок палива на її основі, вологістю, зольністю, вмістом сірки, парусністю, теплотворною здатністю в одиниці об'єму.

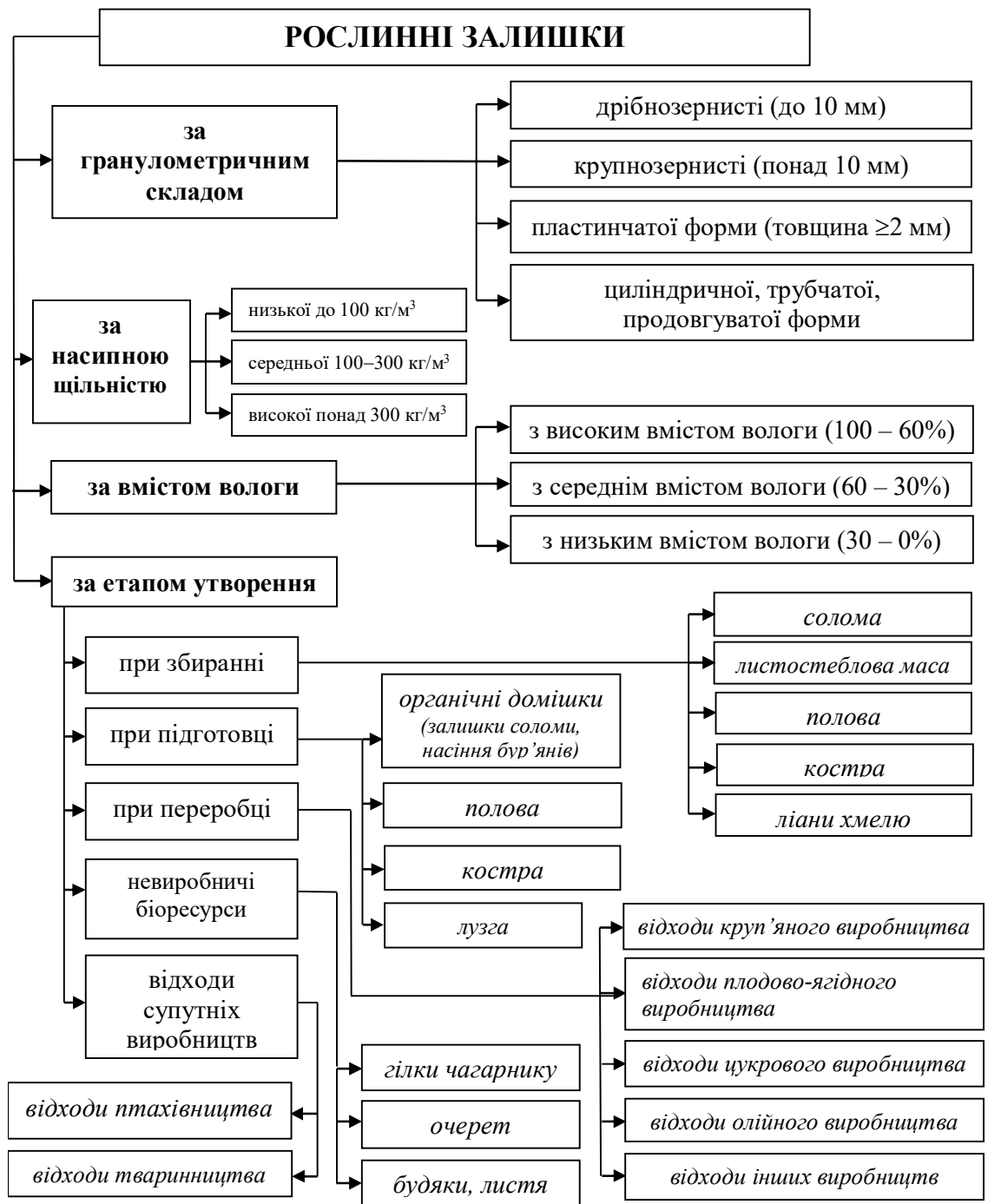


Рис. 5.22. Сировина аграрного виробництва, яка може бути використана для виробництва генераторного газу

Вологість соломи при збиранні зернових може сягати 60 %, а при її тимчасовому зберіганні під накриттями, приймає значення рівноважної вологості: 8-14 % влітку і до 22 % в зимовий період.

Вміст летючих в соломі дещо нижчий ніж у деревини (85 %), але достатньо високий (70-80 %), тому вона досить легко запалюється і горить. Зольність соломи становить 6,5 %. Первинна солома відноситься до IV класу якості – незадовільного, через низьку насипну щільність (у непересованої

соломи насипна щільність становить 30-40 кг/м³). Попередня підготовка соломи до використання в теплотехнічному обладнанні, наприклад різання на січкарях і створення на її основі поліфракційних сумішей, або виробництво з соломи паливних брикетів і гранул підвищує її щільність. Щільність поліфракційних сумішей з соломи-січки складає від 120 до 160 кг/м³, гранул – від 580 до 650 кг/м³.

Потенціал доступної соломи зернових на енергетичні потреби оцінюються не лише її кількістю, територіальним розташуванням, а також її хімічним складом ($C - 46\%$; $H - 5,9\%$; $N - 0,5\%$; $O - 40\%$; $S - 0,08\%$; $Cl - 0,31\%$) та сезонністю збирання врожаю, яка залежить від виду зернової культури, часу її досягання, географічного положення господарства, кліматичних умов і є вагомим фактором при плануванні її подальшої переробки і використання. Наприклад, солома, зібрана в ранні жнива, містить у 4 рази більше хлору, ніж зібрана у більш пізні періоди жнив. Вміст хлору в соломі досягає 1% і є причиною корозії елементів вузлів поверхонь нагрівання теплотехнічного обладнання.

Теплота згоряння горючої маси брикетів і гранул з соломи становить від 16,5 до 18,8 МДж/кг, що майже відповідає теплоті згоряння брикетів і гранул з деревини (16,8-21 МДж/кг) і кам'яного вугілля (15-25 МДж/кг) і залежить від агротехнічних характеристик зернових культур, впливу параметрів довкілля, умов зберігання, вологості. Аналіз цифрових значень теплоти згоряння різних видів сільськогосподарської рослинної сировини з метою її подальшого використання в енергетичних цілях наведено в таблиці 5.6.

Солома зернових має наступний склад летючих: водень (H_2), окис вуглецю (CO), вуглекислий газ (CO_2), азот (N_2), вуглеводні (C_nH_m). При спалюванні палива з високим вмістом летючих слід забезпечити достатній об'єм топкових камер відповідних теплотехнічних пристроїв для забезпечення їх утилізації і підвести необхідну кількість повітря для попередження хімічної і механічної неповноти згоряння. Усі види рослинної сировини, окрім соломи, мають порошкоподібний коксовий залишок, тому з метою його усунення використовують традиційні засоби усунення шлаку і золи (шурувальна планка). Солома має спечений або пористий коксовий залишок, що вимагає розробки спеціальних конструкцій колосникових решіток та механізмів збирання і виведення коксу і золи з топки (табл. 5.7).

Температура плавлення золи залежить від речовин, що входять до її складу: тугоплавка (вапно, глинозем, кремнезем) – 1520-1825⁰С; середньоплавка – 1180-1425⁰С; легкоплавка – 1025-1225⁰С. Солома зернових має низьку температуру плавлення (температура початку шлакування 1110-1160⁰С) і схожа на щільну пастоподібну масу. При виході з зони високих температур, як правило, заповнює собою отвори колосникових решіток, чим підвищує опір теплотехнічного обладнання і зменшує газопроникність палива.

Важливими характеристиками золи є швидкість рекристалізації (шлаки швидко кристалізуються і застигають або застигають повільно, утворюючи склоподібну масу) і протяжність зони плавлення (інтервал між температурами плавлення і розтікання).

Таблиця 5.6. Зольність та теплота згоряння залишків сільськогосподарських культур

Рослинні залишки	Зольність сухої маси, %	Вища теплота згоряння Q_{H^P} сухої маси, МДж/кг	Нижча теплота згоряння Q_{H^P} при вологості $W^P=20\%$, МДж/кг	Розрахункова формула для Q_{H^P} , МДж/кг
Житні	4,5	17,0	13,6	$15,309 - 0,1781W$
Пшеничні	6,5	17,8	13,5	$16,261 - 0,1876W$
Ячмінні	4,5-5,9	17,4	13,4	$16,914 - 0,1941W$
Вівсяні	4,9	16,7	12,9	$16,261 - 0,1876W$
Солома у середньому	5,0	17,4	13,5	–
Лузга проса	7,0	17,8	16,86 при вологості 7,5%	$339 \cdot C^P + 1030 \cdot H^P - 109 \cdot (O^P - S^P) - 25W^P$
Лузга соняшника	5,0	19,3	14,6	$339 \cdot C^P + 1030 \cdot H^P - 109 \cdot (O^P - S^P) - 25W^P$
Рапсова солома (ріпак)	5,9	17,0	16,0	$17,520 - 0,2002W$
Стебла та початки кукурудзи	4,6	18,0	16,5	$16,261 - 0,1876W$
Льонокостра	6,0	21,0	19,6	$339 \cdot C^P + 1030 \cdot H^P - 109 \cdot (O^P - S^P) - 25W^P$
Брикети із соломи	4,0	18,8	16,5	–

Таблиця 5.7. Характеристика коксового залишку і вмісту летючих у сільськогосподарській рослинній сировині

Вид рослинної сировини	Характеристика коксового залишку	Вміст летючих в паливі, %	Температура початку процесу утворення летючих, °С
Солом'яні брикети	порошкоподібний	до 80	145 – 165
Кукурудзяні стержні і початки	порошкоподібний	73 – 80	115 – 135
Солома-січка зернових	порошкоподібний, спечений, пористий, початкової форми	77 – 82	125 – 145
Соняшникова лузга	порошкоподібний	75 – 80	165

Усі перелічені характеристики золи залежать від розмірів, виду і якості частинок палива, максимальної температури в зоні горіння; питомого тепловиділення, тривалості вигорання, температури газів за газовим трактом і на виході з відповідного теплотехнічного обладнання; температури поверхонь

нагрівання та ін. Дані про температуру плавлення золи і зольність рослинної сировини приведені в таблиці 5.8.

Таблиця 5.8. Температура плавлення золи і зольність рослинної сировини

Вид сільськогосподарської рослинної сировини	Вища теплота згоряння сировини, МДж/кг	Зольність сировини, %	Температура шлакування		
			Температура початку деформації, °С	Температура розм'якшення, °С	Температура розтікання, °С
Кукурудзяні стержні і початки	18,0	4,6	1190-1250	1250-1320	1320-1370
Солома-січка зернових	17,4	5,0	1110-1160	1180-1240	1250-1310
Солом'яні брикети	18,8	4,0	1150-1200	1210-1270	1270-1340
Соняшникова лузга	19,3	4,0	1170-1220	1220-1230	1230-1340

Порівняння теплотворних та екологічних властивостей брикетованої та гранульованої соломи з традиційними видами палива, свідчать на користь соломи. Солом'яні брикети та гранули мають теплоту згоряння 18,8 МДж/кг майже рівну теплоті згоряння кам'яного вугілля ~25 МДж/кг, але істотно нижчий вміст сірки (0,2 %) і золи (4 %) в порівнянні з кам'яним вугіллям (вміст сірки – 3 %, золи – 35 %).

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 для 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. 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.
3. Голуб Г.А. Теплоота 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.
4. Дослідження енергетичної ефективності котлів із верхнім горінням / Г. А. Голуб, С. М. Кухарець, О. Я. Переходько [та ін.] // Техніко-технологічні

аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України / ДНУ УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого. – 2015. – Вип. 19 (33). – С. 283-288.

5. Ефективність використання установки для виробництва паливних брикетів із рослинної сировини / Субота С.В., Голуб Г.А., Степаненко С.П., Лук'янець В.О. // Механізація та електрифікація сільського господарства. – Глеваха, 2012. – Вип. 96. – С. 437-444.

6. Кухарець С.М. Підвищення енергетичної автономності агроecosистем. Механіко-технологічні основи: монографія / С.М. Кухарець – Житомир: ЖНАЕУ, 2016. – 192 с.

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. Кухарець С.М. Використання біомаси сільськогосподарського походження як джерела теплової енергії / С.М. Кухарець, Г.А. Голуб, О.Я. Переходько // Агро 1. Приложение к журналу «AgroOne». – 2016. - №2. – С. 14-15.

10. Марус О.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 – К., 2016. – Вип. 241. – 396 с. – С. 380-387.

11. Пат. 105346 Україна, МПК F24H1/10, F23B60/00. Котел водогрійний для спалювання рослинної біомаси /Переходько О.Я., Голуб Г.А., Дубровін В.О., Дімітров 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.

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. 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.

14. M.W. Vis, D. van den Berg. Biomass Energy Europe Harmonization of biomass resource assessments. Volume I. Best Practices and Methods Handbook. – November 2010. – 220 p.

6. ВИРОЩУВАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР

6.1. 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 прутноподібне);

– 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).

Зазначені високопродуктивні групи рослин не потребують особливих матеріально-технічних затрат на виробництво сировини, характеризуються можливістю багаторазового скошування надземної біомаси протягом вегетаційного періоду, високою здатністю до розмноження насінням або вегетативним шляхом, стійкістю до шкідників, хвороб та бур'янів та економічною ефективністю.

В Україні використання енергії біомаси поки-що перебуває в зародковому стані, хоча умови для її освоєння (особливості клімату, потенціал аграрного сектору, наявність робочої сили та площ) досить сприятливі.

Аналіз біологічних ресурсів для виробництва біопалива в Україні має великий потенціал. На сьогоднішній день в Україні створена одна з найбільших колекцій нових та малопоширених енергетичних рослин для виробництва біопалива яка включає близько 200 таксонів які за енергетичним потенціалом забезпечують великий вихід умовного палива та енергії.

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. 6.1).

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.



Рис. 6.1. Плантація міскантусу

У Європі площа вирощування міскантусу 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 міскантусу (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 міскантусу складає 10-15 т/га в сухій масі.

Верба прутувидна (*Salix viminalis*). Верба прутувидна має кущ або дерево від 3 до 5 м заввишки. Гілки прямостоячі, прутувидні. 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 прутовидна) та похідні від неї. Для цього можна використовувати інші види: *Salix rigida*, *Salix amygdalina*, *Salix pentandra*, *Salix dasyclados* тощо. Вербу прутовидну (рис. 6.2) можна вирощувати на різних типах ґрунтів. Проектуючи закладання плантації верби прутовидної, 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. На сухих ґрунтах приріст може зменшитись до 50 %. Наприклад для обігрівання приватного будинку площею від 100 до 200 м² потрібно від 3 до 5 т такого біопалива на сезон.



Рис. 6.2. Верба прутовидна

Сильфій пронизанолистий (*silphium perfoliatum*). Сильфій – один з представників високотравної рослинності північноамериканських прерій. Природний її ареал проходить широкою смугою вздовж південного кордону східній частині Канади. Клімат тут континентальний, але досить вологий. Рослина зустрічається на родючих ґрунтах долин і річок, по берегах озер. Рослина має значну пластичність і може вирощуватися в різних ґрунтово-кліматичних умовах.

За ботаніко-морфологічною характеристикою сильфій пронизанолистий це кореневищна рослина родини айстрових. Коренева система потужна, складається з потовщеного головного кореня і численних бічних. Стебло пряме, чотиригранне, порожнисте, висотою до 1,8-4 м. Листя видовжено-еліптичне, загострене, зубчасте, довжиною до 30-35 см і шириною до 15-25 см. Суцвіття – кошик діаметром 3-8 см, квітки яскраво-жовті.

Плід – подовжено-серцевидна, сплюснута коричнева сім'янка. Маса 1000 насінин – 18-20 г.

Подібно соняшнику, сильфій пронизанолистий в XVIII столітті був завезений з Америки до Європи, де незабаром знайшов широке застосування в ландшафтних садах і парках Німеччини, Австрії та Швеції.

Відрізняючись красою форми, багаторічністю і тривалим цвітінням, рослина і в даний час успішно використовується в різних цілях. 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.

Сильфій пронизанолистий відноситься до багаторічних трав'янистих рослин полікарпиків.

Великий життєвий цикл рослини складається з циклів розвитку монокарпичних пагонів, що утворюються в підземній частині щорічно відмираючих стебел. Тривалість розвитку кожного пагону, починаючи з другого року життя рослини, триває 8-10 місяців.

Сильфій відноситься до рослин озимого типу розвитку. У перший рік життя утворюються тільки розеткові проростки і інтенсивно розвивається коренева система. У генеративну фазу рослини вступають з другого року.

Навесні сильфій відростає порівняно рано. Після утворення 12-15 розеткових листків починають рости генеративні стебла. Від відростання до стеблуння проходить 25-30 днів. З цього часу ріст сильфію посилюється і до фази бутонізації добові прирости досягають 4-5 см. Ріст стебла триває до масового цвітіння. При скошуванні рослин в фазі бутонізації або на початку цвітіння з пазушних бруньок нижніх листків знову утворюються репродуктивні пагони, які і формують урожай.

Тривалість цвітіння кожного кошика – 7-15 днів. Насіння дозріває протягом 35-40 днів. Від початку вегетації до дозрівання проходить 150 днів.

Важливий період в житті рослини – закладка бруньок відновлення. Бруньки починають закладатися в підземній частині генеративних пагонів з другої половини літа. Восени з них виростають бокові пагони, що дають розетку листя. Цикл розвитку бічних пагонів знову повторюється. Окремі бруньки починають рости і формують розетку листя тільки навесні. Максимальної продуктивності рослини досягають на третій-четвертий рік життя.

Оптимальною температурою для росту рослин є 10 ... 15 °С. У цих умовах при наявності вологи спостерігаються найбільший приріст зеленої маси.

Рослина переносить весняні заморозки 4 ... 5 °С. Восени вегетує до випадання снігу і не пошкоджується заморозками 5 ... 6 °С. Листки відмирають при 7 ... 8 °С. Рослина має порівняно високу морозостійкість.

Сильфій вимогливий до інтенсивності освітлення. У природних умовах займає перший ярус високотравних асоціацій. При нестачі світла рослини сильно пригнічуються.

Сильфій відноситься до вологолюбних рослин і є типовим мезофітом. Переносить 10-15-денні затоплення. Підвищені вимоги до вологи, мабуть, обумовлені поверхневим розподілом кореневої системи у ґрунті. При нестачі вологи зростання сильфію сповільнюється. У порівнянні з іншими багаторічними культурами сильфій найбільш чутливо реагує на ґрунтову і повітряну посухи.

В умовах Лісостепу та Полісся України сильфій росте від 2,3 до 3 м заввишки. Стебло пряме, добре облистяне, товсте, чотири- і шестигранне (рис. 6.3).



Рис. 6.3. Сильфій пронизанолистий

Сорго (*Sorghum*) (рис. 6.4.) відомо вже кілька тисячоліть. Центрами його походження вважають Індію і Китай, звідки воно було завезено в інші країни. В Африці, Китаї та Індії сорго вважалось хлібним злаком, так як саме з нього робили борошно і пекли хлібні коржі. Сьогодні сорго має більш широке використання як фуражна культура, яка чудово замінює кукурудзу, джерело виробництва біоетанолу, виготовлення паперу тощо.

До 1980-х років в Україні сорго всіх видів (цукрове, віничне, зернове) активно використовувалося в раціонах годівлі сільськогосподарських тварин, птиці та риби. Вже з початку 90-х виробництво сорго впало. У 1990 році в Україні було вироблено 24 тис. тон, а у 1995 – лише 9,3 тис. тон.

За останні роки сорго стає все більш популярною культурою в Україні через високу посухостійкість й стабільний попит на експорт. На даний час в

Україні поширені два види культурного сорго: сорго звичайне (*S. vulgare Pers.*) і сорго трав'янисте або суданська трава (*S. sudanense Pers.*).

Сорго (*Sorghum*) – рід одно- та багаторічних рослин родини тонконогових, що охоплює до 50 дикоростучих і культурних видів, поширених переважно в тропічних і субтропічних країнах. За біологічними особливостями сорго – теплолюбна і посухостійка культура. Добре переносить не тільки ґрунтову, а й повітряну посуху та суховії. Висока посухостійкість цієї культури визначається сильно розвинутою кореневою системою, високою здатністю вбирати вологу і особливістю асиміляційного апарату. Робота листового апарату сорго поновлюється одночасно з тургором листя навіть після 12-14 днів посухи, в той час як у кукурудзи асиміляційний апарат ушкоджується після семиденної посухи.

Листки і стебло сорго покриті восковим нальотом, що зменшує випаровування. На формування одиниці врожаю сорго використовує в 1,5-2,0 рази менше води, ніж інші зернові культури, що дає йому великі переваги при вирощуванні в зоні з обмеженими ресурсами вологи.

Насіння сорго починає проростати за температури 10-12 °С, оптимальна температура розвитку – 32-35 °С. Молоді рослини його пошкоджуються навіть короточасними незначними приморозками. Сорго – рослина короткого світлового дня. Воно більш посухостійке, ніж кукурудза. Хоча сорго і посухостійка рослина, однак в умовах зрошування врожайність його значно підвищується. Сорго маловибагливе до родючості ґрунту. Врожайність його на піщаних і засолених ґрунтах у посушливих районах та на легких чорноземах і важких глинистих ґрунтах значно вища, ніж інших кормових культур. Дикоросле сорго або сорго алепське (*Sorghum halepense (L.) Pers.*) поширене як багаторічний коренопаростковий бур'ян у Середній Азії і Закавказзі, є карантинним видом України. Основну шкоду сорго алепське завдає своєю потужною кореневою системою, яка дуже ускладнює якісний обробіток ґрунту. При значній засміченості, очистити поля від кореневищ практично неможливо. Сорго алепське - рослина отруйна, молоді пагони містять отруйні ціаністі сполуки, які можуть викликати отруєння і навіть падіж худоби. Має стійкість до хворіб і шкідників.

Коренева система сорго мичкувата, сильнорозвинена, проникає в ґрунт на 150-200 см. На рослинах утворюються повітряні корені. Завдяки доброму розвитку кореневої системи сорго росте на різних типах ґрунтів, наприклад на солонцях.

Стебло тонше, ніж у кукурудзи. Залежно від сорту та умов вирощування висота його буває від 1 до 3 м. У тропічних районах висота рослин досягає 6-7 м. Стебло заповнене серцевиною, куциться, утворюючи до 5-6 гілок. Листки широкі (на одній рослині їх буває від 10 до 50), вкриті восковим нальотом. Суцвіття – волоть. Сорго – перехреснозапильна рослина, проте в посушливих районах можливе і самозапилення.

Зерно сорго плівчасте або голе, округлої, яйцеподібної чи видовженої форми, різного кольору – біле, жовте, червоне, буре. Маса 1000 зерен 25-40 г і більше.

Останнім часом вирощування цієї культури є досить актуальною темою, адже зростає зацікавленість до переробки сорго цукрового окрім прямого використання на кормові і харчові цілі для отримання цукровмісних продуктів (цукру, харчового сиропу, меду) так і після видалення соку та після збирання зерна рештки сорго за окремих умов, можуть використовуватись як альтернативне джерело для виробництва твердого біопалива (біобутанолу, біогазу, паливних пелет, біосингазу, біонафти тощо), адже врожайність сорго по біомасі сягає 20-25 т сухої маси на гектар. При вологості 15-20% енергетична цінність під час спалювання залишків сорго становить 10-12 МДж/кг. Поліпшити енергетичні показники залишків біомаси дозволяє використання технологій гранулювання та брикетування.



Рис. 6.4. Сорго

Пенсільванська мальва (*Pennsylvania fiscellam*). Батьківщина цієї потужної, високорослої (до 4 м) багаторічної рослини з кленовидними листками – Північна Америка. У природних умовах цей вид мальв добре росте на затоплюваних берегах річок, по узбіччях доріг, на піщаному і навіть кам'янистому ґрунті. Високобілкова зелена маса сіди використовується як корм для худоби, для отримання цукру (51,9% сахарози). Крім того, це лікарська і медоносна рослина. 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 її зеленої маси становить від 40 до 100 т/га.

Всі форми і сорти сіди можуть рости на одному місці до 20 років, створюючи багаторічні плантації. Рослини високорослі, в висоту стебла досягають 250-400 см. Експлуатацію плантацій можна починати з другого року життя рослини. Стебла прямостоячі, дуже стійкі та не вимагають підв'язки.

До кінця вегетації стебло мальви грубіє і дерев'яніє. На ньому налічується в середньому 45-46 вузлів, на яких починаючи з 11-20 вузла знизу формуються бічні пагони першого порядку. Завдяки різному співвідношенню розмірів бічних пагонів і куту розміщення на основному пагоні змінюється габітус рослин – від компактного до розгалуженого.

Сіда морозостійка, іноді після перших сильних заморозків рослина відмирає, але по весні знову відростає, тому що бруньки відновлення зимують нижче поверхні ґрунту. На початку осінніх заморозків потовщені багаторічні корені разом з основою стебла втягуються в ґрунт. Навесні після сходу снігу і з підвищенням температури до +5 °С бруньки відновлення починають розвиватися, і в першій декаді квітня пагони виходять на поверхню. Далі рослина розвивається нормально, формує повноцінний урожай надземної маси і фізіологічно зрілого насіння.



Рис. 6.5. Пенсільванська мальва

У перший рік онтогенетичного розвитку рослин формуються окремі органи багаторічного організму. Незважаючи на це, сіда встигає сформувати значну кількість надземної фітомаси, особливо з фази стеблунання і до періоду бутонізації. Саме в цей час вона нарощує біомасу більше 7 т/га. На цьому етапі її розвиток в перший рік життя завершується. На другий і наступні роки життя сіда істотно збільшує урожай надземної маси у всіх фазах розвитку, практично на 200%, і досягає максимуму в фазі плодоношення.

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.

6.2. 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. 6.6). 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. 6.7).



Рис. 6.6. Висаджування саджанців енергетичної верби за допомогою спеціальної саджалки

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.

У природно-кліматичних умовах України оптимальна кількість саджанців верби, висаджена на одному гектарі, становить 28-40 тис. штук, хоча для різних потреб їх кількість може становити від 15 до 50 тис. дерев.



Рис. 6.7. Висаджування кореневищ міскантусу за допомогою картоплесаджалки

Важливо вчасно та якісно провести операції з догляду за посадками на плантації, адже площі з пагонами швидко заростають бур'янами, до яких верба слабо конкурентна в період укорінення та відростання пагонів. Догляд має за мету знищення бур'янів, покращення аерації ґрунту і затримання в ньому вологи. Кількість доглядів за вегетаційний період залежить від зараженості плантації насінням та кореневищами бур'янів, лісо рослинних умов, погоди, а також від віку насадження. За перший вегетаційний період рекомендується проводити не менше п'яти доглядів. У наступні роки кількість доглядів зменшується і проводяться вони у міру необхідності Рослини верби стають надзвичайно конкурентними щодо бур'янів навіть після зрізування на переробку, оскільки пагони стрімко розвиваються завдяки добре розвиненій кореневій системі, тому приблизно з четвертого року вирощування догляди

зводяться до одноразового механізованого догляду, що проводяться на весні, поки не відросли пагони в зрізаних в осінньо-зимовий період рядах.

При механізованому способі висаджування міскантусу 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.

Частину енергетичних культу, 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.

Посів сорго проводять на глибину 3,5 см (максимально до 7 см на легких ґрунтах) у вологий ґрунт, і чітко дотримуються щільності посіву 160-200 тис. насінин на гектар (для отримання кінцевої щільності 120 тис./га). Ширина міжрядь залежить від техніки, яку використовують і може становити 21-70 см в залежності від умов вирощування культури. В той же день проводять і обприскування ґрунтовими гербіцидами (Примекстра Голд 3,5 л/га,) для боротьби зі злаковими однорічними та дводольними однорічними бур'янами. Боронування середніми боронами проводять з метою заробки гербіцидів в ґрунт та розрихлення верхнього шару для закриття вологи. На 3-7-й день проводять повторне боронування легкими або пружинними боронами для знищення кірки на поверхні ґрунту (закриття вологи) та боротьби зі сходами бур'янів.

Для деяких видів енергетичних культур необхідно проводити міжрядні обробітки за допомогою міжрядних культиваторів.

Для мальви, як багаторічної культури, особливе значення має підготовка поля перед засадженням плантації. Першим кроком є забезпечення рівномірності висіву насіння, їх кількості із врахуванням схожості. Молоді рослини мальви для нормального росту потребують багато світла, і тому дуже вразливі перед бур'янами. Поле під посів має бути прокультивоване і не покрите кіркою. До розробки надійних і ефективних методів хімічної боротьби з бур'янами не слід вживати ніяких заходів. У наступні роки бур'яни вже не такі небезпечні, оскільки мальва розвивається великою зеленою масою, та ефективно сама їх знищує. Пенсільванська мальва може однаково розмножуватися як генеративно (через насіння), так і вегетативно та через різні частини рослини: саджанці, листя, коріння.

Посів є одним з найважливіших прийомів при вирощуванні мальви. Оптимальними строками посіву пенсільванської мальви є квітень місяць. Широка відстань між рядками (60-70 см) полегшує процедуру обробітку в наступні роки. Насіння можна також висіювати в березні в розсадниках, або на піддонах і висаджувати в квітні або в травні. З огляду на невеликі розміри насіння, глибина їх посадки не повинна перевищувати 1-1,5 см.

Можливий висів насіння при використанні звичайних зернових або бурякових сівалок з нормою висіву 5-6 кг/га. Висіваючи мальву за допомогою зернової сівалки, потрібно раніше вимішати насіння з тирсою або іншим подібним матеріалом з метою рівномірного посіву дрібного насіння. Поява на

ринках нової сільськогосподарської техніки створює також і інші можливості правильного посіву мальви.

Збирання врожаю міскантусу 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. 6.8).



Рис. 6.8. Скошування та тюкування трав'янистих енергетичних культур

При прямому способі збирання використовуються самохідні кормозбиральні комбайни, аналогічні комбайнам для збирання кукурудзи на силос (рис. 6.9). Такі машини зрізають 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.

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 причеми чи вантажні автомобілі (рис. 6.10).



Рис. 6.9. Збирання трав'янистих енергетичних культур кормозбиральним комбайном

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 використанні для отримання різних видів біопалива, а в подальшому теплової та електричної енергії (рис. 6.11).

Збір мальви на насіння можна поєднати із збором стебел, призначених на енергетичні цілі. Період збору досить тривалий і залежить від кліматичних умов; стану ґрунту, обумовленого використанням машин і т.д. Оптимальним терміном збору вважається кінець вересня-жовтня (після перших заморозків).

Навіть при дуже пізньому терміні збору (грудень) можна не хвилюватися про великі втрати врожаю насіння завдяки їх слабкому обсіпанню. Грудневий термін збору стосується вирощування мальви наприклад, на місцях з достатніми опадами, або на території так званих лагун, в яких збираються стічні води. У таких умовах використання машин для збору стебел мальви можливе лише після того, коли підмерзне ґрунт.

Основні характеристик деяких видів енергетичних рослин наведено в таблиці 6.1.



Рис. 6.10. Механізоване збирання деревовидних енергетичних культур

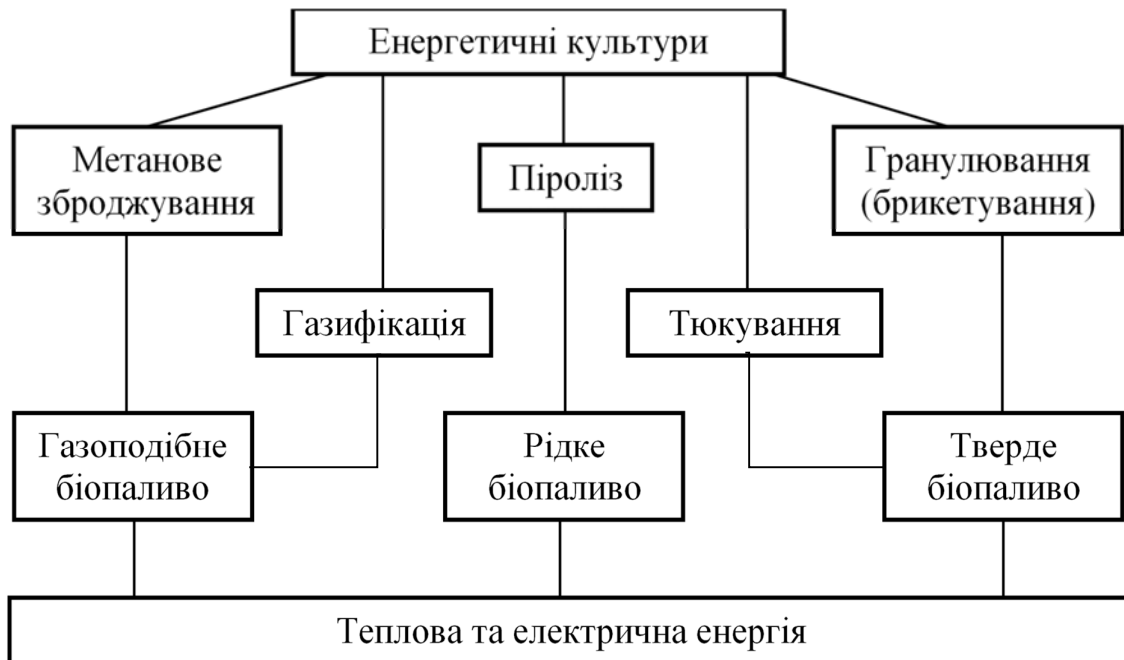


Рис. 6.11. Способи використання енергетичних культур в аграрному виробництві

Таблиця 6.1. 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 збільшенні від 3 тис. га в 2014 році до 200 тис. га в 2020 році.

6.3. Паливні характеристики деревини

Деревина відрізняється невисоким вмістом золи, причому остання має високу температуру плавлення. Це має важливе значення при експлуатації котлів звичайної конструкції. Схема класифікації деревного палива за походженням наведена на рис. 6.13.

На процес горіння значний вплив чинять вологість деревини, розмір та однорідність шматків, від чого залежить теплотворна здатність палива.

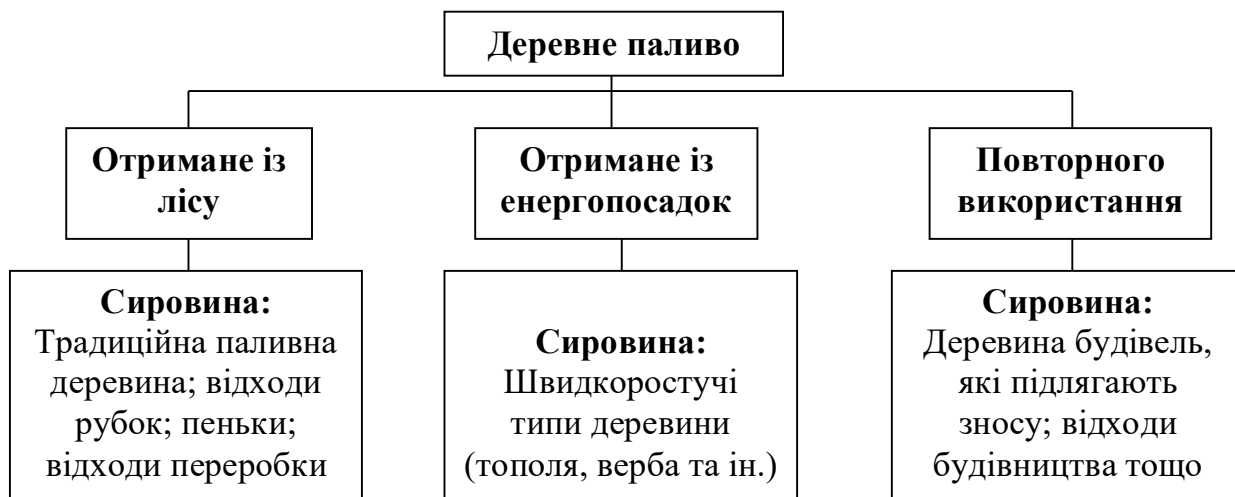


Рис. 6.13. Класифікація деревного палива на типи за походженням

Як і усі види твердих біопалив, деревина складається з горючої частини та баласту, який утворюється вологою та золою. Горюча частина (без вологи) і зола утворюють суху масу палива.

Елементарний склад деревини у % на суху масу наведено в таблиці 6.2. До елементарного складу деревного палива входять три основні хімічні компоненти: вуглець (*C*), водень (*H*) та кисень (*O*), утворюючи в сумі біля 99 % сухої маси, решта – азот (*N*), сірка (*S*) та важкі метали.

Таблиця 6.2. Елементарний склад деревини

Елемент, % на суху масу	Деревина	Кора
C	48 – 50	51 – 66
H	6,0 – 6,5	5,9 – 8,4
O	38 – 42	24,3 – 40,2
N	0,5 – 2,3	0,3 – 0,8
S	0,05	0,05
Cl	<0,01	0,01 – 0,03

Вміст золи, вологи, летючих речовин та зв'язаного вуглецю у паливі виражається кількома методами:

- у % на горючу масу – беззолну суху масу (індекс *Г*);

- у % на суху масу (індекс C);
- у % на робочу масу вологого палива (індекс P).

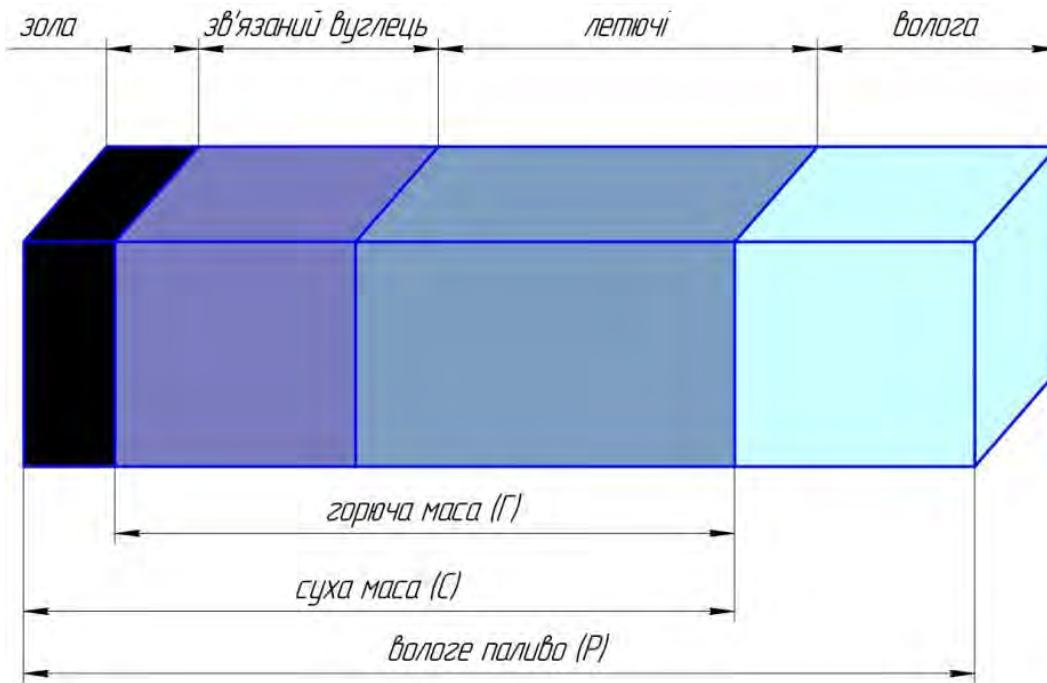


Рис. 6.13. Компонентний склад твердого палива

Оскільки вміст води в паливі є величиною змінною, то вміст золи та летючих в паливі в довідкових таблицях зазначають у % на суху масу.

Зольність робочої маси та сухої пов'язана співвідношенням:

$$A^C = A^P \cdot 100 / (100 - W^P) \quad (6.1)$$

де A^C , A^P – зольність палива, %.; W^P – відносна вологість палива, %.

Відносна вологість палива розраховується за формулою:

$$W^P = \frac{g_1 - g_2}{g_1} \cdot 100\% \quad (6.2)$$

де g_1 , g_2 – маса палива до і після висушування відповідно, кг.

Вологість деревини залежить від різних факторів таких як: пора року, регіон вирощування, вид дерева та ін. Цікаво, що вологість різних частин дерева також відрізняється. Так, наприклад, якщо розглядати сосну, то вологість на робочу масу складає: стовбур – від 45 до 50 %; гілки – від 50 до 56 %; верхівка – 60 %; кора – від 36 до 67 %.

Під час сушіння, в першу чергу, з матеріалу видаляється вільна вода, потім – клітинна, випаровування якої змінює фізичні властивості матеріалу. Матеріал зменшується в об'ємі, тобто дає усадку. Під час сушіння в польових умовах вологість деревини сягає від 20 до 25 % і такий матеріал називається повітряно-сухим. Сушіння забезпечує стан зрівноваженості вологості матеріалу з вологістю навколишнього середовища. При температурі від 18 до 22 °C в закритих приміщеннях деревина висихає до вологості від 8 до 15 %, такий стан є кімнатно-сухим.

Вимірювання вмісту летючих речовин здійснюється за стандартизованою методикою, яка полягає в нагріванні проби палива на повітрі до $(900 \pm 10)^\circ\text{C}$ протягом семи хвилин. За зміною маси визначають вміст летючих речовин (V) і виражають у % на суху (V^C) або суху беззолну (горючу) масу (V^T).

Вміст зв'язаного вуглецю (C_{3B}) та його вміст у складі летючих речовин визначається за співвідношенням тепла, яке виділяється в об'ємі камери газифікації до кількості тепла в шарі гарячого палива. Оскільки вихід летючих речовин в біопаливах досить високий ($V^C=80-90\%$), то більша частина теплоти під час їх спалювання виділяється в камері газифікації, отже, для повного їх спалювання потрібно розробляти відповідні системи подачі повітря в зону газифікації і витримувати пропорційні залежності між геометричними розмірами даної камери.

Вміст у паливі зв'язаного вуглецю (C_{3B}) розраховують виходячи із вмісту летючих речовин як долю беззолної сухої маси після виходу летючих речовин і виражають у %:

$$\begin{aligned} C_{3B}^C &= 100 - A^C - V^C, \\ C_{3B}^G &= 100 - V^G, \\ C_{3B}^P &= 100 - A^P - W^P - V^P. \end{aligned} \quad (6.3)$$

Оптимальний вміст вологи і мінімально можливий вміст золи для різних палив наведено в табл. 7.2.

Таблиця 6.3. Оптимальний вміст вологи і мінімально можливий вміст золи для різних палив

Види палива	Вміст, %		Оптимальне значення η_p^m
	A^P	W^P	
Цурки деревні березові	0,7	18	71,0
Вугілля деревне березове	0,9	10	89,0
Торф верховий	4,0	30	59,5
Торфобрикети	5,0	15	78,4
Торфококс	6,0	8	84,1
Брикети з відходів сільського господарства	5,0	12	76,5
Пелети з деревини м'яких порід дерев	0,5	10	83,8
Пелети з деревини твердих порід дерев	0,4	8	84,3

Коефіцієнт зольності важливий для газогенераторних палив, оскільки представляє сумарну оцінку якості палива за теплотворною здатністю та вмістом баласту. Зменшення вмісту баласту в паливі підвищує його якість. Однак, таке зменшення не може бути безмежним. Для створення оптимальних умов протікання процесу газифікації паливо повинне мати певний мінімальний

вміст вологи, оскільки подальше зниження вологості знижує вихід і теплотворну здатність генераторного газу.

Крім вуглецю, водню та сірки до складу горючої маси палива входить азот і кисень. Кожний відсоток азоту, що міститься в горючій масі палива, знижує теплоту її згоряння на 1 %. Вміст азоту в горючій масі твердого палива зазвичай не перевищує від 1 до 2 %, тому вміст азоту незначною мірою впливає на якість газу.

Кожен відсоток хімічно зв'язаного кисню, що міститься в горючій масі, знижує теплоту її згоряння на 110 кДж/кг (табл. 6.4). Відсоток зв'язаного вуглецю збільшується в паливній біомасі під час її гниття, внаслідок чого знижується калорійність, що зумовлює введення в стандартах на паливну біомасу вимог до зберігання вихідної сировини.

Таблиця 6.4. Залежність теплоти згоряння і продуктивності за жаром горючої маси твердого палива від вмісту в ній кисню

Паливо	Склад горючої маси					Вихід легких речовин, $V^P, \%$	Нижча теплота згоряння		Продуктивність за жаром	
	W^P	C^P	S^P	O^P	N^P		Дж/кг	%	$t_{max} \text{ } ^\circ\text{C}$	%
Дрова	6,1	51,0	0	42,3	0,6	85	14235	116	1980	100
Торф	6,0	57,8	0,3	33,4	2,5	70	13440	100	2050	103
Буре вугілля	6,1	69,5	4,5	19,0	0,9	61	19845		2090	105

Теплота згоряння деревини – це кількість теплоти, яка виділяється під час спалювання одиничної маси палива. Визначають вищу Q_B та нижчу Q_H теплоту згоряння палива.

Під час розрахунків вищої Q_B теплоти згоряння припускають, що водяна пара, яка надходить в генераторний газ в якості продукту згоряння водню та з вологи палива, повністю конденсується. Показник нижчої теплоти Q_H згоряння палива не містить теплоти конденсації водяної пари. Різниця між величиною вищої Q_B та нижчої Q_H теплоти згоряння палива залежить від його вологості та вмісту водню. Теплоту згоряння виражають в МДж/кг або кДж/кг, а за базовий показник може бути використана маса вологого (P), сухого (C) або сухого беззолного палива (Γ).

Позначивши кількість водню, що міститься в сухому паливі H^C , отримаємо наступні співвідношення між вищою Q_B та нижчою Q_H теплотою згоряння (МДж/кг):

$$Q_B^P = Q_B^C \cdot (1 - W^P / 100), \quad (6.4)$$

$$Q_B^C = Q_B^\Gamma \cdot (1 - A^C / 100), \quad (6.5)$$

$$Q_H^C = Q_B^C - 2,442 \cdot 8,936 \cdot H^C / 100, \quad (6.6)$$

$$Q_H^P = Q_H^C \cdot (1 - W^P / 100) - 2,442 \cdot W^P / 100, \quad (6.7)$$

$$Q_H^P = Q_B^P - 2,442 \cdot \left[\frac{8,936 \cdot H^C}{100} \cdot (1 - W^P / 100) + \frac{W^P}{100} \right]. \quad (6.8)$$

Для оцінки газогенераторних палив повинна застосовуватися нижча теплотворність робочого палива. На основі практики газифікації та теоретичних узагальнень відомо, що оптимальний вміст вологи W^P і мінімально можливий вміст золи A^P для різних палив коливаються в межах, зазначених у табл. 6.5.

Таблиця 6.5. Порівняльна характеристика різних сортів твердих палив за відношенням нижчої і вищої його теплоти згоряння

Паливо	Q_B^T Дж/кг	Вміст баласту, %		Q_H^P	$\frac{Q_H^P}{Q_B^T}$
		A^P	W^P		
Цурка деревна березова	20097	0,80	20,0	14277	0,710
Цурка деревна соснова	20448	1,10	20,0	14235	0,696
Вугілля деревне березове кучне	32238	1,22	7,0	28721	0,891
Вугілля деревне березове пічне	26502	0,90	7,0	23689	0,894
Торфобрикет	22441	5,00	15,0	17585	0,784
Торфокок	34353	6,0	8,0	28897	0,841
Солома брикетована	21060	5,0	12,0	16111	0,765
Пелети з м'яких порід дерев	18027	0,5	10,0	15109	0,838
Пелети з твердих порід дерев	20168	0,4	8,0	16997	0,843

За теплотворними властивостями, палива можна поділити на п'ять груп (табл. 6.6).

Таблиця 6.6. Класифікація твердих палив за їх теплотворними властивостями

Група палива	Значення η_p^T	Якість палива
I	вище 90	Відмінна
II	від 85 до 90	Висока
III	від 80 до 85	Хороша
IV	від 65 до 80	Задовільна
V	нижче 65	Низька

Для деревини нижчу теплоту згоряння робочої маси Q_H^P , в залежності від вмісту вологи, визначають за формулою, кДж/кг:

$$Q_H^P = \frac{Q_H^C(100 - W^P) - 2500W^P}{100}, \quad (6.9)$$

де Q_H^C – нижча теплота згоряння сухого палива кДж/кг; W^P – відносна вологість палива, %.

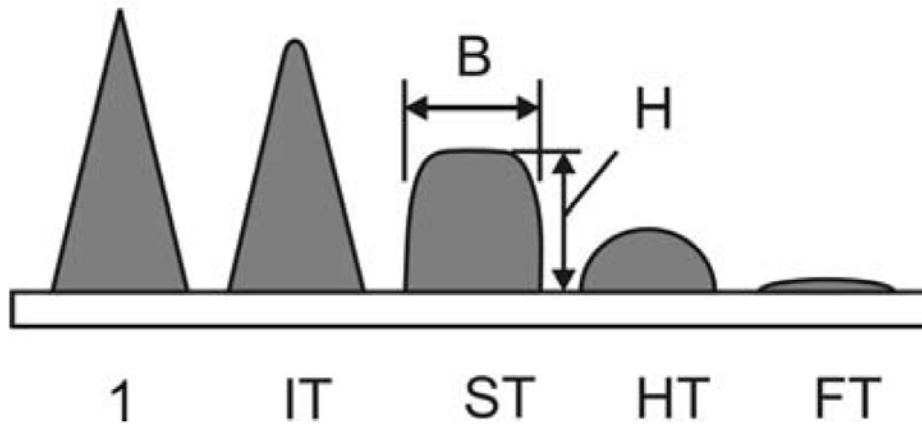
При змінній зольності палива (наприклад, трав'янисті відходи сільського господарства – солома, бадилля та ін.) нижчу теплоту згоряння робочої маси розраховують за тепловою згоряння горючої маси за формулою:

$$Q_H^P = \frac{Q_H^r [100 - (A^P + W^P)] - 2500W^P}{100} \quad (6.10)$$

де Q_H^r – нижча теплота згоряння горючої маси, кДж/кг.

Хоча зольність твердих біопалив низька, здатність золи до плавлення напряму впливає на роботу будь-якого теплотехнічного обладнання (піролізний котел, газогенераторна установка, топка сушарки та ін.). Плавлення золи спричиняє зашлаковування топок, камер газифікації, виникнення щільних відкладень на конвективних поверхнях нагрівання.

Для визначення показника плавлення золи існує ряд стандартів: ASTM D 1857, ISO 540 та DIN 51730. Згідно зі стандартом ASTM D 1857 вимірюють зміну форми стандартного конуса золи під час її нагрівання в окислювальному середовищі (рис. 7.8).



1 – вихідний стан, до початку нагрівання верхівка конуса гостра; **IT** – початок деформації, гостра вершина конуса заокруглюється; **ST** – температура розм'якшення, конус золи сплющується таким чином, що величина твірних зменшується до діаметра ($H=B$); **HT** – точка утворення півсфери, конус перетворюється на півсферу ($H=B/2$); **FT** – точка розтікання поверхнею

Рис. 6.14. Зміна форми стандартного конуса під час його нагрівання

Здатність золи деревини до плавлення може коливатися в широких межах залежно від типу деревини, домішок, які потрапляють в паливо, місця вирощування, пори року та навіть частини дерева. Здатність золи до плавлення варіюється в наступних межах:

- початок деформації IT=1150 – 1490 °С;
- температура розм'якшення ST=1180 – 1525 °С;
- точка утворення півсфери HT=1230 – 1650 °С;
- точка розтікання FT= 1250 – 1650 °С.

Дані зі здатності золи до плавлення для деяких видів палива наведено в таблиці 6.7.

Якщо для кори деревини температура розм'якшення зазвичай висока, (вища за 1500⁰С) і не викликає шлакування топки, камери газифікації, фурм, колосникової решітки та ін., то у золи деревини вона набагато нижча, що вимагає дотримання режиму горіння для запобігання шлакування.

Таблиця 6.7. Характеристика плавлення золи деревини

Паливо	Характеристика плавкості золи, ⁰ С			
	ІГ	СТ	НГ	FT
Тріска сосни	1210	1225	1250	1275
Тріска відходів рубки	1175	1205	1230	1250
Тирса сосни	1150	1180	1200	1225
Кора ялини	1405	1550	1650	1650
Кора сосни	1340	1525	1650	1650

Температура плавлення золи залежить від її мінерального складу, і навіть незначні відмінності за складом суттєво впливають на її характеристики плавлення, тому доцільно використовувати експрес аналіз проб. Метод полягає в спалюванні на чистій колосниковій решітці газогенератора проб палива масою 2 кг з подальшим контролем шлакування візуально. Оскільки на практиці низька температура плавлення золи веде до шлакування і подальшого виходу елементів конструкції з ладу, використання експрес методу дозволить до кожного виду біомаси розраховувати необхідний температурний режим робочої зони.

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 споживану потужність при роботі гранулятора?

Література:

1. Альтернативна енергетика: навчальний посібник 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. Биомасса как источник энергии : пер с. англ. / под ред. С. Соуфера, О. Забарски. – М. : Мир, 1985. – 368 с.
4. Гелетуша Г.Г. Перспективи вирощування та використання енергетичних культур в Україні /Г.Г. Гелетуша, Т.А. Железная, О.В. Трибой// Аналітична записка БАУ №10. – 2014 г. – 33 с.
5. Гелетуша Г.Г. Перспективы производства тепловой энергии из биомассы в Украине [Электронный 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>.
6. 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.
7. Голуб Г.А. Біоенергоконверсія в системі органічного землеробства /Голуб Г.А., Таргоня В.С./ Науковий вісник Національного аграрного університету. – К., 2007. – Вип. 117. – 400 с. – С. 47-61.
8. Голуб Г.А. Енергетична автономність агроєкосистем /Г.А. Голуб// Вісник аграрної науки. – 2010. – № 3. – С. 50-54.
9. Голуб Г.А. Інженерні проблеми виробництва і використання біопалив в АПК /Голуб Г.А., Дубровін В.О.// Вісник аграрної науки. – 2010. – Спеціальний випуск, травень. – С. 82-87.
10. Кухарець С.М. Забезпечення енергетичної автономності агроєкосистем на основі виробництва біопалива /С.М. Кухарець, Г.А. Голуб// Вісник Житомир. нац. агроєкологічного університету. – 2012. – № 1, т. 1. – С. 345–352.
11. Кухарець 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.

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. 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. Рашенко]. – Житомир, 2011. – 96 с.

14. Самылин А.А. Проблемы заготовки древесной щепы / А.А. Самылин, Н. М. Цивенкова// *ЛесПромИнформ.* – 2006. – № 2 (33). – С. 88–92.

15. Справочник потребителя биотоплива / [под. ред. Виллу Вареса]. – Таллин: Таллинский технический университет, 2005. – 183 с.

16. Кухарець С. М. Виробництво твердого біопалива в умовах сільськогосподарського виробництва / С. М. Кухарець, В. В. Кухарець, О. О. Осадчий // *Зб. наук. пр. Подільського держ. аграр.-техн. ун-ту.* – 2011. – Спец. вип. Сучасні проблеми збалансованого природокористування: наук.-практ. конф. – С. 159–163.

17. Кухарець С. М. Регулювання використання органічних ресурсів для виробництва біопалива / С. М. Кухарець, Г. А. Голуб // *Сільськогосподарські машини: зб. нук. ст.* – Луцьк, 2013. – Вип. 24. – С. 187–194.

18. 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.

19. Кухарець С.М. Підвищення енергетичної автономності агроєкосистем. Механіко-технологічні основи: монографія / С.М. Кухарець – Житомир: ЖНАЕУ, 2016. – 192 с.

20. Integrated use of bioenergy conversion technologies in agroecosystems/ Golub G.A., Kukharets S.M., Yarosh Y.D., Kukharets V.V // *INMATEH – Agricultural Engineering.*– 2017. – Vol. 51, No.1. – P. 93–100

21. Golub G., Kukharets S., Yarosh Y., Zavadzka O. Diversified production and bioenergy conversion for rural development. *Proceedings of the 8th International Scientific Conference Rural Development 2017.* 2018. pp. 333-337.

7. ВИРОБНИЦТВО ТА ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗУ

7.1. Загальні відомості про генераторний газ та історичні аспекти розвитку технології газифікації

Газифікація – це процес термічного перетворення біопалива при температурі від 800 до 1500 °С в присутності повітря або кисню з отриманням в результаті синтез-газу або генераторного газу з теплотою згоряння від 10 до 16,7 МДж/м³. Застосування технологій газифікації твердого палива, як складової біомаси, дозволяє використовувати його для роботи будь-яких типів двигунів внутрішнього згоряння.. Джерелом кисню, необхідного для процесу газоутворення, може виступати повітря, пара або газу, що містять кисень.

Газогенератори – це пристрої, призначені для отримання горючого генераторного газу з вуглецевих палив під дією високих температур та наявності окислювача.



Рис. 7.1. Загальний вигляд газогенератора

Генераторний газ – газова суміш, яка містить оксид вуглецю (II) CO_2 , молекулярний водень H_2 і незначну кількість метану CH_4 . Отримують генераторний газ в газогенераторах шляхом пропускання повітря через шар твердого палива під дією високих температур. Оксид вуглецю змішується з водяною парою, чим забезпечується воднева складова генераторного газу: $CO+H_2O=CO_2+H_2$.

Генераторний газ може бути використаний для спалювання в топках піролізних та парових котлів, в установках для опалювання чи освітлення

будівель, для зварювання металів, для спалювання у виробничих печах (наприклад, в металургійній, цементній, керамічній промисловості, під час виробництва скла), використовується в якості сировини в хімічній промисловості та для спалювання в циліндрах двигунів внутрішнього згорання.

У техніці, залежно від використаного типу дуття, існують наступні генераторні гази: повітряний, водяний, змішаний і парокисневий. Повітряним називається газ, отриманий при взаємодії вуглецю з сухим повітрям. Він складається з 34,7 % оксиду вуглецю і 65,3 % азоту, його теплота згорання за нормальних умов становить 4436 кДж/м³. Водяний газ утворюється при пропусканні водяної пари через шар розпеченого палива. Склад водяного газу: CO , CO_2 і H_2 . Теплота згорання такого газу від 10044 до 11300 кДж/м³ за нормальних умов. При одночасній подачі в газогенератор водяної пари і повітря утворюється змішаний газ наступного складу: H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , N_2 .

За характером напрямку газового потоку газогенератори поділяються на: прямого, оберненого, двозонного і горизонтального процесів газифікації (рис. 7.2). Дані процеси газифікації відрізняються способами підведення газів дуття, відбирання генераторного газу та розташуванням відповідних реакційних зон.



Рис. 7.2. Класифікація газогенераторів

Історія розвитку стаціонарних газогенераторів починається значно раніше, ніж транспортних. Тому при створенні транспортного газогенератора найбільш вдалі стаціонарної конструкції були повністю перенесені на нову установку надовго визначивши характер її розвитку. Перший газогенераторний автомобіль був побудований в 1900 р. Тейлором у Франції, а перший патент на автомобільний газогенератор, який мав на той час виключно історичний інтерес, передбачав особливу систему регулювання присадки водяної пари до повітря. Повітря і пара надходили знизу із під колосникових решіток у порожнину вогнетривкої керамічної футерованої шахти.

За чотирнадцять років (із 1900 по 1914 р.), з моменту появи першого газогенераторного автомобіля, у світі було побудовано кілька десятків газогенераторних автомашин. Однак, початком розвитку і широкого використання транспортних газогенераторів можна вважати 1914 р., коли економічні передумови, які викликали до життя цю нову галузь техніки, почали позначатися особливо гостро. Ріст світового автотракторного парку на цей час значно збільшив споживання рідкого палива. Надзвичайно нерівномірний розподіл нафти на земній поверхні незабаром змусив ряд країн шукати заміників цієї, порівняно рідкісної, копалини. В особливо тяжких умовах опинилася Франція, енергетичні ресурси якої були гіршими за інші країни Європи.

Перше промислове виробництво транспортних газогенераторів було налагоджено у Франції, а їхня промислова апробація відбувалася в м. Касабланка, Марокко, коли автоклуб Марокко провів ряд змагань, у яких брали участь перші п'ять газогенераторних тракторів і вантажних автомобілів.

У період із 1920 до 1938 р. зручність і дешевизна палив нафтового походження стала причиною зменшення попиту на використання автомобільних газогенераторів, але до 1930 року у всіх Європейських країнах, які мають достатні ресурси біомаси, дана технологія активно розвивалася, конкуруючи з бензином.

У 1924 році відомим французьким винахідником Г. Імбертом була побудована перша газогенераторна установка з газогенератором оберненого процесу газифікації. Слід зазначити роботи В. Фойта (1933 р.) і Е. Розера (1938 р.) присвячені оптимізації режимів газифікації різних палив у газогенераторах транспортного типу.

Подальший великий крок в галузі розвитку технології автотракторних газогенераторів горизонтального процесу був зроблений французьким винахідником Ж. Гоен у 1928 р. За його схемами дотепер проектують газогенератори для вантажних автомобілів, сільськогосподарської техніки і т.п. Основна ідея, покладена в основу роботи генератора Ж. Гоен, зводиться до створення умов, при яких вуглець палива міг би окислюватися безпосередньо до окису вуглецю, минаючи вуглекислотну фазу. Слід також зазначити конструкцію деревновугільного автомобільного газогенератора прямого процесу газифікації, запропонованого А. Гонн, оскільки, описаний у його патенті метод регулювання висоти активної зони, був використаний у багатьох більш пізніх конструкціях автомобільних газогенераторів. В 1932 р.

французькими інженерами була розроблена перша практично вдала газогенераторна установка для мотоцикла. Газогенераторна установка працювала відповідно до горизонтального принципу газифікації на деревному вугіллі.

Активний розвиток технології автомобільних газогенераторів мав місце в 1936 році, коли, внаслідок політичної нестабільності, уряди більшості Європейських країн, передбачаючи можливість війни і намагаючись забезпечити енергетичну безпеку своїх держав, активно субсидіювали розвиток цієї технології. До 1938 року Франція мала 7800 газогенераторних вантажівок, що становило 2% її автомобільного парку, а вже через 2 роки, в 1940 році, Франція почала масове переобладнання комерційних і військових транспортних засобів на відходи біомаси і до кінця 40-го року 50 тис. газогенераторних автомобілів було в дії та ще 40 тис. газогенераторних установок перебували у виробництві. Це стало можливим завдяки створенню у Франції ряду вдалих конструкцій газогенераторних установок, які значно вплинули на подальший розвиток технології у світовому масштабі.

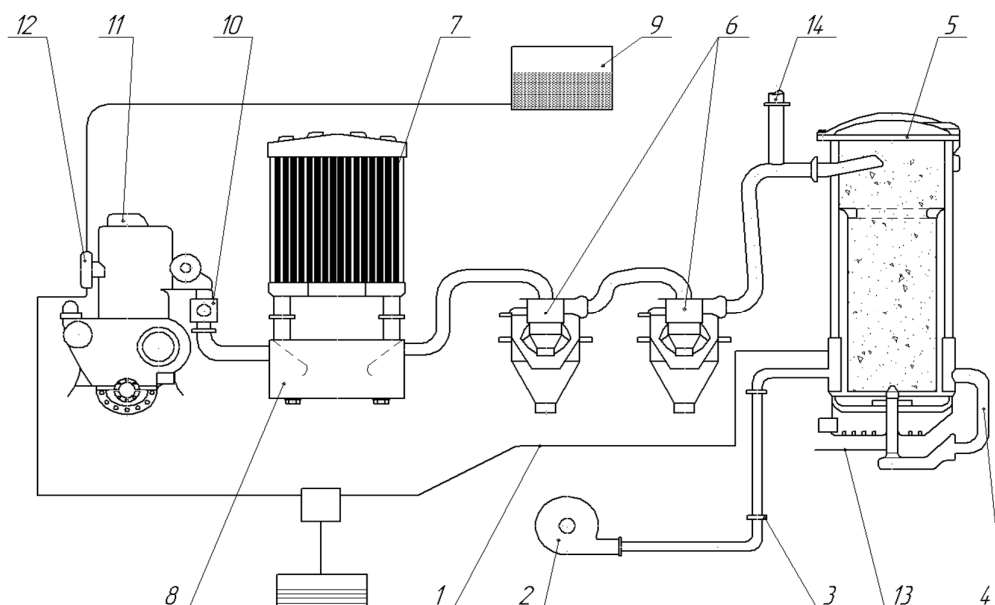
У Німеччині переведення транспортних засобів на газогенераторне паливо стало національною політикою. Вже в 1935 році на генераторне паливо було переведено більше 10 тис. вантажних і легкових автомобілів (рис. 7.3), кілька тисяч тракторів і мотоциклів, а також кілька сотень барж і дрезин. Газогенераторні установки випускалися більш ніж 100 фірмами, однак, найбільше значення на подальший розвиток технології зробили газогенератори: «Виско», «Дейтц», «Гумбольт-Дейтц» (рис. 7.4), «Фойгт», «Абоген», «Ганза», «Бюссинг» та ін. Перераховані конструкції газогенераторних установок не втратили актуальності і сьогодні.



Рис. 7.3. Серійне виробництво газогенераторних автомобілів на фірмі «Фіат» в Німеччині, 1940 р.

З 1940 до 1945 року, у Німеччині було виготовлено близько 500 тис. транспортних газогенераторних установок, з яких більше 300 тис. тільки для

вантажних автомобілів. У Великобританії в 1939 році більше 1500 автомобілів було оснащено газогенераторними установками.



1 – трубопровід; 2 – вентилятор розпалювання; 3 – повітропровід; 4 – центральна фурма; 5 – газогенератор; 6 – відцентровий очисник; 7 – охолоджувач; 8 – ємність для конденсату; 9 – резервний бак; 10 – змішувач; 11 – двигун внутрішнього згоряння; 12 – пусковий підігрівач палива; 13 – електрод розпалювання; 14 – факел

Рис. 7.4. Схема газогенераторної установки «Гумбольт-Дейц» [45]

Після закінчення другої світової війни Данія також збільшила парк газогенераторних автомобілів до 6 тис. шт., у результаті чого, вдалося уникнути голоду серед населення, тому, що були відновлені транспортні перевезення між фермами та містами (рис. 7.5). Данія, не маючи достатніх запасів паливної біомаси, не розвивала газогенераторні технології до війни. Однак, під час німецької окупації в Данії були спроектовані газогенератори, що працювали на морських водоростях, брикетах з тирси і різних видах торфу. Ці тверді палива обслуговували транспортні засоби датського сільського господарства і промисловості до 1945 року.

У США газогенераторні автомобілі, не отримали розповсюдження, однак вони вироблялись для експорту в Китай.

У Європі генераторний газ у 1946 р. став «громадським паливом». До березня 1944 р. більше 80 % вантажних автомобілів і інших транспортних засобів і 26 % легкових автомобілів (більше 260 тис.шт.) були переведені на генераторний газ. На додаток, жодна велика європейська держава не мала менш ніж 10000 газогенераторних транспортних засобів.

Найбільш ефективним є виробництво генераторного газу за допомогою стаціонарних установок, які можуть забезпечити теплом і енергією більшість промислових і цивільних об'єктів.



Рис. 7.5. Доставка продуктів в Данію газогенераторними автомобілями

Відродження інтересу до технології досягло свого максимуму в 1973 і 2005 роках, у відповідь на різке підвищення цін на нафтопродукти і погрозу подальшого скорочення їх постачання. Це обумовило високий інтерес з боку урядів деяких країн, великих і малих компаній, інженерів та вчених, які почали повторно досліджувати сучасний потенціал розвитку і застосування газогенераторних технологій.

Слід зазначити, що у Швеції, ПАР, Китаї та на Філіппінах розвиток газогенераторних технологій не припинявся і підтримується на державному рівні. Відповідні дослідження фінансуються в цих країнах з бюджету, стимулюючи на державному рівні комерційне використання технології переважно в сільському, лісовому та комунальному господарствах.

Досвід ПАР є особливо цікавим через нафтогазове ембарго, коли споживання нафтопохідних палив було скорочено до мінімуму, а всі можливі галузі промисловості були переведені на генераторний газ, який одержували з кам'яного і бурого вугілля, яких ПАР має на своїй території найбільші запаси. Наприкінці минулого століття на території ПАР було введено в дію більше 100 газогенераторних станцій потужністю від 0,5 до 1 мВт і налагоджено серійне виробництво чотирьох типів газогенераторних установок транспортного типу потужністю від 30 до 150 кВт.

Завдяки сучасній політиці підтримки технологій одержання енергії з відходів біомаси в Європейському Союзі, Індії, Бразилії, Еквадорі та Аргентині, відновлювана енергетика, в тому числі і газогенераторна технологія, стала конкурентоспроможною і комерційно привабливою. Це ініціювало виробництво приватними компаніями газогенераторних установок транспортного типу потужністю до 100 кВт, які застосовуються в сільському, лісовому і комунальному господарствах цих країн.

Створення сучасних вискоелективних газогенераторних установок є неможливим без аналізу наукових досягнень у цій галузі знань. Тільки розвиток принципово нових ідей і підходів дає шанси завоювати лідируючі позиції на світовому ринку газогенераторних технологій. Проведення подальших

досліджень є необхідною умовою та запорукою успіху і нових перспектив практичного використання газогенераторів в військовій та цивільній промисловості України, сільському та лісовому господарстві.

В якості сировинної бази для виробництва генераторного газу, як правило, використовують різні види місцевих палив. Під місцевими паливами розуміють різні види горючих, які внаслідок їх низької теплотворної здатності і значного вмісту баласту – вологи та мінеральних домішок – непридатні для транспортування на значні відстані. Економічно доцільним є використання таких видів палива лише в районах їх добування. Місцеві палива поділяються на дві групи: палива рослинного походження та викопні палива.

До групи місцевих палив рослинного походження належать: дрова; відходи лісосічної деревини; відходи деревообробки та переробки; лісові некондиційні матеріали (листя, хвоя, шишки, дрібні гілки, сушняк); залишки сільськогосподарських культур та ін.

Використання даних культур є важливим для сільськогосподарських підприємств, особливо на сьогоднішній день, коли ціни на енергоресурси постійно зростають і виникає проблема забезпечення наявних на підприємстві виробництв власними енергоносіями з місцевих відновлюваних джерел енергії.

Групу місцевих палив викопного походження складають: торф; сланці; буре вугілля низької якості; сапропелі та ін.

7.2. Основи хіміко-термічного процесу газифікації та типи процесів газифікації

Газифікацією є процес отримання генераторного газу в результаті взаємодії вуглецю палива з киснем в зоні високих температур. У техніці, залежно від використаного типу дуття, існують наступні генераторні гази: повітряний, водяний, змішаний і парокисневий.

Повітряним називається газ, отриманий при взаємодії вуглецю з сухим повітрям. Він складається з 34,7 % оксиду вуглецю і 65,3 % азоту, його теплота згоряння за нормальних умов становить 4436 кДж/м³.

Водяний газ утворюється при пропусканні водяної пари через шар розпеченого палива. Склад водяного газу: CO , CO_2 і H_2 . Теплота згоряння такого газу від 10044 до 11300 кДж/м³ за нормальних умов.

Змішаний газ утворюється при одночасній подачі в газогенератор водяної пари і повітря і має наступний склад: H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , N_2 .

У газогенераторах протікає змішаний процес газифікації, а отриманий газ називають **генераторним**. За характером напрямку газового потоку газогенератори поділяються на: **прямого, оберненого, двозонного і горизонтального процесів газифікації** (рис. 7.6).

Процеси газифікації відрізняються способами підведення газів дуття, відбирання генераторного газу та розташуванням відповідних реакційних зон.

Залежно від характеру протікання процесу газифікації і змін, які відбуваються з паливним матеріалом, в газогенераторі виділяють наступні зони: окислення, відновлення, сухої перегонки і підсушування.

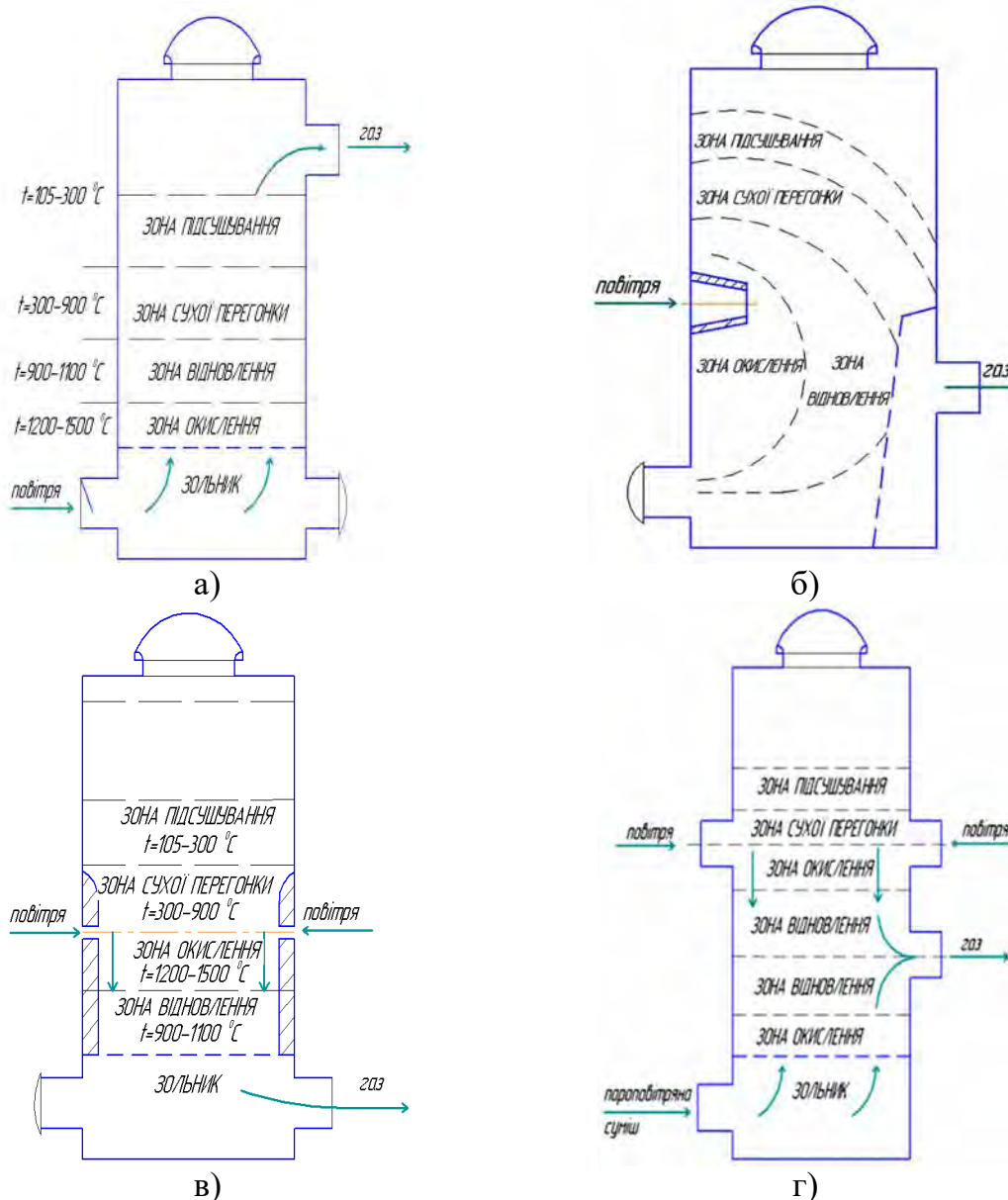


Рис 7.6. Типи газогенераторів за характером процесу газифікації

Зона окислення досить незначна, гази дуття повністю витрачаються на процес окислення в досить невеликій частині шару палива, поступово, залежно від витрат газів дуття, в газі утворюється значна частина CO_2 . У середині зони окислення вміст CO_2 досягає максимального значення, і починає поступово

падати в кінці даної зони. Процес горіння вуглецю протікає з виділенням значної кількості теплоти, а температура в реакційній зоні досягає від 1200 до 1500⁰С.

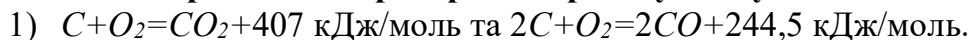
Зона відновлення характеризується падінням до мінімальних значень вмісту CO_2 з одночасним зростанням вмісту CO . При проходженні потоку газу крізь шар розпеченого матеріалу CO_2 реагує з вуглецем палива, утворюючи CO . Кількість газів дуття (кисню) в даній зоні мінімальна. Окис вуглецю створюється в зоні окислення одночасно з його двоокисом, але через наявність значної кількості кисню згорає до CO_2 . Розкладання у зоні відновлення водяного пару сприяє появі в газі H_2 і CO . Оскільки реакції протікають з поглинанням тепла, температура в зоні відновлення становить від 900 до 1100⁰С.

Активна зона складається з зони окислення і зони відновлення, остання займає значну частину висоти активної зони.

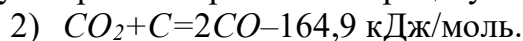
Зона сухої перегонки – це зона, де паливо до певної температури нагрівається без доступу повітря. При нагріванні палива до 100⁰С воно підсушується доки випаровується волога, а потім його температура різко зростає. При нагріванні вище 280⁰С починається його прискорене розкладання. Зона сухої перегонки розташована над зоною окислення, але температурні умови шарів паливного матеріалу, які знаходяться в даній зоні (300-900⁰С), не забезпечують умов протікання хімічних реакцій відновлення CO_2 до CO і утворення H_2 внаслідок розкладання води, але є достатніми для протікання процесів сухої перегонки паливного матеріалу.

У процесі розкладання палива при газоутворенні утворюються наступні гази: CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , C_nH_m , а також вода, смола, спирти. У зоні підсушування верхній шар палива, розташований в бункері газогенератора, підсушується газом, відібраним джерелом споживання. Температура зони підсушування складає від 105 до 300⁰С.

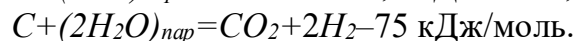
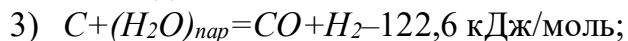
Основні хімічні реакції генераторного процесу наступні:



Дані реакції протікають одночасно. При дії O_2 газів дуття на реакційну поверхню палива утворюється вуглецево-кисневий комплекс з подальшим розпаданням на CO і CO_2 . Відношення $CO:CO_2$ залежить від температури в зоні окислення. Концентрація CO зростає при зростанні температури. Тепло, яке виділяється при протіканні даних реакцій, підвищує температуру в зоні окислення і призводить до плавлення золи. Присадка водяної пари до газів дуття знижує температуру і вирівнює протікання процесу.

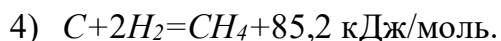


Реакція ендотермічна, протікає із збільшенням об'єму, характерна для зони відновлення. Зменшення тиску і підвищення температури сприяє інтенсифікації відновлення CO_2 до CO .

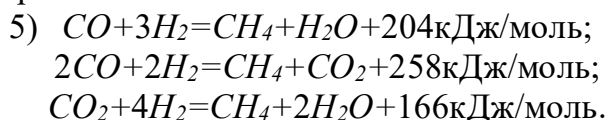


Дані реакції протікають за участі гігроскопічної і хімічної вологи паливного матеріалу. Реакції ендотермічні і швидкість їх протікання залежить

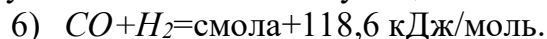
від температури в зоні відновлення. При температурах понад 900 °С швидкість протікання реакцій зростає.



Реакція протікає в зоні сухої перегонки з виділенням великої кількості теплоти і зменшенням об'єму. Пониження температури процесу і пониження напруженості колосників та збільшення висоти бункера, вологості палива, віддаленості зони сухої перегонки від зони горіння впливають на збільшення вмісту CH_4 у верхніх шарах палива.



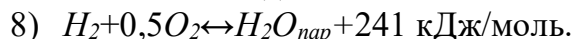
Реакції утворення CH_4 характерні для оберненого процесу газифікації. Вміст CO і H_2 в газі зростає при його наближенні до колосникової решітки при наявності певної кількості CO_2 . При взаємодії даних компонентів газу може утворюватися CH_4 за рахунок зменшення вмісту CO , CO_2 і H_2 .



В зоні сухої перегонки протікають реакції утворення смол при взаємодії CO з H_2 і супроводжуються значним виділенням тепла.



При наявності надлишкового кисню O_2 спостерігається протікання і зворотної реакції $CO \rightarrow CO_2$ із значним виділенням тепла.



Кисень, який подається в зону горіння, з воднем утворює водяну пару. Реакція утворення водяної пари екзотермічна, протікає з виділенням тепла.

Прямий процес газифікації – над активною зоною розташовані зона сухої перегонки і зона підсушування. Відбирання газу здійснюється у верхній частині газогенератора. Недоліком прямого процесу є те, що продукти газифікації механічним чином змішуються з продуктами, які отримуються в верхніх шарах палива. Потрапляння в отриманий газ смолистих речовин та вуглеводнів є недопустимим, навіть якщо їх вміст є невисоким.

Обернений процес газифікації – повітря через фурмений пояс підводиться в камеру газифікації, розташовану в середній частині газогенератора, а продукти процесу газифікації відводяться в його нижній частині. Зона горіння розташована над відновлювальним шаром палива, а зони сушіння та сухої перегонки розташовані як і в газогенераторі прямого процесу. В зоні окислення кисень повітря вступає в реакцію з вуглецем палива, утворюючи вуглекислоту. Із зони окислення газу опускаються у зону відновлення, нагріваючи паливо до 900-1100 °С, протікає процес відновлення частини вуглекислоти в оксид вуглецю. Продукти, отримані в верхній частині газогенератора, не змішуються механічним чином з генераторним газом, а перш ніж вийти з генератора проходять зону високих температур. При проходженні через активну зону продукти сухої перегонки згорають, пара розкладається.

Двоступінний процес газифікації представлений в комбінованому газогенераторі, де в єдину схему об'єднані прямий і обернений процеси газифікації. У паливі нижньої частини газогенератора газифікації протікає за

прямим процесом, а в верхній – за оберненим. У газогенераторі присутні дві зони окислення і дві відновлення. У зону окислення верхньої частини газогенератора повітря подається периферійними фурмами, а в зону окислення нижньої частини – під колосникову решітку. Вихідний генераторний газ відбирається між зонами відновлення, що зумовлює його високу температуру 700⁰С (в порівнянні з 400-500⁰С в газогенераторі прямого процесу газифікації). Перевагою є висока ступінь розкладання смол в паливах рослинного походження. Недоліком – висока температура вихідного газу, що потребує використання додаткових систем охолодження.

Горизонтальний процес газифікації – зони підсушування та сухої перегонки розташовані над активною зоною. Таке розташування зон в газогенераторі істотно зменшує його габарити і вагу (швидкісний тип газогенератора). Відрізняється високою гнучкістю і швидким розпалюванням. Перевагою є те, що об'єм активної зони не перевищує кількох кубічних метрів, має грушоподібну форму, і результатом процесу газифікації є *CO*, що усуває необхідність в подальших хімічних реакціях. Недоліком є неможливість використання палива з вмістом смоли і зольністю вище 5%.

Широкого розповсюдження набули газогенератори прямого і оберненого процесів газифікації. За призначенням вони використовуються: прямого – для отримання газу щоб спалювати в топках котлів, або в енерготехнологічних процесах для виділення хімічно активних компонентів; оберненого – з метою отримання чистого газоподібного палива для приводу ДВЗ, спалювання в топках сушильних апаратів і технологічних печей.

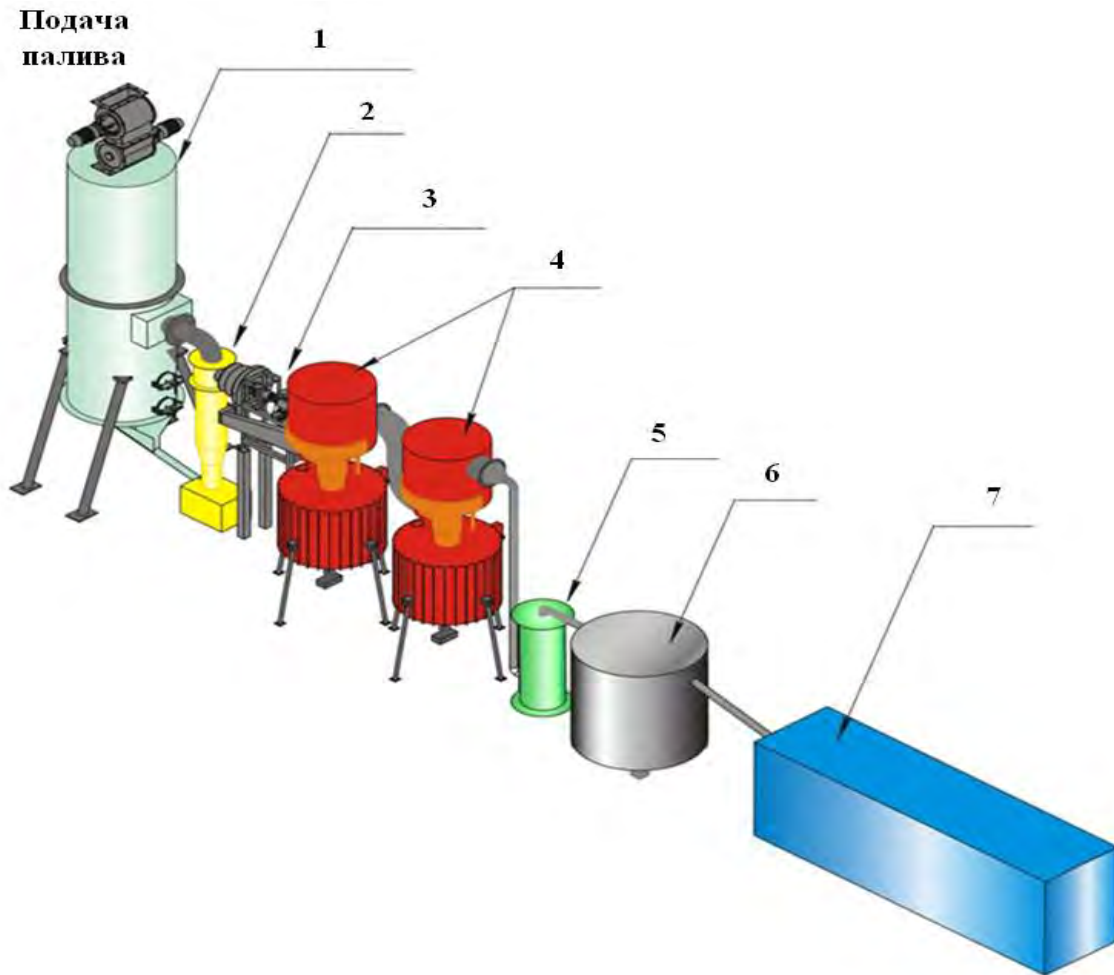
7.3. Технологічні схеми виробництва генераторного газу

Варіанти технологічних схем виробництва генераторного газу для силових потреб та для виробництва електроенергії представлені на рис. 7.7. Технології виробництва генераторного газу залежать від вибраної сировини та остаточного призначення газу до використання. Однак усі вони, як правило включають наступні етапи: підготовка сировини; завантаження сировини в бункер газогенератора; забезпечення газоповітряного режиму для підтримання процесу газифікації; газифікація сировини; очищення та охолодження газу.

Спочатку сировина рівномірно подрібнюється і підсушується, що підвищує її насипну щільність. В якості палива використовуються: паливні брикети, деревинна тріска, відходи деревообробної промисловості фракцією 60×60 мм вологістю від 12 до 19 %. Якщо вологість сировини вища вказаних меж, в технологічній схемі використовується додаткове обладнання для сушки. Далі підготовлена сировина подається, за допомогою шнекового транспортеру, в бункер газогенератора 1. Завантаження – верхнє. Замість шнекового транспортеру для завантаження сировини можуть бути використані наступні варіанти: оперативний склад, напівавтомат, перепускні клапани.

Для забезпечення протікання процесу газифікації слід встановити необхідний газоповітряний режим. Подача повітря в газогенератор здійснюється через фурмені отвори в камері газифікації – основному вузлі

газогенератора. Нагнітання повітря здійснюється примусово за допомогою вентилятора. Отриманий генераторний газ надходить до циклону 2, де здійснюється перший етап очищення газу від частинок розміром менше ніж 5 мм. В схемі також використовується циклон-розширювач (на схемі не позначено) об'ємом від 3 до 5 м³, який призначений для охолодження та базового очищення води та крупних частинок вуглецю шляхом миттєвої зміни об'єму.



1 – газогенератор; 2 – циклон; 3 – дезінтегратор; 4 – скруббер; 5 – електрофільтр; 6 – ресивер; 7 – споживач генераторного газу

Рис. 7.7. Технологічна схема виробництва генераторного газу з біомаси

Частково очищений генераторний газ надходить до дезінтегратора 3 для подальшого очищення від дрібнодисперсних механічних частинок. Наступний етап очищення газу від залишкових дрібнодисперсних частинок та розчинення у воді хімічних домішок з одночасним охолодженням газу здійснюється в скруберах 4, після чого він подається в електрофільтр для остаточного очищення від домішок у вигляді складних хімічних сполук, смол та ін., а також для видалення з газу залишкової вологи.

Принцип дії скрубера наступний – вода, що циркулює між блоком обробки води та скрубером за допомогою циркуляційного насосу, всередині герметичної камери розбризкується назустріч газам, що відбираються, видаляючи з них окисли важких металів, сажу та інші шкідливі домішки. Відпрацьована вода знову потрапляє в блок водообробки для очищення і подальшої подачі назад до скрубера.

Електрофільтр призначений для очищення генераторного газу від хімічних та механічних домішок, а також для видалення вологи. В системі також передбачено вологовідокремлювач для виокремлення водяної пари з газу. Для вирівнювання складу генераторного газу, яке подається до споживача, використовується ресивер.

Система може працювати у двох режимах – газовому і газодизельному. В системах, що працюють в газодизельному режимі використовують дві схеми керування, які працюють паралельно – за газом та за дизельним паливом.

Цікавими є технологічні процеси виробництва генераторного газу на базі потужних газогенераторних установок для промислових та великих аграрних підприємств і лісових господарств.

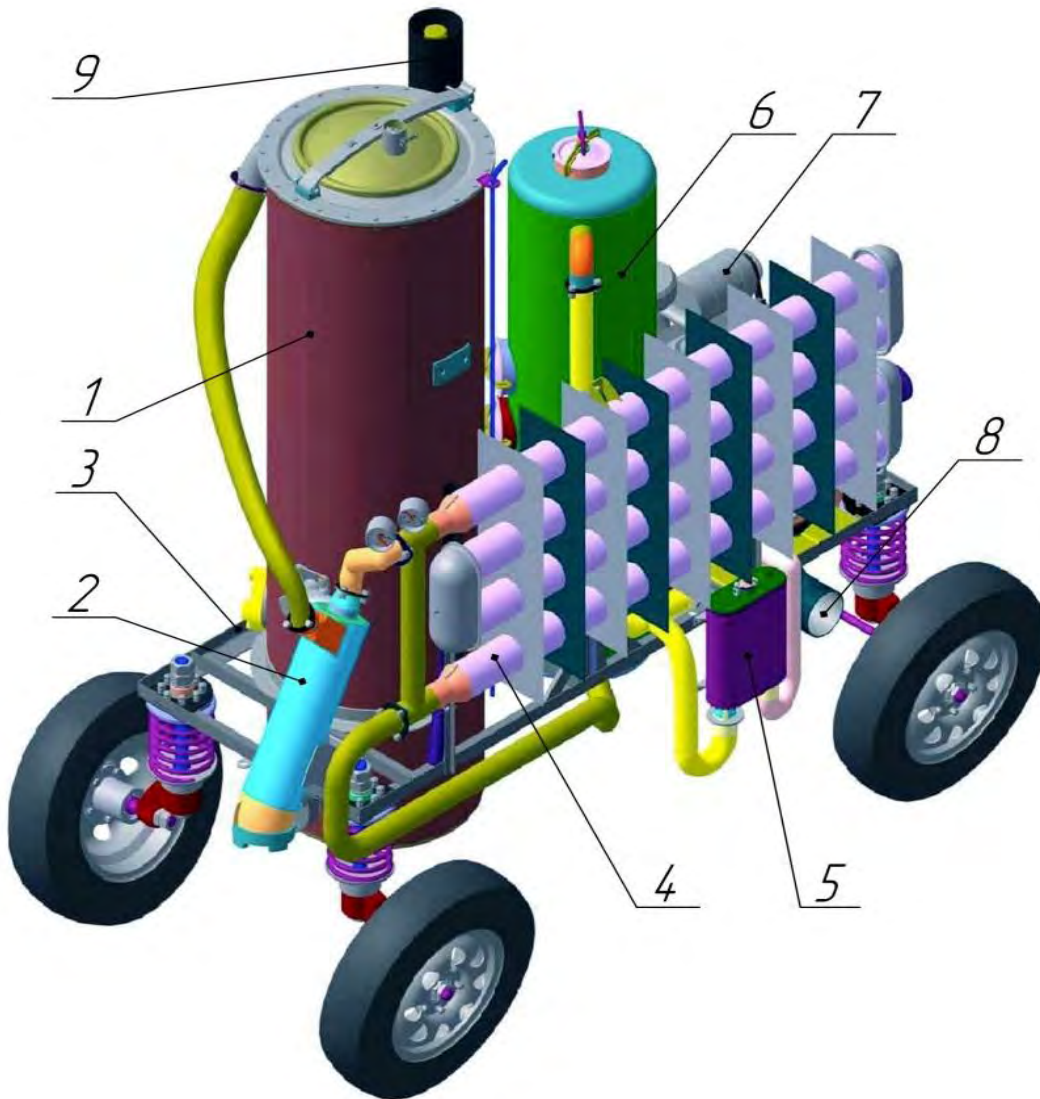
Промислові газогенераторні установки (енергоблоки) з електричною потужністю від 200 до 1000 кВт для зернопереробних, аграрних, лісових та деревопереробних господарств випускаються багатьма європейськими та китайськими підприємствами – лідерами в галузі газифікації.

Схема виробництва генераторного газу за допомогою мобільної газогенераторної установки (рис. 7.8) складена на базі типової схеми виробництва генераторного газу для ДВЗ автотранспортних засобів в газогенераторних установках типу Imbert. В цій схемі додатково передбачено охолоджувач газу, встановлений перед фільтром тонкого очищення, для забезпечення найбільшого випадання конденсату на кільцях очищення. Для запуску ДВЗ на газі потрібно відкрити дросельну заслінку змішувача, ввімкнути запалення, встановивши пізніше випередження, і вмикати двигун, підбираючи таке положення повітряної заслінки змішувача, щоб утворилася горюча суміш необхідної якості. Коли двигун починає працювати, слід прибавити кут випередження запалення, підібрати найкраще положення повітряної заслінки, прогріти двигун і розпочати роботу.

Основним вузлом газогенераторної установки (рис. 7.8) є прямопотоковий газогенератор (рис. 7.9). Конструкція газогенератора є суцільнометалевою зварною. Корпус 2 газогенератора виконано у вигляді циліндру $\varnothing 554$ мм. До нижньої частини корпусу 2 приварено днище 1, над яким встановлені колосникові решітки.

До верхньої частини корпусу газогенератора кріпиться з'єднувальний фланець 9. Колосникові решітки складаються із двох частин: нерухомої 20 і рухомої 21. Нерухома частина колосникової решітки виготовлена штампуванням з листової сталі та прикріплена до корпусу газогенератора двома опорними кутками і двома кронштейнами. Рухома частина колосникової решітки відлита з ковкого чавуну і вільно лежить на опорних кронштейнах внутрішньої частини нерухомої решітки. Для повороту рухомої частини

решітки у стінці корпусу газогенератора зроблено отвір із заглушкою 3, крізь який проходить вал. Зовнішній кінець валу виготовлений у вигляді квадрату під ключ 14 мм, а внутрішній кінець має виступ, який входить у паз осі рухомих решіток. Заглушка одночасно обмежує кут повороту рухомої частини колосникової решітки.



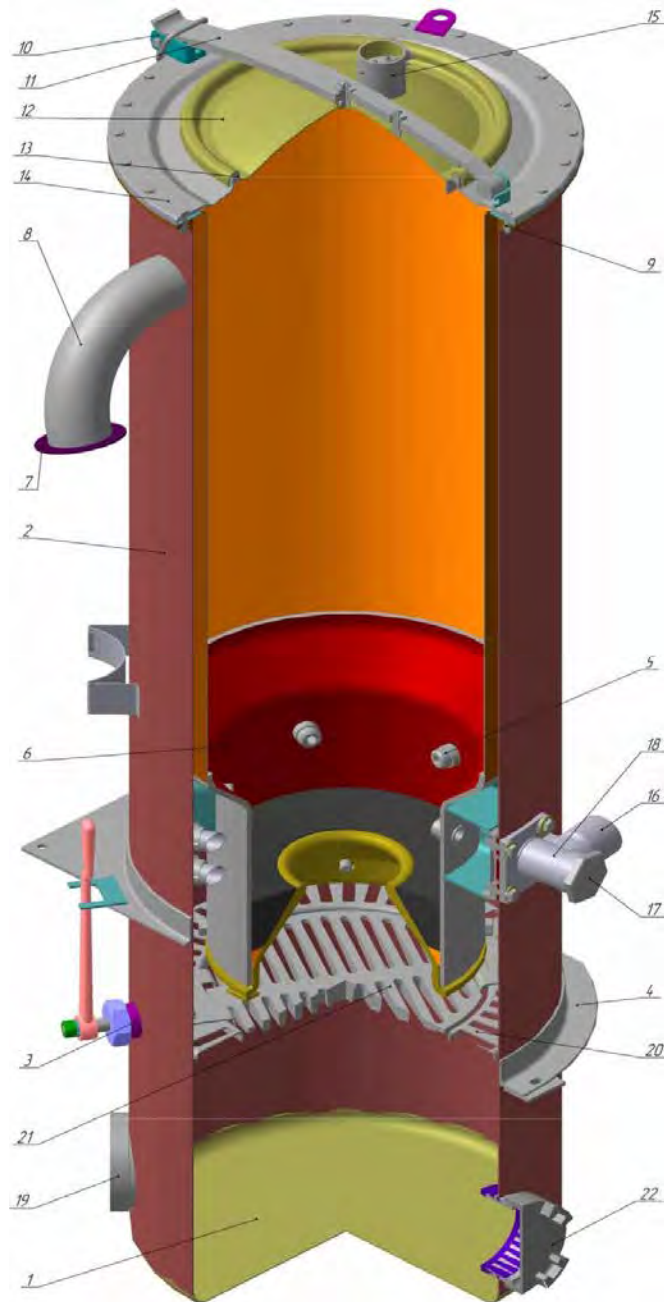
**1 – прямопоточковий газогенератор, 2 – інерційний очищувач газу (циклон);
3 – візок; 4 – охолоджувач газу; 5 – підігрівач двигуна; 6 – вертикальний
очищувач газу (скрубєр); 7 – ДВЗ; 8 – насос; 9 – пристрій для
розпалювання газогенератора**

Рис. 7.8. Схема мобільної газогенераторної установки "НАТА-3"

Патрубок відбирання газу 8 приварено до корпусу газогенератора у верхній його частині. З метою рівномірного відбирання газу встановлений відбивний козирок 7.

В конструкції передбачено два різьбові люки: встановлений над днищем люк зольника 22 для усунення золи і люк зони відновлення 19. Для

забезпечення герметичності з'єднань під кришки люків встановлено прокладки з азбосталевого полотна.



1 – днище, 2 – корпус, 3 – заглушка, 4 – опорний пояс газогенератора задній, 5 – фурма, 6 – камера газифікації, 7 – фланець, 8 – патрубок відведення газу, 9 - з'єднувальний фланець, 10 – кронштейн рукоятки запору, 11 – ресора, 12 – кришка завантажувального люка, 13 – шнур азбестовий, 14 – фланець завантажувального люка, 15 – патрубок паровідвідний, 16 – зворотний клапан, 17 – пробка, 18 – патрубок повітропровідний, 19 – люк зони відновлення, 20 – решітка нерухома, 21 – колосникова решітка, 22 – люк зольника
Рис. 7.9. Прямопоточковий газогенератор

З метою з'єднання повітропровідного патрубку 18 з камерою газифікації 6 в корпусі газогенератора передбачено фасонний отвір. Патрубок 18 відлитий із сірого чавуну, на вихідній частині якого встановлений зворотний клапан 16 для перешкоджання виходу газу з газогенератора при зупинці двигуна. Отвір для розпалювання газогенератора закривається різьбовою пробкою 17 патрубку 18. Герметичність з'єднань забезпечується азбосталевими прокладками.

У верхній частині газогенератора передбачено фланець завантажувального люка 14. По окружності кришки завантажувального люка 12 виготовлено жолобок, у який закладено азбестовий шнур 13. Притискання кришки до фланця завантажувального люка забезпечується пласкою пружиною 11, виготовленою з двох листів ресорної сталі. Затягування пружини здійснюється рукояткою 10.

У корпусі газогенератора встановлений бункер з камерою газифікації. Корпус бункера $6 \text{ } \varnothing 498 \text{ мм}$ виготовлений з листової низьковуглецевої сталі товщиною 3 мм. Фланець верхньої частини корпусу бункера з'єднаний із фланцем корпусу газогенератора 2 болтами 15. З метою забезпечення герметичності з'єднань фланця бункера з фланцем газогенератора і фланця бункера з фланцем завантажувального люка встановлені азбестові прокладки.

Ущільнювальні прокладки газогенератора змащені графітовим мастилом, яке покращує герметичність з'єднань і зберігає їх при розбиранні і збиранні вузлів газогенератора.

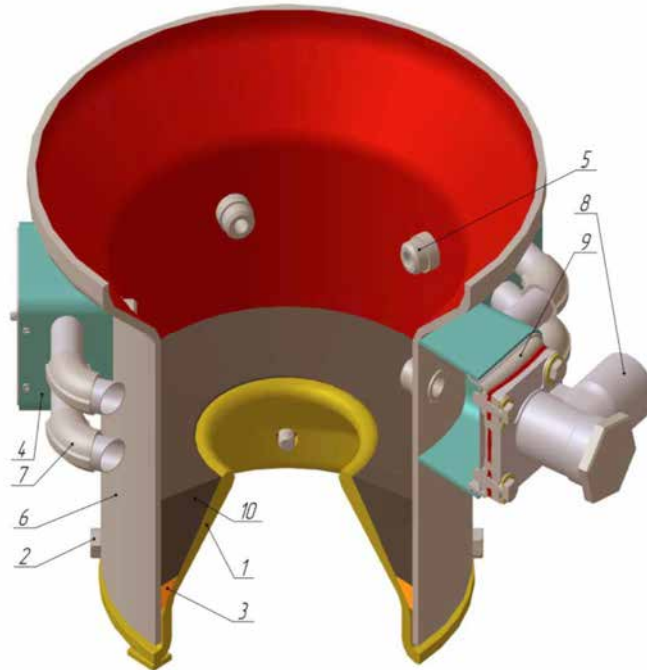
Камера газифікації (рис. 7.10) виготовлена у вигляді зварної конструкції з литим вкладишем з хромкремністого сплаву. Матеріал корпусу камери – листові вуглецева сталь 35, товщиною 8 мм, має форму циліндра з внутрішнім діаметром 340 мм. Верхня частина циліндра розвальцьована до діаметра корпусу бункера. В нижній частині корпусу камери встановлено на чотирьох штирях вкладиш форми зрізаного конуса з діаметром горловини 140 мм. Між корпусом камери та вкладишем встановлено ущільнюючий азбестовий шнур.

На корпусі камери встановлено п'ять рівномірно розташованих по колу фурм із спільним прохідним перерізом $6,5 \text{ см}^2$. До чотирьох фурм по трубах 7 повітря подається від повітророзподільної коробки 4, в якій встановлена п'ята фурма. Повітророзподільна коробка виготовлена зі сталі товщиною 4 мм і приварена до корпусу камери. Із внутрішньої сторони фланця коробки приварено чотири бобишки з різьбою під болти з'єднання камери з повітропровідним патрубком і корпусом газогенератора. Повітря підводиться по трубах до кожної фурми окремо.

Система очищення газу в установці комбінована і складається з інерційного очисника (циклону) – для попереднього очищення та вертикального очисника – для тонкого остаточного очищення газу.

Інерційний очищувач газу (рис. 7.11) виготовлений з низьковуглецевої листової сталі. Робочою частиною інерційного очищувача є внутрішній корпус, до якого підводиться газ по патрубку 5. Патрубок підведення газу приварений до корпусу по дотичній з одночасним нахилом під кутом 15° униз, внаслідок чого газ у корпусі рухається по спіралі, що сприяє виділенню з газу часток незгорілого палива, а також пилу, сажі та ін. Ці частки мають, у порівнянні з

газом, більшу питому вагу, у результаті чого вони притискаються відцентровою силою до стінок корпусу і направляються вниз до пилозбирача.



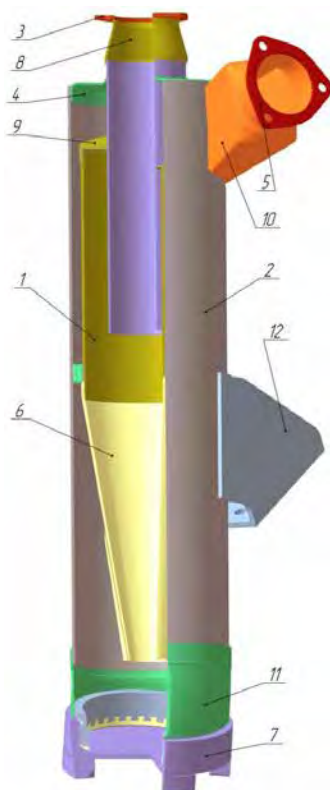
1 – вкладиш камери газифікації; 2 – болт опорний; 3 – шнур азбестовий; 4 – коробка подачі повітря, 5 – фурма; 6 – корпус камери газифікації; 7 – труби подачі повітря; 8 – патрубок повітропровідний; 9 – кришка коробки підведення повітря; 10 – вставка камери газифікації
Рис. 7.10. Корпус камери газифікації газогенератора

Для збереження руху газу по спіралі, на значній за площею ділянці до нижньої частини корпусу приварено напрямний конус 6. Верхню частину корпусу закриває кришка 4 з патрубком відбирання газу 3. Патрубок розташовано на осі корпусу і за довжиною він сягає половини висоти корпусу. Таким чином, відбирання газу здійснюється із зони з найбільш чистим газом. Внутрішній корпус очищувача розміщено у зовнішньому кожусі 2. Повітряний прошарок між ними слугує теплоізолятором, оскільки при зниженні температури газу можливе випадання конденсату на стінках внутрішнього корпусу, що різко, погіршує якість очищення газу.

Нижня частина зовнішнього кожуха очищувача є пилозбирачем. Для очищення пилозбирача від пилу, що накопичився, встановлено різьбовий люк 7 з ущільненням з азбостального полотна. Патрубки введення та відбирання газу з'єднані з газопроводом за допомогою фланців. При складанні циклона повинна бути забезпечена герметичність зовнішнього кожуха та кришки люка пилозбирача, тому що при порушенні герметичності погіршується якість очищення газу в очищувачі.

Пил, що накопичився, та конденсат з інерційного очищувача корисно додавати в паливо, що завантажується в газогенератор, оскільки відходи, що збираються, є дрібнодисперсним вуглецем і конденсатом піролізних смол.

Викидання цих речовин небажане, тому що вони є шкідливими забруднювачами навколишнього середовища.

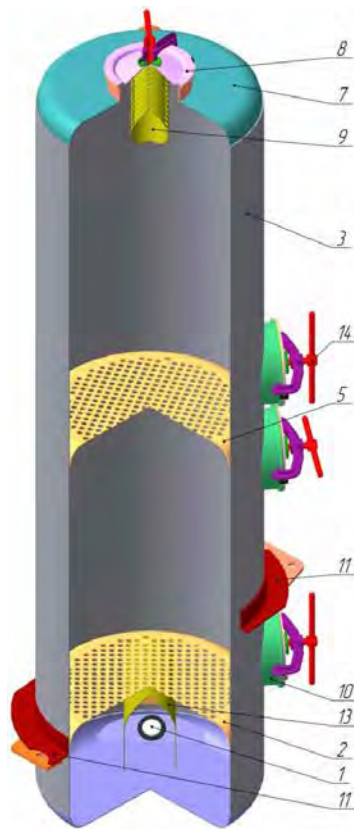


1 – корпус циклона; 2 – кожух корпуса циклона; 3 – фланець патрубка відбирання газу; 4 – кришка кожуха циклона; 5 – фланець патрубка введення газу; 6 – конус корпусу циклона; 7 – кришка люку; 8 – патрубок відбирання газу; 9 – кришка корпусу циклона; 10 – патрубок введення газу в циклон, 11 – перехідник кожуха циклона

Рис. 7.11. Інерційний очищувач газу газогенераторної установки

Вертикальний очищувач генераторного газу (рис. 7.12) містить два шари (висотою 420 мм) очисних кілець, які являють собою трубочки з тонкої листової сталі $\varnothing 15$ мм і довжиною 12...15 мм. Проходячи через очисні кільця, зволожені конденсатом, частки, що перебувають у газі, прилипають до кілець і частково змиваються стікаючим униз конденсатом. Вертикальний очищувач складається з циліндричного корпусу 3 діаметром 384 мм, виготовленого із двоміліметрової листової сталі. До верхньої частини корпусу приварена кришка 7, в якій виготовлено люк 8 для засипання очисних кілець. До нижньої частини корпусу приварене дно, в конструкції якого передбачено спускний кран 1 для зливання води під час промивання очисника та для спускання конденсату. Конденсат зливають у спеціальну тару з метою його подальшої утилізації.

Усередині корпусу розташовано дві опорні сітки 2 та 5, на яких знаходяться очисні кільця Рашига 6 (на рис. 7.12 не показано). Сітки відштамповані з листової сталі. Верхню сітку 5 прикріплено до корпусу трьома штирями 4 (на рис. 7.12 не показано), нижню сітку 2 – приварено до корпусу.



1 – кран спускний; 2 – сітка нижня; 3 – корпус; 4 – штирі; 5 – сітка верхня; 6 – кільця Рашига; 7 – кришка корпусу; 8 – люк для засипання кілець; 9 – труба відбирання газу; 10 – люк; 11 – фланець опорний; 12 – патрубок підведення газу; 13 - відбивач газу; 14 – скоба

Рис. 7.12. Вертикальний очищувач генераторного газу газогенераторної установки

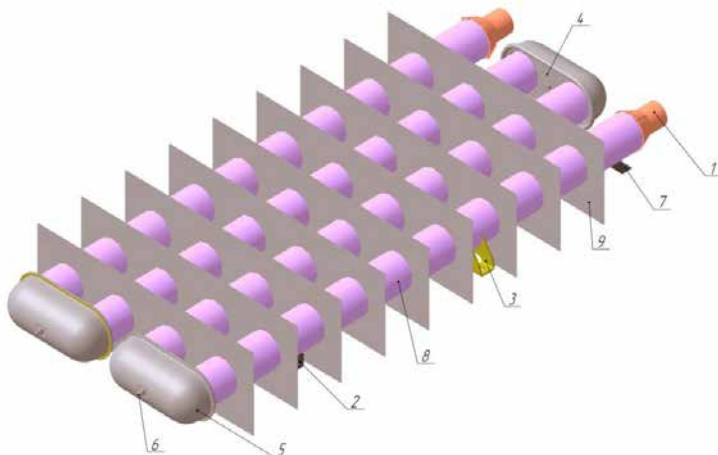
Для засипання та вилучення очисних кілець на корпусі очисника розташовано три люки 10 – два для нижнього шару, а один для верхнього шару. Люки закриваються штампованими кришками, які притискаються до основи люка за допомогою скоб болтами. Щільності прилягання кришок досягають установкою під усі кришки ущільнювальних прокладок.

У нижній частині корпусу очисника знаходиться патрубок підведення газу 12 (на рис. 7.12 не показано), який приварено до відбивача газу 13. Відбивач газу виготовлений у вигляді ковпака, нижні частини якого мають вирізи, через які газ проходить над поверхнею конденсату, різко повертаючи вгору, що забезпечує додаткове очищення газу. Рівень конденсату визначається положенням зливальної трубки, ввареної в корпус на рівні половини висоти вирізів відбивача газу 13. Газ із очисника відбирається у верхній частині через трубу для відбирання газу 9. Зовні до корпусу очисника приварено два опорні фланці 11, за допомогою яких очисник кріпиться до швелерів.

Охолоджувач газу (рис. 7.13) встановлено для покращення процесу охолодження генераторного газу. Його розташування перед системою тонкого

очищення газів у схемі мобільної газогенераторної установки сприяє найбільшому випаданню конденсату на очисних кільцях.

Охолоджувач газу виготовлений у вигляді чотирьох послідовно з'єднаних труб \varnothing 102 мм з товщиною стінки 2 мм. Між собою труби з'єднані трьома фланцями 4 і кришками 5.



1 – патрубок підведення газу; 2 – опора охолоджувача; 3 – кронштейн опорний; 4 – основа кришки; 5 – кришка; 6 – болт; 7 – опора; 8 – труба охолоджувача; 9 – пластина охолоджувача

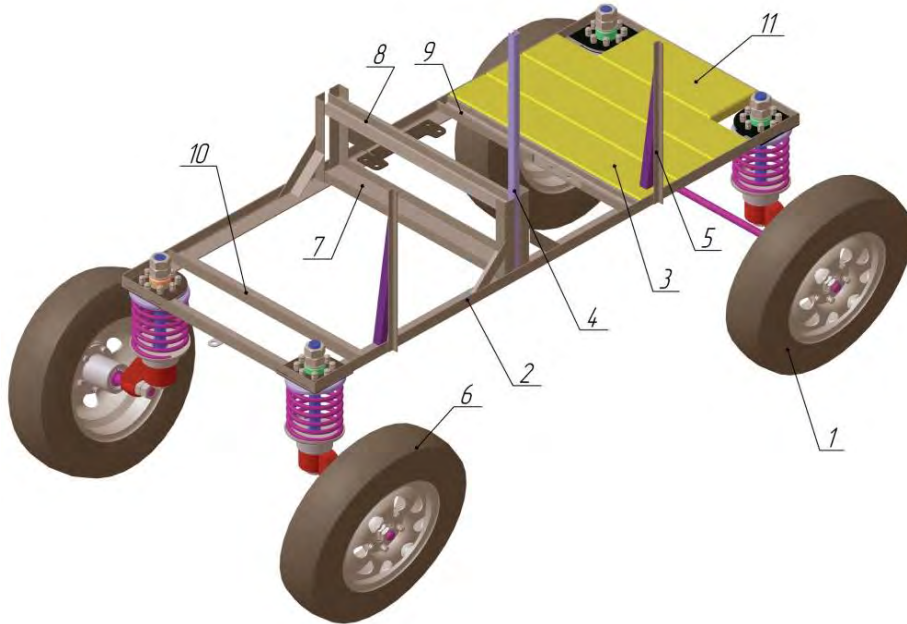
Рис. 7.13. Охолоджувач газу мобільної газогенераторної установки

Герметичність з'єднання фланців 4 з кришками 5 забезпечується використанням азбестових шнурів, розташованих в жолобках фланців. Кришки 5 виготовлені штампуванням з листової сталі та прикріплені до фланців болтами 6. Кінці труб підведення і відведення газу оснащені перехідниками 1. Охолоджувач газу на несучій рамі закріплений по трьом точкам: труби приварені до кронштейну 2 і двох кронштейнів 7.

Відключення охолоджувача газу здійснюється заслінкою, встановленою на трубі підключення охолоджувача. З метою кращого очищення газу в труби охолоджувача закладається фільтрувальний елемент (солома-січки, волокна термічно розширеного графіту та ін.), що додатково дозволяє очистити генераторний газ від піролізних смол. Фільтрувальний елемент замінюється по мірі засмічення. Відпрацьований фільтрувальний елемент є висококалорійним паливом для газогенераторної установки. З метою візуального контролю тиску опору фільтрувального елементу проходженню генераторного газу, який значно збільшується по мірі засмічення, і температури генераторного газу на трубі підключення охолоджувача, встановлено відповідно манометр і термометр.

Для кріплення газогенератора і системи тонкого очищення на рамі візка (рис. 7.14) встановлено дві балки, виготовлені зі швелерів. Газогенератор і система тонкого очищення прикріплені до балок опорними поясами, привареними до їхніх корпусів. Для забезпечення точності встановлення

газогенератора і системи тонкого очищення у вертикальному положенні між балками і опорними поясами, при необхідності, встановлюють регульовальні шайби.



1 – колесо заднє; 2 – рама; 3 – настилення; 4 – стійка системи тонкого очищення; 5 – опора охолоджувача; 6 – колесо переднє; 7 – швелер опорний; 8 – опора газогенератора; 9 – опора скрубера; 10 – опора циклона; 11 – опора двигуна

Рис. 7.14. Візок мобільної газогенераторної установки

Система попереднього очищення газів кріпиться до корпусу газогенератора за допомогою кронштейна і стяжного хомута. Іншим місцем кріплення даної системи є фланцеве з'єднання патрубків підведення газу в систему попереднього очищення з патрубком відбирання газу з газогенератора.

Охолоджувач газу встановлений на трьох кронштейнах, прикріплених до лонжеронів рами. У місцях кріплення охолоджувача газу до кронштейнів встановлені гумові прокладки, з метою компенсації перекошування рами при русі візка по нерівностям.

Вентилятор розпалювання встановлений на лівій підніжці візка і приєднаний до останньої двома болтами. Підігрівач кріпиться до задньої частини рами. Із внутрішньої сторони рами під кожну пару болтів кріплення підігрівача встановлена загальна пластина-прокладка з метою запобігання деформацій кутка рами. Повітродувка встановлена на головці блоку циліндрів і прикріплена трьома шпильками головки блоку.

Трубопровід призначений для з'єднання елементів газогенераторної установки і підведення газу в двигун внутрішнього згоряння. Увесь трубопровід виконано із труб однакового поперечного перерізу $\varnothing 63,5$ мм з товщиною стінок 1,5 мм. З елементами газогенераторної установки і один з

одним труби з'єднані шлангами, які стягуються хомутами або кріпляться за допомогою фланців. Жаростійкими шлангами з'єднані труби: відбирання газу з газогенератора; підведення газу в систему попереднього очищення газів; підведення газу до охолоджувача; підведення повітря в газогенератор; підведення газоповітряної суміші в підігрівач. В інших з'єднаннях використані звичайні шланги або фланцеві кріплення.

Труба відведення паливних газів з підігрівача має телескопічне з'єднання, яке стягується хомутом. Трубопровід додатково кріпиться до рами візка кронштейнами. В трубі підведення газу до системи тонкого очищення (у нижчій точці) виконаний технологічний отвір \varnothing 4 мм для стікання конденсату. На трубі підведення газу до змішувача встановлений штуцер з різьбовою пробкою для спускання конденсату.

При проектуванні газогенератора постало питання забезпечення мінімальних втрат тиску в системі, які пов'язані з роботою: газогенератора, інерційного очищувача газу, вертикального очищувача, охолоджувача газу і системи трубопроводів. Мінімізація втрат тиску в системі трубопроводів досягається використанням труб змінного діаметра та ретельним підбором і монтажем всіх елементів системи трубопроводів.

7.4. Світовий досвід та практична реалізація виробництва генераторного газу

Яскравим прикладом реалізації на практиці технологічної схеми виробництва генераторного газу є газогенераторні станції фірми «Наша Енергія» (виробництва України). Дана фірма виготовляє енергетичні автономні комплекси – електрогазогенератори.

З метою контролю за виробничими процесами використовується автоматика виробництва Хайцман (Німеччина) або Вудворд (Англія).

В системі використовуються промислові двигуни великої потужності із чотиритактним компресійним спалахуванням. Двигуни для надійного електропостачання скомплектовані усім необхідним. Використовуються наступні моделі двигунів: Первомайськ Дизельмаш (Україна); GenPower (Туреччина), AKSA (Туреччина); Янбахер (Німеччина); ЯМЗ (Росія).

Газовий та газодизельний режим роботи установок мають свої недоліки та переваги. Перевагами газового режиму є: низька собівартість виробленої електроенергії; повна утилізація відходів; термін окупності 1–1,5 роки. Недоліками є: інертність роботи газової системи; ускладнений запуск газогенератора при температурі мінус 40 °С та нижче; стійкі показники роботи установки спостерігаються в діапазоні від 50 до 100 % потужності.

Перевагами газодизельного режиму є: легкість роботи в режимах переключення та підключення потужностей в діапазоні 30–50 % потужності; полегшений запуск газогенератора при низьких температурах; можливість працювати на дизелі при відсутності основного палива. Недоліком є висока вартість отриманої електроенергії – близько 3 грн/кВт.

Дані установки працюють, як уже зазначалося, в двох режимах – газовому та дизельному. Технічні параметри електрогазогенераторів наведені в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1. Технічні параметри електрогазогенераторів

Тип	Потужність електрична, кВт	Продуктивність за газом, м ³ /год	Вид палива	Витрати палива, кг/год.	Габаритні розміри, мм
УГК-60	60 двигун-генератор ЯМЗ*	180	Паливні брикети, деревинна тріска, відходи деревопереробної промисловості 60×60 мм вологістю W ^p =12–20 %	50–65	2300×1600×3800
УГК-100	100 двигун-генератор AKSA, AD-700DD*	400		120–140	
УГК-200	200 двигун-генератор AKSA, AD-700DD*	750		200–220	

*– тип дизельного двигуна в газодизельному режимі.

З метою виробництва солового (піролізного, генераторного та синтез) газу використовується газогенератор з технічно реалізованою пошаровою газифікацією за принципом оберненого процесу. За даним методом газифікації можна зменшити вміст смоли в генераторному газі до мінімального значення 0,1 г/м³, однак навіть цей показник є високим при використанні газу для живлення поршневіх машин. Отже, отриманий газ додатково очищується та охолоджується.

В представленому на рис. 7.15 варіанті газогенераторної установки завантаження здійснюється стрічковим транспортером з подачею з бункера об'ємом V=6м³ транспортерною стрічкою 10 м з шлюзовим живлювачем. Витрати палива на 1 кВт електроенергії приблизно складають від 0,7 до 1,2 кг/год. Для системи фільтрації використовуються фільтри з відходів виробництва із заміною раз на два-три тижні.

Газогенераторна установка має високі екологічні показники – вихлоп двигуна містить в 2,5 рази менше шкідливих домішок ніж на дизельному паливі.

Енергетика більшості країн, що розвиваються, характеризується широким використанням ДВЗ в якості генераторів для забезпечення потреб в електроенергії, особливо в сільській місцевості. Це обумовлено відсутністю розгалуженої системи енергетики. Серед країн, що розвиваються, безперечними лідерами в розвитку технології газифікації біомаси є: Бразилія, Філіппіни, Індія,

Китай, ЮАР, Куба, Малі, Кенія, Бурунді та Мадагаскар, де вона закріплена державними програмами, що мають на меті усунення залежності внутрішньої економіки від паливного імпорту. Найбільш активно технологія газифікації розвивається на Філіппінах, в Індії, Бразилії, Кубі та в ЮАР.



Рис. 7.15. Електрогазогенераторна установка фірми «Наша Енергія» (Україна) марки УГК-100

Досвід ЮАР є особливо цікавим, оскільки ембарго, накладене на ЮАР в 1975 році, поряд з відсутністю власних запасів газу та нафти, призвело до серйозного обмеження споживання палив нафтового походження, а всі галузі промисловості, по можливості, були переведені на генераторний газ, отриманий з кам'яного та бурого вугілля.

З метою ефективного використання потенціалу біопалива створено нове покоління газогенераторних установок з коефіцієнтом корисної дії у межах від 85 до 92 %. Сучасні зразки газогенераторного обладнання є високоефективними і відрізняються універсальністю (багатопаливністю), наявністю систем автоматичного керування процесами завантажування та спалювання сировини, удосконаленими конструкціями камери газифікації і системи фільтрації газу.

Цікавими є конструкції газогенераторних установок для задоволення силових і теплових потреб малих фермерських господарств, сільськогосподарських підприємств та домогосподарств. Приклад такої установки представлено на рис. 7.16.



Рис. 7.16. Газогенераторна установка потужністю 200 кВт, що працює на рослинних залишках сільськогосподарського виробництва вологістю до 30 % (розробка Ліонінського інституту енергетичних ресурсів (КНР))

Представлена установка працює на рослинних залишках сільськогосподарського виробництва вологістю до 30 %, які зі складу зберігання рослинної сировини шнековим транспортером подаються в газогенератор. Витрати палива складають від 80 до 120 кг/год. Вироблений газогенератором газ проходить очищення від механічних домішок в інерційному очищувачі газу, вертикальному очищувачі, далі охолоджується і проходить остаточне очищення в фільтрі тонкого очищення.

Для видалення з газу складних хімічних сполук використовується електрофільтр. Очищений та охолоджений генераторний газ закачується в газгольдер, з якого, за необхідністю, подається до споживача для забезпечення теплових потреб.

Аналогічним чином працює і установка, представлена на рис. 7.17.

Дана установка характеризується високим ККД за рахунок автоматизації технологічних процесів газифікації рослинних відходів та робочих процесів подачі палива та усунення золи. Біопаливом є паливні гранули або брикети з біомаси рослинного походження. Питома витрата палива при вологості 30 % складає від 130 до 160 кг/год.

Використання паливних гранул є найбільш придатним для автоматизації. Паливні гранули зберігаються у відповідних бункерах, з яких транспортуються безпосередньо до енергетичної установки. Високої ефективності в опалювальний період можна досягти додатково, якщо встановити при газогенераторній установці газгольдери (акумуляторні місткості), які можуть продовжувати роботу опалювальної системи протягом 1-3 днів після останнього завантаження біопалива, залежно від об'єму газгольдера. Встановлення газогенератора з газгольдером зменшує витрати біопалива на 25 % через безперебійну роботу газогенератора на сталих режимах.

Збільшується термін служби камери газифікації та систем фільтрації газогенераторної установки при мінімізації її роботи на перехідних режимах через зменшення утворення смол, летких речовин і ін.



Рис. 7.17. Газогенераторна установка тепловою потужністю 300 кВт, що працює на рослинних залишках сільськогосподарського виробництва вологістю до 40 % (розробка Ліаонінського інституту енергетичних ресурсів (КНР))

На рис. 7.18 представлено газогенераторну установку силовою потужністю 50 кВт, яка працює як на деревинній стружці, так і на залишках сільськогосподарського виробництва вологістю 40 %, актуальну для малих фермерських господарств та невеликих сільськогосподарських підприємств, відрізняється компактністю, легкістю монтажу.



Рис. 7.18. Газогенераторна установка силовою потужністю 50 кВт, яка працює на деревинних рослинних залишках вологістю до 40 % (розробка Ліаонінського інституту енергетичних ресурсів (КНР))

При необхідності забезпечення будь-якого виду робіт в господарстві (наприклад приведення в дію агрегатів для поливу), при проведенні сезонних робіт установка може монтуватися безпосередньо на полі або на причепі. Установка не комплектується системами керування робочими процесами і вимагає під час роботи нагляду оператора, оскільки через малі розміри завантажувального бункера газогенератор потрібно заповнювати паливною сировиною кожні 4-5 год.

Установка відрізняється порівняно високою вартістю, середнім ККД (від 65 до 70 %) і незначною питомою вагою установки в межах від 45 до 50 кг/кВт.

З точки зору виробництва електричної енергії найбільшу цікавість представляє газогенераторна установка ENEA виробництва Італії (рис. 7.19) силовою потужністю 80 кВт/год, продуктивністю за газом 120 м³/год, яка працює на деревинних відходах вологістю від 25 до 30 %.



Рис. 7.19. Газогенераторна установка ENEA (виробництво Італії) силовою потужністю 80 кВт, яка працює на деревинних відходах вологістю від 25 до 30 %

Дана установка відрізняється високою надійністю роботи, працює на деревинних трісках переважно листяних порід дерев і під час роботи на номінальній потужності споживає від 50 до 55 кг/год деревинних відходів у вигляді цурок розміром 200×80×80 мм. Отриманий генераторний газ подається з установки в газовий двигун-генератор.

Дана модель характеризується дещо зниженим ККД, невисокою вартістю, оскільки не комплектується електронною системою слідкування за технологічними параметрами роботи, а також відсутні системи автоматичного завантаження сировини і видалення золи.

Призначена для забезпечення електричною енергією технологічні процеси аграрних виробництв. Обслуговування полягає в періодичному

спостереженню за приладами та в подачі палива. Правильна експлуатація установки виключає можливість витікання генераторного газу, або виникнення пожежі. Монтаж установи здійснюється як на відкритому повітрі (під накриттям), так і в приміщенні.

Установка (рис. 7.20) виробництва фірми Spanner RE GmbH має підвищену надійність за рахунок автоматизації робочих процесів і достатньо високий ККД (від 89 до 92 %).



Рис. 7. 20. Газогенераторна установка фірми Spanner RE GmbH силовою потужністю 100 кВт, яка працює на деревних відходах вологістю до 30 %

Отриманий генераторний газ може використовуватися як для силових, так і для теплових потреб. Газогенераторна установка працює на деревинних пелетах, виготовлених згідно з європейськими нормами якості, витрати яких установкою складають 35 кг/год. Робота установки контролюється сучасними електронними системами. Конструкція установки відрізняється високою пожежною безпекою.

Недоліками є висока вартість та специфічні вимоги до монтажу, що зумовлені вимогами експлуатації і додатковими вимогами безпеки такого типу обладнання в країнах ЄС.

Газогенераторні станції потужністю більше 350 кВт (рис. 7.21) є невеликими хімічними заводами з усіма необхідними вимогами до матеріалів, з яких повинне бути виготовлене обладнання та вимогами до охорони навколишнього середовища. Окрім виробництва генераторного газу, в значній кількості накопичуються відходи у вигляді золи та смолистих генераторних вод, які потрібно утилізувати. Тому, подібні електрохімічні установки мають економічну ефективність при виробництві хімічних продуктів з достатньо

високою ринковою ціною, при цьому одночасно виробляючи генераторний газ для силових або теплових потреб.



Рис. 7. 21. Газогенераторна станція (виробництво КНР) силовою потужністю 350 кВт, яка працює на залишках сільськогосподарського виробництва вологістю до 30 %

Така газогенераторна станція розташована в місті Бейші (КНР) і призначена для виробництва генераторного газу з подальшим виробництвом електроенергії. Станція працює на пелетах, або брикетах з сільськогосподарської рослинної сировини.

В місті Калундборг (Данія) компанією DONG Energy була побудована установка для газифікації біомаси, яка працює за технологією LTCFB (рис. 7.22) і виробляє із соломи генераторний газ, який в подальшому використовується на найближчій електростанції. Це процес газифікації біомаси на циркулюючому рідкому дні. Біомаса конвертується в газ, який спалюється в теплотехнічному обладнанні енергетичної станції. Дана технологія дозволяє вилучати золу з камери горіння теплотехнічного обладнання, завдяки чому виникає можливість використання різних видів твердого палива на основі рослинної біомаси без ризику появи грубого нальоту та корозії обладнання.

Представлена технологія LTCFB дозволяє отримувати газ з рослинної сировини при температурі нижчій за точку плавлення золи, що робить можливим процес дегазації соломи на установці. В газогенераторі LTCFB солома падає на дно відсіку для піролізу, де вона нагрівається приблизно до 650⁰С. Оскільки процес протікає за відсутності кисню, солома не загоряється, а підлягає піролізу (80 %) і перетворюється на кокс (20 %). Пара з циркулюючими в ній частинками піску руйнує частинки коксу, в результаті

чого вони опускаються на дно відсіку для піролізу і потрапляють в реактор, в якому кокс газифікується та виробляється газ.



Рис. 7.22. Газифікаційна установка потужністю 6 МВт в м. Калундборг (Данія)

При газифікації коксу у окремому відсіку температура не повинна бути високою, щоб не протікав процес плавлення золи. Зола, що містить лужні солі та фосфор, може бути видалена з відсіку, тобто процес отримання газу не викликає появи нальоту та корозії обладнання. Попіл, що залишився, може бути використаний в якості мінеральних добрив.

У промислово-розвинених країнах газогенераторні установки використовуються, головним чином, для транспортних засобів в галузях з надлишком біомаси, переважно в сільському господарстві. Подібні роботи ведуться в Германії, Фінляндії, Данії, Канаді, США, Голландії та Японії.

Газогенераторні транспортні засоби поділяються на дві групи: тимчасово переобладнані для роботи на генераторному газі з рідкого палива та спеціально спроектовані для роботи на генераторному газі.

Найбільш вдалим технічним рішенням є газогенератор типу Imbert. Автомобілі, оснащені газогенераторами даного типу, випускались і такими компаніями як: GM, Ford, Mercedes-Benz. В наш час фірми та підприємства Франції, Швеції (VOLVO, рис. 7.23), України («Аттік» рис. 7.24, ООО «Наша

енергія», Житомирський національний агроекологічний університет рис. 7.25), Росії (група компаній «Адаптика») випускають автомобільні газогенератори, які не потребують серйозної переробки автомобіля і встановлюються: всередині кузова, на причепі, між кабіною та кузовом.



Рис. 7.23. Газогенераторний трактор фірми Volvo, який працює на пелетованих рослинних відходах

До недоліків сучасних газогенераторів транспортного типу відносяться: значні габаритні розміри установки; зменшення корисної площі та вантажопідйомності транспортного засобу; періодичність завантаження бункера газогенератора призводить до розгерметизації системи та до нестабільності генераторного процесу; інтенсифікація процесу газифікації забезпечується ретельною попередньою підготовкою палива, підвищуючи вартість генераторного газу.

У сучасних конструкціях газогенераторних установок використовують повітряну газифікацію. Генераторний газ, отриманий шляхом повітряної газифікації, має вищу теплотворну здатність в межах від 4 до 6 МДж/м³. Даний газ, після очищення, використовується при роботі ДВЗ в якості палива.

Сучасні газогенератори працюють з ваговим напруженням поперечного перерізу шахти до 300 кг/м²·год. (дані вказані для коксу та антрациту) на відміну від відомих – 150-180 кг/м²·год. Однак, якщо підвищувати вище вказаний показник до 650 кг/м²·год. значно погіршується склад газу, зростає вміст в газі CO₂ та водяної пари. Для деревинного палива вагове напруження поперечного перерізу шахти складає від 50 до 90 кг/м²·год.



Рис. 7.24. Газогенераторна установка виробництва української фірми «АТТИК», тепловою потужністю 90 кВт, яка працює на відходах деревної біомаси вологістю до 25 %

Сучасні наукові дослідження автотранспортних газогенераторних установок спрямовані на вивчення питання пуску ДВЗ при низьких температурах, падіння потужності двигуна при переведенні його на генераторний газ, зменшення ваги і габаритів газогенераторної установки шляхом використання сучасних більш досконалих методів очищення та охолодження; використання нових матеріалів та технологій при конструюванні та виробництві вузлів газогенератора, подовження терміну служби, підвищення ремонтпридатності та оптимізації компоновки складових частин установки.

Перенесення газогенераторної установки в передню частину автомобіля дозволяє одержати більш правильний розподіл ваги на передню і задню осі в навантаженому стані (на задню вісь не більш 70% ваги автомобіля).

Монтаж газогенераторної установки автомобіля ГАЗ-53А було виконано з врахуванням збереження корисної площі кузова автомобіля і більш рівномірного розподілу навантаження на задню і передню вісі автомобіля. Газогенератор розташований з лівої частини позаду кабіни водія (рис. 7.25), прикручений за допомогою кутників до рами. Очисник циліндричної форми розташований під платформою вздовж лонжеронів і з'єднаний з газогенератором газопроводом. На очиснику розташовано електровентильатор для скорочення часу розпалу палива в газогенераторі. Охолоджувач

розташований під платформою вздовж лонжеронів для кращого охолодження повітрям. Таке розташування установки на автомобілі ГАЗ-53А є оптимальним і не впливає на технічні характеристики автомобіля.

Однією з важливих проблем адаптації двигунів внутрішнього згоряння до газогенераторного живлення є втрата потужності, що може досягати 40%. Проведені в лабораторії факультету інженерії та енергетики ЖНАЕУ дослідження зводилися до поглибленого вивчення процесів в системі «газогенераторна установка – двигун внутрішнього згоряння» з метою розробки системи заходів з підвищення її енергоефективності.

Визначені основні параметри процесу газифікації, які ґрунтуються на умовах газифікації, такі як: вид палива, його елементарний склад та характеристики; приблизний склад газу, що утворюється, температура та вологість газу на виході з газогенератора та на виході з фільтруючо-охолоджувального блоку. Зокрема для різних видів біомаси встановлено такі параметри: нижчу теплотворну здатність суміші, витрату повітря для газифікації, вихід сухого газу з 1 кг палива, масу сухого нормального газу; вміст водяної пари в газі. Окремо були досліджені показники роботи двигуна автомобіля ГАЗ-53А на газогенераторному живленні. Технічні характеристики розробленої газогенераторної установки наведені в таблиці 7.2.



Рис. 7.25. Автомобіль ГАЗ-53А з газогенераторною установкою виробництва Житомирського національного агроєкологічного університету

Газогенераторну установку раціонально використовувати для автомобілів, які обслуговують сільськогосподарські процеси на невеликих відстанях від джерела біопалива. Оптимальний радіус віддалення від бази складає від 25 до 30 км. Рух газогенераторного автомобіля в міському циклі ускладнений через нестійкий його характер, велику кількість зупинок та маневрів.

Таблиця 7.2. Технічні характеристики автомобіля ГАЗ-53А з газогенераторною установкою

Назва показника	Величина
Вантажопідйомність, кг	4000
Власна маса, кг	3250
Корисна площа платформи, м ²	8,11
Максимальна швидкість, км/год	80
Передаточне число головної передачі	6,83
Паливо	деревні гранули
Витрати палива, кг/100 км	152
Запас ходу автомобіля на одному завантаженні генератора з розрахунків витрат в генераторі 2/3 повного обсягу палива, км	60-70
Максимальна потужність двигуна, кВт при 3200 об/хв	84,6
Ступінь стиснення	6,7
Тип змішувача газу	інжекторний
Система запалювання	аккумуляторна
Процес газифікації	обернений
Грубий очисник-охолоджувач	двохсекційний з перфорованими пластинами
Тонкий очисник	вертикальний циліндричний
Вага газогенераторної установки, кг	250

7.5. Перспективи виробництва генераторного газу в Україні

Щорічно в агропромисловому комплексі України утворюється приблизно 109 млн. т. залишків аграрного виробництва (солома зернових, кукурудзяні рильця та стебла, кошики соняшника та ін.), з яких 49 млн. т. неефективно утилізуються і лише 60 млн. т. використовуються для подальшої переробки.

Із 49 млн. т. відходів, що не використовуються, майже 20 млн. т. можна спрямувати на реалізацію економічно обґрунтованих проектів з виробництва енергії загалом, в тому числі, з використанням газогенераторних технологій зокрема.

Проекти з виробництва теплової та електричної енергії є високовартісними. Наприклад, щоб закупити необхідне обладнання та реалізувати вище зазначені проекти з виробництва тепла та електроенергії (із 20 млн. т. доступних залишків аграрного виробництва) терміном окупності менше п'яти років потрібно інвестицій більш ніж на €2 млрд. В результаті переробки такої кількості рослинних залишків аграрного виробництва може бути отримано енергії еквівалентно 9 млн. т.у.п, або 73 ТВт год на рік, в той час як промисловість України споживає електроенергії близько 36 млн. т.у.п. на рік. Отже, реалізація запропонованих проектів покриє 25 % потреби промисловості України в енергоресурсах, що дозволить зменшити потребу України в імпорті природного газу на 8 млрд. м³ на рік.

Проекти, пов'язані з газифікацією твердої біомаси сільськогосподарських підприємств з метою отримання електричної та теплової енергії, потребують інвестицій в розмірі від €10 000 до €39 000 на одну т біомаси на добу, залежно

від складності конструкції обладнання. Термін окупності зазначених проектів складає приблизно від одного року до п'яти.

Окрім того, подібні проекти є високо екологічними за рахунок зменшення викидів CO_2 . Оскільки при заміщенні енергії, виробленої з 8 млрд. м³ природного газу, енергією, отриманою з відходів сільського господарства, скорочення викидів парникових газів складе біля 15,8 млн. т. CO_2 на рік.

У 2016 році загальний обсяг вирощених в рослинництві культур, таких як зернові, технічні, кормові та овочеві склали 59 млн. т. У рослинництві та в переробній галузі щорічно утворюються 80 млн. т. залишків сільськогосподарського виробництва. Із них 60 млн. т – первинні відходи, які утворюються після збирання врожаю, і 20 млн. т – вторинні відходи, які отримуються внаслідок технологічних процесів переробки цільової сировини в харчові продукти.

Солома зернових є найбільшою фракцією первинних відходів рослинництва – 24 млн. т. Із них 18 млн. т є первинними відходами колосових культур (пшениця та ячмінь), що складає 23 % відходів рослинництва, з яких доцільно виробляти силову та електричну енергію в тому числі і шляхом залучення газогенераторних технологій.

Отже, солома колосових є одним з найбільш актуальних видів сировини для виробництва енергії шляхом газифікації завдяки наступним факторам:

- значна кількість запасів (18 млн. т);
- високий показник доступної кількості (7,8 млн. т);
- висока теплотворна здатність при газифікації (12000-16000 МДж/т).

Таким чином, одним з найбільш ефективних методів переробки переважно сухих відходів агропромислового виробництва (вологість не повинна перевищувати 40 %) з метою виробництва силової та електричної енергії є газифікація.

У випадку використання зеленого тарифу, тобто більш високого тарифу на електроенергію, вироблену шляхом спалювання генераторного газу з твердої біомаси, термін окупності газогенераторних проектів складе від 4 до 6 років.

Процес виробництва енергії під час газифікації рослинних залишків сільськогосподарського виробництва в Україні доцільно організовувати одним з наступних способів:

- виробництво генераторного газу для теплових потреб;
- виробництво генераторного газу для теплоелектроцентралей (ТЕЦ) з комбінованим виробництвом теплової та електричної енергії;
- виробництво генераторного газу для силових потреб (робота ДВЗ, поршневих машин і т.п.).

Газогенераторне устаткування для виробництва теплової енергії умовно класифікують на газогенератори для фермерських господарств (встановлена потужність до 1 МВт) та центральні котельні з газогенераторами (встановлена потужність понад 1 МВт).

Капітальні затрати на встановлення газогенераторних установок для спалювання твердої біомаси на фермах та в центральних котельнях залежать від

встановленої потужності обладнання. Найменші питомі капітальні витрати в розмірі від €10 000 на 1 т твердої біомаси, що використовується на добу, припадають на газогенератори з автоматичною подачею палива встановленою потужністю від 1 МВт.

Найбільших питомих витрат в розмірі до €38 000 на 1 т. рослинних залишків аграрного виробництва на добу потребують газогенератори періодичної дії встановленої потужності 150 кВт. Також важливою статтею експлуатаційних витрат для газогенераторних установок з періодичною системою завантаження палива до бункера є оплата праці операторів, які здійснюють завантаження палива. При використанні газогенераторних установок з автоматичною подачею палива до бункера газогенератора аналогічна стаття витрат відсутня, однак присутні більш високі експлуатаційні витрати, пов'язані з обслуговуванням автоматичних систем.

Метод використання твердої біомаси, пов'язаний з експлуатацією газогенераторних установок на ТЕЦ із встановленою електричною потужністю від 2 до 20 МВт та тепловою потужністю від 5 до 60 МВт, забезпечує виробництво електричної та теплової енергії з питомими витратами в межах від €30 000 до €39 000 на 1 т сировини, що використовується на добу.

При реалізації проектів з переробки рослинних залишків в теплову та електричну енергію на ТЕЦ власник аграрного підприємства повинен враховувати можливість використання зеленого тарифу на відновлювальну електричну енергію з біомаси. При виробництві електричної енергії та продажу її до центральної електромережі за зеленим тарифом термін окупності проектів з газифікації біомаси АПК на ТЕЦ зменшується з 4-5 років до 2,5-3 років.

Якщо розглянути можливість використання газогенераторних технологій на тому чи іншому підприємстві аграрного сектору України, то для кожного підприємства окремо слід виконати наступні кроки:

1. оцінити потенціал утворення та специфічні характеристики видів сировини рослинного походження, які є в наявності;
2. визначити з якою метою буде здійснена переробка даної сировини;
3. вибрати обладнання та технології переробки;
4. вибрати поставщика технології та обладнання;
5. обрати спосіб фінансування проекту.

Запровадження вище зазначених кроків дозволить підприємствам України позбутися енергетичної залежності від палив традиційного походження і дасть змогу, як забезпечувати власні енергетичні потреби, так і постачати енергоресурси в центральні мережі держави.

Окрім вище перерахованих фактів, застосування газогенераторних технологій має і ряд економічно-екологічних переваг порівняно з традиційними видами палива, головною з яких є те, що фінансові потоки, пов'язані з переробкою і використанням енергетичної біомаси, замикаються в межах регіону, а гроші, виплачені споживачами енергоресурсів за місцеву сировину, залишаються в регіоні і сприяють його економічному розвитку. Заміна споживання від 55 до 60 % викопних і нафтових палив в області на поновлювані палива еквівалентна залученню в бюджет області додатково від 50

до 80 млн. євро щорічно. Екологічні переваги полягають у зменшенні шкідливих викидів.

Відповідно, при використанні генераторного газу в якості моторного палива, згідно з результатами досліджень, виконаних із застосуванням того ж самого двигуна, вміст шкідливих речовин при згорянні кількості палива, еквівалентної 1 кг бензину становить в середньому: CO – 315 г; C_nH_m – 14 г; NO_x – 9 г, що в два рази менше, ніж при спалюванні бензину.

Отже, сучасне сільське господарство України потребує створення та впровадження сучасних технологій, що забезпечують підвищення екологічності та енергоефективності виробничих потужностей, зниження енергоємності і собівартості продукції.

Запитання для самоконтролю:

1. Що включає в себе термін тверда біомаса?
2. Які палива відносяться до місцевих палив рослинного походження?
3. Вкажіть особливості деревини як палива та її хімічний склад.
4. Наведіть елементарний хімічний склад деревини.
5. Дайте визначення терміну «теплота згоряння» біомаси. Чим відрізняється вища теплота згоряння біомаси від нижчої?
6. Яким чином впливає вміст золи, вологи, летючих та зв'язаного вуглецю на теплоту згоряння деревини?
7. В чому полягає методика визначення вмісту летючих в паливі?
8. Яким чином наявність кисню впливає на показник продуктивності за жаром горючої маси та на величину теплоти згоряння?
9. Наведіть порівняльну характеристику різних сортів твердих палив за відношенням нижчої і вищої його теплоти згорання.
10. З якою метою слід враховувати вміст сірки та хлору в паливі?
11. Дайте визначення «баласту палива» і яким чином він впливає на теплоту згорання палива?
12. Яким чином визначається здатність золи до плавлення?
13. Наведіть етапи плавлення золи із вказанням температурних меж?
14. Які вимоги ставляться до палива для виробництва генераторного газу?
15. Дайте характеристику соломи як сировини для виробництва генераторного газу. Наведіть її переваги та недоліки порівняно з деревиною.
16. Наведіть розгорнуту класифікацію рослинних залишків.
17. Які існують типи генераторних газів залежно від типу дуття?
18. Дайте визначення процесу газифікації. Наведіть класифікацію процесів газифікації за характером напрямку газового потоку.
19. Що теке газогенератор? Наведіть класифікацію газогенераторів.
20. Які зони, в залежності від характеру протікання процесу газифікації і змін, які відбуваються з паливом виділено в газогенераторі?
21. Дайте характеристику зони окислення.
22. Дайте характеристику зони відновлення.
23. Дайте характеристику зони сухої перегонки.
24. Наведіть основні хімічні реакції генераторного процесу.

25. Вкажіть основні етапи технологічного процесу виробництва генераторного газу.
26. Для чого потрібне очищення та охолодження генераторного газу?
27. Який вихід генераторного газу з деревини та з основних сільськогосподарських культур?
28. Опишіть конструкцію та принцип роботи газогенератора.
29. Що являє собою скруббер? Опишіть конструкцію та принцип роботи.
30. Що являє собою циклон? Опишіть конструкцію та принцип роботи.
31. Навіщо в газогенераторній установці використовується дезінтегратор та електрофільтр?
32. Опишіть технологію отримання генераторного газу в установці на базі газифікаційної колони з киплячим шаром.
33. Опишіть технологію отримання генераторного газу з використанням мобільної газогенераторної установки.
34. Опишіть конструкцію та принцип роботи камери газифікації?
35. Опишіть конструкцію візка мобільної газогенераторної установки та принцип розташування і кріплення основних вузлів установки на візку.
36. Які країни є лідерами у виробництві генераторного газу?
37. Назвіть основні напрямки використання генераторного газу.
38. Для чого потрібна підготовка сировини для газифікації?
39. Які основні недоліки використання генераторного газу в ДВЗ?
40. Що Ви знаєте про виробництво генераторного газу у світі?
41. Що Ви знаєте про виробництво генераторного газу в Україні?
42. Які Ви знаєте приклади використання генераторного газу для виробництва електроенергії?
43. Які ви знаєте приклади роботи автотранспортних засобів на генераторному газі?
44. Які є ризики при використанні генераторного газу для живлення енергоустановок?

Література:

1. Advanced Biomass Gasification. New Concepts for Efficiency Increase and Product Flexibility / [M. Müller, S. Heidenreich, P. Foscolo]. – Elsevier “Academic Press”, 2016. – 140 с.
2. Alakangas E. Properties of fuels used in Finland / E. Alakangas. – VTT : Espoo, 2000. – p. 172.
3. Basu P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory / Basu P. – San Diego : Elsevier Science Publishing Co, 2013. – 538 с.
4. Biomass standardization as a base for its sufficient use / A. Golubenko, N. Tsyvenkova, O. Mulyar, O. Romanushun // Teka. Komisji motoryzacji i energetyki rolnictwa. – Lublin. – 2011. – T. XIA. – P. 85–91.
5. CEN/TS 14918: Solid Biofuels – Methods for determination of calorific value.
6. Gas Conditioning Technologies for Biomass and Waste Gasification / N. Abatzoglou, P. Legast, P. Delvaux, D. Bangala, E. Chornet // Proceedings of the

3rd Biomass Conference of the Americas, august 24 – 29 1997 year / edited by R. P. Overend and E. Chornet. – Montréal, 1997. – Vol. 1. – P. 599 – 606.

7. Gebhard S. C. Characterization of Biomass Gasifier Tar and Ash / S. C. Gebhard, J. W. Scahill, C. E. Gregoire // Process Research Branch Milestone : Completion Report. 1993.

8. Generator Gas. The Swedish experience from 1939 – 1945 : Translated by the Solar energy Research Institute. – Golden, Colorado, 1979.

9. Higman C. Gasification / C. Higman, M. van der Burgt. – Amsterdam : Elsevier “Gult Professional Publissing”, 2008. – 456 с.

10. Kaupp A. Gasification of Rice Hulls / A. Kaupp ; Federal Republic of Germany. – Braunschweig : Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft GmbH, 1984.

11. Knoef H. Handbook. Biomass gasification / H. Knoef. – Enschede : “Biomass Technology Group”, 2012. – 2-е вид. – 500 с.

12. Liinanki L. Gasification of Agricultural Residues in a Downdraft Gasifier / L. Liinanki, P. Svenningsson, G. Thessen // Energy from Biomass / edited by W. Palz, J. Coombs, and D. O. Hall. – London : Elsevier Applied Science, 1985. – P. 832 – 836.

13. Milne T. A. Biomass Gasifier ‘Tars’: Their Nature, Formation, Destruction, and Tolerance Limits in Energy Conversion Devices / T. A. Milne, R. J. Evans, N. Abatzoglou // Proceedings of the 3rd Biomass Conference of the Americas, August 24 – 29 1997 year / edited by R. P. Overend and E. Chornet. – Canada, 1997. – Vol. 1. – P. 729 – 738.

14. Nitschke M. Standard proposals. In Standardisation of Solid Biofuels – Tools for Trading / M. Nitschke. – Tallinn, 2005.

15. Pandey S. The Biomass Gasifier: Theory, Practice and Development Guide: The book reflecting the theory of biomass gasifier, practical design and development approach / S. Pandey. – LAP LAMBERT “Academic Publishing”, 2015. – 448 с.

16. prCEN/TS 15148: Solid biofuels – Method for determination of the content of volatile matter. 18. CEN/TS 14918: Solid Biofuels – Methods for determination of calorific value.

17. Reed T. B. Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems / T. B. Reed, A. Das. – Golden : Solar Energy Research Institute, 1988. – 140 p.

18. Rensfelt E. Practical Achievements in Biomass Gasification / E. Rensfelt // Bioenergy 84 / edited by H. Egnéus and A. Ellegård. – London : Elsevier Applied Science, 1985. – Vol. 1. – P. 174.

19. Updraft Gasification of Waste Fuels / P. Ståhlberg, E. Kurkela, H. Filèn, K. Salo // Pyrolysis and Gasification. – London : Elsevier Applied Science, 1989. – P. 603 – 607.

20. Альтернативна енергетика : навч. посібник / [М. Д. Мельничук, В. О. Дубровін, В. Г. Мироненко та ін.]. – К. : Аграр Медіа Груп, 2011. – 612 с.

21. Біологічні ресурси і технології виробництва біопалива. Монографія / [Я. Блюм, Г. Гелетука, І. Григорюк, В. Дубровін, В. Мироненко та ін.]. – К. : «Аграр Медіа Груп», 2010. – 408 с.

22. Біопалива (технології, машини і обладнання) / [В. О. Дубровін, М. О. Корчемний, І. П. Масло, О. Шептицький, А. Рожковський, З. Пасторек, А. Гжибек, П. Євич, Т. Амон, В.В. Криворучко]. – К. : ЦТІ “Енергетика і електрифікація”, 2004. – 256 с.
23. Гинзбург Д. Б. Теория и расчет транспортных газогенераторов / Д. Б. Гинзбург. – М., 1943. – 178 с.
24. Гинзбург Д. Б. Газификация низкосортного топлива / Д. Б. Гинзбург. – М. : Промстройиздат, 1950. – 172 с.
25. Голуб Г. А. Енергетична автономність агросистем / Г. А. Голуб // Вісн. аграр. науки. – 2010. – № 3. – С. 50–54.
26. Голуб Г. А. Теплота згоряння та умови спалювання соломи / Г. А. Голуб, В. О. Лук’янець, С. В. Субота // Нац. науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства» УААН. – 2010. – № 8. – С. 49–52.
27. Голуб Г. А. Інженерні проблеми виробництва і використання біопалив в АПК / Г. А. Голуб, В. О. Дубровін // Вісник аграрної науки. – 2010. – Спец. вип. № 10. – С. 82–87.
28. Калетник Г. М. Розвиток ринку біопалив в Україні : монографія / Г. М. Калетник. – К. : Аграр. наука, 2008. – 464 с.
29. Канторович Б. В. Введение в теорию горения и газификации твердого топлива / Б. В. Канторович. – М. : Металлургиздат, 1961. – 56 с.
30. Коллеров Л. К. Газификация твердых топлив. Теория подобия и ее применение при исследовании газогенераторной установки / Л. К. Коллеров ; под ред. В. В. Никифорова. – М. ; Л. : Машгиз, 1952. – 72 с.
31. Лось Л. В. Проблема енергоносіїв та її вирішення в сільському господарстві України біоенергетичними газогенераторами / Л. В. Лось, Н. М. Цивенкова // Вісник ДАУ. – 2004. – № 2 (13). – С. 3–21.
32. Лось Л. В. Дослідження особливостей конструкції транспортних газогенераторів для газифікації подрібненої та брикетованої соломи / Л. В. Лось, В. В. Іванцов // Вісн. ЖНАЕУ. – 2010. – № 2. – С. 127–139.
33. Лямин В. А. Газификация древесины / В. А. Лямин. – М. : Лесная промышленность, 1967. – 260 с.
34. Мезин И. С. Транспортные газогенераторы / И. С. Мезин. – М. : Огиз Сельхозгиз, 1948. – 311 с.
35. Мироненко В. Методика раціонального вибору обладнання для виробництва біопалив / В. Мироненко, В. Поліщук, Г. Захарків // Наук. вісник Нац. університету біоресурсів і природокористування України. – Київ. – 2011. – № 166. – Ч. 2. – С. 148 – 152.
36. Мироненко В. Г. Тверде біопаливо в теплозабезпеченні села / В. Г. Мироненко, В. О. Глотова, А. В. Філатова // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Вип. 158. Серія "Біологія, біотехнологія, екологія" : збірник наукових праць / Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. – К. : НУБіПУ, 2011. – С. 90–97.

37. Наша энергия. Альтернативные источники энергии [Электронный ресурс] Газогенератор для электростанций. – Режим доступа : <http://gazogenerator.com.ua/products/gazogenerator-dlya-e-lekthroctantsij/>.

38. Особливості виробництва біопалива та отримання енергії в умовах агропромислового виробництва / Г. А. Голуб, С. М. Кухарець, В. О. Шубенко, Н. М. Бовсунівська // Техніка і технології АПК. – 2015. – № 2 (65). – С. 31–34.

39. Пат. № 80582 Україна, МПК (2013.01) u 2012 12030, C10J 3/00. Газогенератор / Цивенкова Н. М., Голубенко А. А.; заявник і патентовласник Н. М. Цивенкова, А. А. Голубенко. – заявл. 19.10.2012; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 11.

40. Перспективи розвитку альтернативної енергетики на Поліссі України. Монографія / [В. О. Дубровін, Л. Д. Романчук, С. М. Кухарець [та ін.]; відп. ред. О. В. Скидан. – К. : Центр учбової літератури, 2014. – 335 с.

41. Производство энергии из соломы. [Электронный ресурс] Положение, технологи и инновации в Дании. – Режим доступа : <http://uabio.org/img/files/news/pdf/straw-to-energy-demmark.pdf>

42. Самилін О. О. Сучасні енергоефективні технології використання відходів біомаси в сільському, лісовому та комунальному господарствах / О. О. Самилін, Н. М. Цивенкова, А. А. Голубенко // Вісн. Житомир. нац. агрокол. ун-ту. – 2009. – № 1(24). – С. 269–278.

43. Справочник потребителя биотоплива / Виллу Варес, Юло Каськ, Пеэтер Муйсте [и др.]. – Таллинн : Таллинский технический университет, 2005. – 183 с.

44. Цивенкова Н. М. Перспективи конструктивного розвитку автомобільних газогенераторних установок в історичному аспекті їх створення / Н. М. Цивенкова, О. О. Самилін // Вісн. Держ. агрокол. ун-ту. – 2005. – № 2(15). – С. 307–326.

8. ВИКОРИСТАННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

8.1. Енергетичний потенціал низькотемпературних джерел енергії

Вперше на можливість використання низькотемпературних джерел енергії з метою отримання енергії вищого потенціалу вказав видатний британський фізик та інженер Вільям Томсон ще у 1852 році. У якості перетворювача енергії він запропонував концепцію теплового насоса. Розвинув концепцію австрійський інженер Петер фон Рітінгер, який в 1855 році спроектував та виготовив перший відомий прототип теплового насосу – пристрій для перенесення теплової енергії від низькопотенціального джерела тепла до соживача тепла з високою температурою.

Практичного застосування тепловий насос набув значно пізніше, а точніше у 40-х роках ХХ століття, коли винахідник-ентузіаст Роберт Вебер (Robert C. Webber) експериментував з морозильною камерою. Якось Вебер випадково доторкнувся до гарячого конденсатора і зрозумів, що тепло просто викидається назовні. Він замислився над тим, як використати це тепло і вирішив підігрівати воду у бойлері. У результаті, родина була забезпечена необхідним об'ємом гарячої води для домашніх потреб. При цьому частина тепла потрапляла у повітря. Це наштовхнуло його на думку використовувати тепло для обігріву будинку. Вебер удосконалив свій винахід і почав проганяти гарячу воду через теплообмінник, який обладнав вентилятором. У такий спосіб тепло поширювалось по будинку.

Згодом саме Роберт Вебер запропонував використовувати тепло землі, яке характеризується постійною температурою впродовж року.

Для роботи теплових насосів необхідно два джерела тепла: **нижнє** – з якого відбирається теплова енергія; **верхнє** – від якого енергія передається до споживача.

Досить суттєвим, з точки зору правильного вибору необхідного теплового насоса є тип, якісні характеристики та кількісні параметри нижнього джерела тепла. До найважливіших характеристик та параметрів нижнього джерела тепла можна віднести: доступність, корозійні характеристики, динаміка температури, обсяг та динаміка енергетичного потенціалу, інвестиційні та експлуатаційні видатки.

Джерела низькотемпературної теплоти (нижнє джерело) поділяють на природні та техногенні.

До природніх джерел належить:

- вода (поверхнева, ґрунтова, геотермальна);
- повітря;
- ґрунтове середовище;
- сонячна радіація.

Дотехногенних джерел належить:

- повітря систем вентиляції та систем охолоджень;

- стічні води та води станцій аерації;
- води систем технічного водопостачання підприємств;
- теплота повітря та води, що відводиться в технологічних процесах (вторинна теплота).

Температурний та енергетичний рівень низькотемпературних джерел наведено в табл. 8.1.

Таблиця 8.1. Температурний та енергетичний рівень низькопотенціальних джерел енергії

Джерело теплоти	Температурний рівень джерела, °С	Енергетичний рівень джерела, МВт
Природні джерела теплоти		
Вода:		
поверхнева	4–18	0,9–51,6
грунтова	6–15	1–2
геотермальна	35–70	0,29–3
Повітря	від мінус 5 до плюс 20	0,3–18,4
Грунтове середовище	4–12	0,1–5,9
Сонячна радіація	0–75	0,1–150
Техногенні джерела теплоти		
Вода:		
стічна	10–17	0,3–90
технічна	15–30	2,4–10,6
технологічна	40–70	39,5–54,9
Повітря	0–50	0,3–22,1

Атмосферне повітря, як джерело, найчастіше використовується для живлення малих теплових насосів. Це пояснюється його доступністю. Серед недоліків вказаного джерела є той факт, що тоді, коли необхідність у теплі велика, температура повітря дуже низька (особливо взимку) та значні температурні коливання впродовж року.

Енергія, що міститься у поверхневих водах (річках, озерах, водосховищах, морі), виділяється при тепловому обміні між водою та атмосферним повітрям, а також ґрунтом. Недоліками поверхневих вод, як нижнього джерела, є проблеми із одержанням енергії у холодний сезон при малій течії, а також обмерзання теплообмінників при температурі близько 0 °С. Тому найсприятливішими періодами для використання цього джерела є рання осінь та весна.

Підземні води, що знаходяться у глибинних колодязях, характеризуються незначними коливаннями температури упродовж року, яка становить від 3 до 12 °С. Ці води можуть направлятися безпосередньо у випарник або, у випадку, якщо вони сильно засолені, через проміжний теплообмінник. Особливим питанням є використання геотермальних вод, які іноді можуть використовуватися в якості нижнього джерела теплових насосів.

Ґрунт може бути нижнім джерелом лише у невеликих теплових насосах, оскільки дає невеликий потік тепла. Установка теплообмінників вимагає серйозних земляних робіт. У зв'язку з цим можна використовувати лише ті території, які вільні від забудов та багаторічних насаджень.

Використання залишкової теплоти технічних процесів (як результат технологічних виробництв у промисловості, енергетиці, комунальному господарстві, тощо) вимагає індивідуального вирішення всіх аспектів (вид речовини, агресивність, придатність до теплообміну, тощо). При цьому враховують потужність джерела та його температурний діапазон (у добовому, тижневому та річному масштабі). Температури техногенних джерел зазвичай вищі температур природних джерел (за виключенням геотермальних вод).

Найбільший температурний та енергетичний рівень джерел теплоти має сонячна радіація, а найменший – ґрунтова вода. Температурний та енергетичний рівень води і повітря техногенних джерел теплоти є вищим, ніж природних джерел, що пов'язано з недосконалістю технологічних процесів та технічних систем, і, як наслідок, втратами теплової енергії в навколишнє середовище, але масштаби використання природних низькопотенціальних джерел енергії є значно більшими. За результатами аналізу видів низькопотенціальних джерел енергії та їх характеристик виявляють доцільність використання теплових насосів. У промисловості основними є техногенні джерела низькотемпературної теплоти. Це, в першу чергу, промислові стічні та комунально-побутові води (рис. 8.1).

В Україні загальний річний об'єм комунально-побутових стоків становить близько 3740 млн. м³. Температура стоків становить від 12 до 20°C залежно від сезону. Каналізаційні системи централізованого відведення комунально-побутових стоків функціонують в 427 містах, 515 селищах міського типу, 856 селах. Питомий обсяг комунально-побутових стоків становить від 0,15 до 0,4 м³ на одного жителя за добу. Цей показник значною мірою залежить від доступності води та соціально-економічних умов в окремих регіонах.

Теоретичні ресурси низькотемпературної теплової енергії стічних вод можна розрахувати, виходячи з загального обсягу каналізаційних стоків відповідної області, а ресурси для технічного використання можуть розраховуватись, виходячи із загального обсягу очищених каналізаційних стоків. Технічний енергетичний потенціал низькотемпературної теплової енергії стічних вод в Україні становить 33939 тис. МВт год./рік. Найбільші його значення припадають на Київську, Дніпропетровську та Донецьку області і знаходяться в межах від 4089 до 5086 тис. МВт год/рік, а найменші – на Чернівецьку, Тернопільську, Закарпатську та Волинську області – від 264 до 383 тис. МВт год/рік.

У побуті основними є природні джерела низькотемпературної теплоти. Це вода (поверхнева та ґрунтова), повітря, ґрунтове середовище, сонячна радіація. Теплові насоси в побуті використовують для опалювання будинків, підігрівання води для побутових потреб та для кондиціонування. На сьогодні в Україні експлуатується 9,3 млн. присадибних будинків з загальною площею

515,8 млн. м². Для їх теплопостачання можна влаштувати ґрунтові теплообмінники з теоретичним запасом теплової енергії 525855 тис. МВт год на рік. Ці теоретичні ресурси теплової енергії ґрунту та ґрунтових вод визначаються на основі статистичних даних, вони значно перевищують потреби енергії для опалення присадибних житлових будинків.

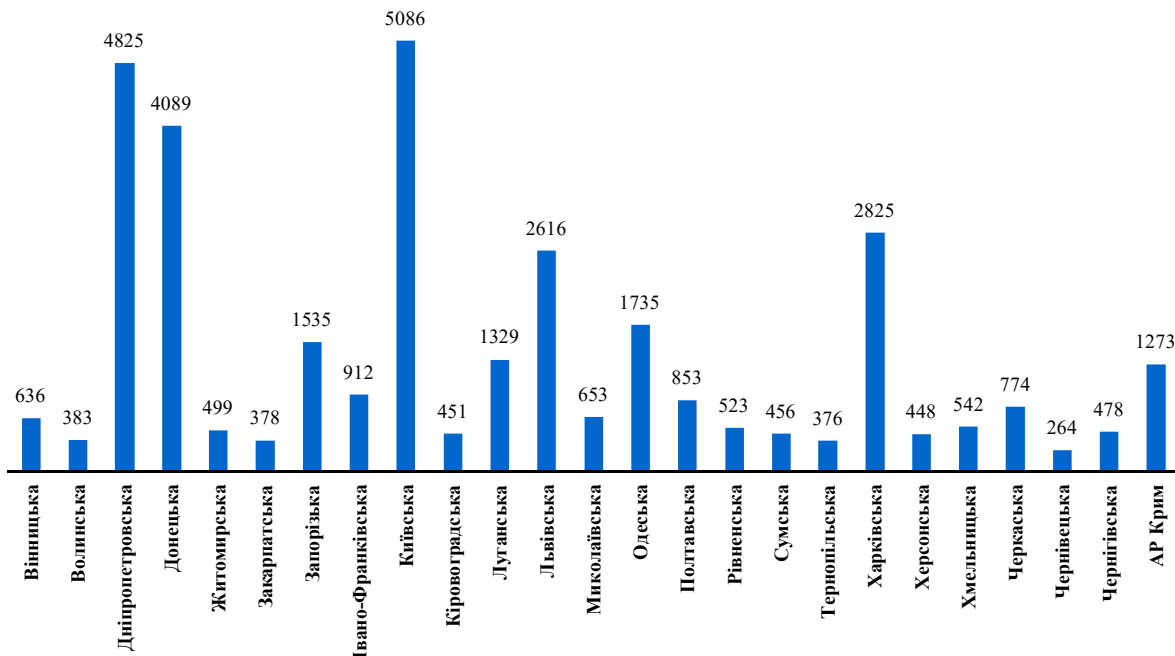


Рис. 8.1. Енергетичний потенціал низькотемпературної теплової енергії стічних вод в розрізі областей України (тис. МВт год./рік)

Теплова енергія ґрунту (рис. 8.2) та ґрунтових вод може використовуватися для обігріву та вентиляції приміщень. Відбір теплової енергії від ґрунту може здійснюватися за допомогою ґрунтових теплообмінників різних типів. Температура теплоносія в ґрунтовому теплообміннику становить від мінус 5–7 до плюс 10–12 °С, що цілком достатньо для виробництва теплоносія з температурою від 40 до 70 °С за допомогою теплових насосів.

Досвід провідних країн свідчить, що енергію ґрунту найчастіше використовують в теплонасосних установках потужністю до від 70 до 100 кВт, які обслуговують окремі невеликі будинки, головним чином приватні житлові будинки. В умовах України це можуть бути приватні будинки міст та сіл.

Технічний енергетичний потенціал низькотемпературної теплової енергії теплоти ґрунту та ґрунтових вод в Україні становить 112521 тис. МВт год/рік. Найбільші його значення припадають на Дніпропетровську, Донецьку, Київську, Львівську та Харківську області і знаходяться в межах від 8529 до 11027 тис. МВт год/рік, а найменші – на Чернівецьку та Херсонську області від 1535 до 1855 тис. МВт год/рік).

Сільське господарство є однією з галузей, в якій тепловий насос може знайти широке застосування, причому у багатьох випадках існують особливо сприятливі умови для застосування цих пристроїв.

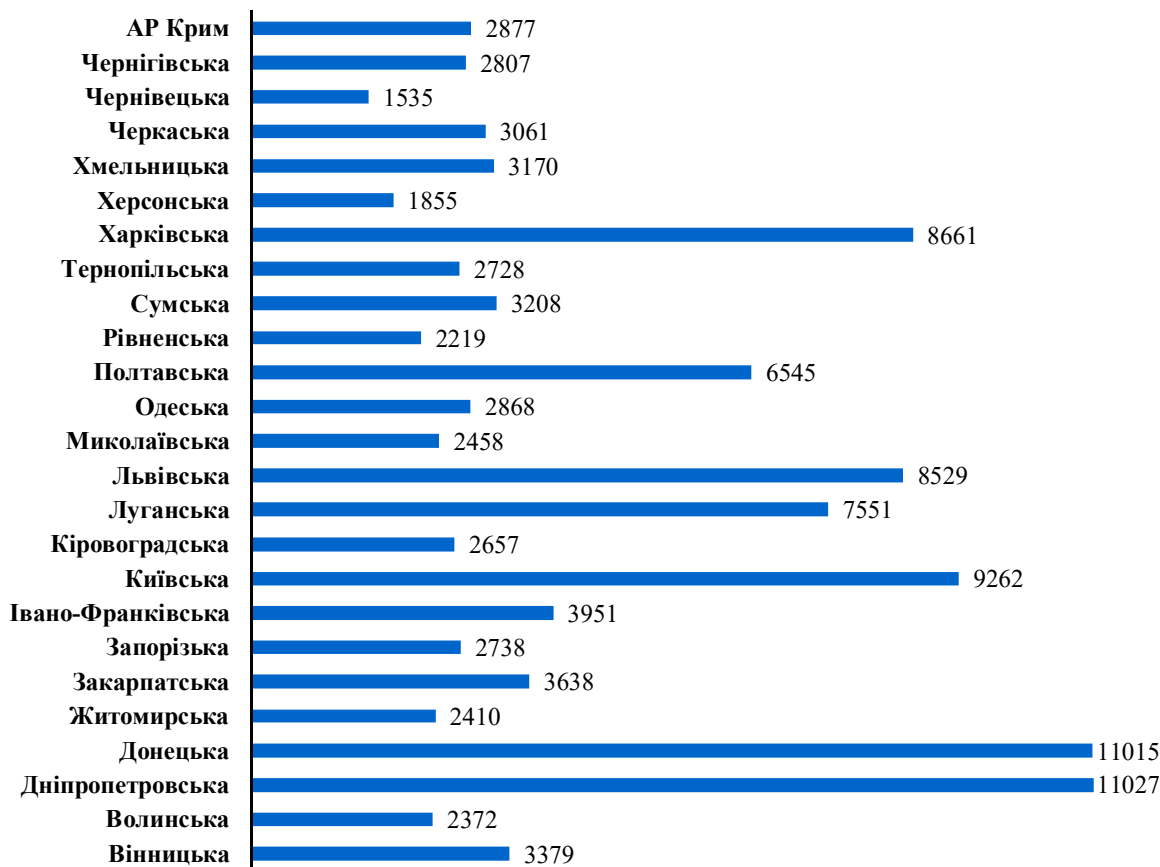


Рис. 8.2. Енергетичний потенціал низькотемпературної теплоти ґрунту та ґрунтових вод в областях України (тис. МВт год/рік)

У сільськогосподарському виробництві в рівному співвідношенні можна використовувати природні та техногенні джерела низькотемпературної теплоти, оскільки в Україні сільське господарство в своєму розпорядженні має великі земельні та водні ресурси, а також власні вторинні теплові ресурси. Джерелом вторинних теплових ресурсів, а саме техногенних низькотемпературних джерел енергії, придатних для використання в теплових насосах, є:

- підігріте вологе повітря, яке залишає сушарку;
- сільськогосподарські продукти, що охолоджуються (молоко, фрукти);
- кондиційоване повітря, яке відводиться з виробничих та побутових приміщень;
- теплота зі стійлових приміщень, що видаляється разом з вентиляваним повітрям.
- тваринні відходи (гній);
- вентиляване повітря, яке відводиться з теплиць.

В разі застосування теплового насоса, одержане тепло можна використовувати для:

- підігріву води для господарських потреб;
- підігріву та зневоложення повітря у сушарках;
- нагріву вентиляційного повітря, що підводиться ззовні до приміщення;
- обігріву теплиць, тепличних тунелів, житлових та виробничих приміщень.

В агропромисловому комплексі України теплові насоси застосовують в галузі тваринництва, а саме в таких його технологічних напрямках: у лініях первинної обробки молока одразу після доїння, для його охолодження та пастеризації; для теплопостачання стійлових приміщень; при утилізації продуктів життєдіяльності тварин. В галузі рослинництва теплові насоси застосовують в технологічних процесах переробки та зберігання продукції рослинного походження.

На молочних фермах частка витрат енергоресурсів становить більше 50 % (прямі витрати електроенергії на привод компресорів холодильних машин, підігрівання води для санітарно-технологічних потреб і т.д.). При цьому низькопотенціальним джерелом теплової енергії є свіже молоко. Так, при охолодженні 1 л молока з 36 °С до 4–6 °С відводиться від 85 до 100 кДж теплоти. Цього тепла достатньо для нагріву 1 л води до температури від 25 до 35 °С. Вода з такими температурними параметрами придатна до використання в технологічних процесах сучасних доїльних установок.

Використання теплових насосів в тваринництві дозволить отримувати енергію з продуктів життєдіяльності тварин, а саме гною, в процесі його утилізації. Реалізація такого способу полягає у тому, що під підлогою безпідстилкового свинарника розміщується насичений повітрям резервуар з гноєм. Насичення повітрям викликає кисневе бродіння, разом з яким відбувається виділення тепла (наприклад, температура під підлогою хліву свійських тварин взимку не опускається нижче 25-27 °С). Цього достатньо для підвищення температури соляного розчину від 20 до 55 °С, що вистачає для системи обігріву.

Таким чином, застосування теплових насосів в сільськогосподарському виробництві забезпечить одночасне охолодження тваринницької сировини та продукції, нагрів води для санітарно-технологічних потреб, кондиціонування повітря в стійлових приміщеннях та теплозабезпечення виробничих, побутових та житлових приміщень.

Широке застосування в агропромисловому виробництві теплових насосів має значну перспективу оскільки, за рахунок використання низькопотенціальних теплових ресурсів, можна компенсувати дефіцит енергії та сприяти охороні навколишнього природного середовища. У масштабах України використання різних видів низькотемпературних джерел енергії та теплових насосів, як накопичувачів цієї енергії, повинно відбуватись з урахуванням географічного положення об'єктів господарювання, природних ресурсів та напрямку господарської діяльності (табл. 8.2). Впровадження в Україні теплових насосних станцій дасть можливість отримати додатково

теплову енергію в середньому із загальною потужністю 909,48 МВт та економити щорічно до 614,650 млн. м³ природного газу.

Таблиця 8.2. Потенційні об'єми щорічного отримання теплової потужності та економії природного газу при застосуванні теплових насосів

Регіон, область	Джерело теплоти	Потужність, МВт			Економія палива, тис. м ³ /рік		
		за джерелами	загальна	%	за джерелами	загальна	%
АР Крим	морська вода	102,4	113	90,6	61700	68806	11,19
	водосховище	2		1,7	1300		
	термальні води	3		2,6	2100		
	повітря	5,6		5,1	3706		
Київська, м. Київ	повітря	0,022	109,122	0,1	154	94174	15,32
	каналізаційні стічні води	108,7		99,6	93720		
	ґрунт	0,4		0,3	300		
Вінницька	річка	71	71	100	49500	49500	8,05
Дніпропетровська	повітря	24,6	187,84	13,1	14600	119000	19,36
	річка	99,44		52,9	73230		
	промисловість	39,5		21,5	18300		
	каналізаційні стічні води	12		6,3	8400		
	ґрунт	12,3		6,5	4470		
Донецька	морська вода	5,8	22,3	26,0	3600	14200	2,31
	річка	2,5		11,2	1600		
	технічні води	14		62,8	9000		
Житомирська	річка	45,0	45,83	98,2	31500	33300	5,42
	каналізаційні стічні води	0,5		1,1	1100		
	ґрунт	0,33		0,7	700		
Закарпатська	термальні води	1,01	2,23	45,3	428	1282	0,21
	повітря	0,22		9,8	154		
	каналізаційні стічні води	1		44,9	700		
Запорізька	морська вода	41,6	59,1	70,3	28950	35440	5,77
	повітря	2,4		4,2	2390		
	річка	15,1		25,5	4100		
Івано-Франківська	повітря	0,3	0,4	75	24	94	0,02
	ґрунт	0,1		25	70		

продовження таблиці 8.2

Регіон, область	Джерело теплоти	Потужність, МВт			Економія палива, тис. м ³ /рік		
		за джерелами	загальна	%	за джерелами	загальна	%
Кіровоградська	річка	1		5,6	340	12240	1,99
	каналізаційні стічні води	17	18	94,4	11900		
Луганська	річка	34,06	149,26	22,8	25960	96500	15,70
	промисловість	59,4		39,7	33000		
	каналізаційні стічні води	25,3		17,1	17400		
	технічні води	30,5		20,4	20140		
Миколаївська	річка	20	20	100	15000	15000	2,44
Одеська	морська вода	3	14	21,4	2100	7702,1	1,25
	водосховище	3		21,4	2,1		
	річка	1		7,2	700		
	грунт	7		50,0	4900		
Полтавська	річка	0,76	0,76	100	460	460	0,08
Рівненська	річка	2,5	20,8	12,0	1402	16012	2,61
	каналізаційні стічні води	18		86,5	14400		
	грунт	0,3		1,5	210		
Харківська	каналізаційні стічні води	3,5	4	87,5	1700	1860	0,30
	грунт	0,5		12,5	160		
Херсонська	річка	30,52	50,92	59,9	20070	35670	5,80
	каналізаційні стічні води	20,4		40,1	15600		
Хмельницька	грунт	2	2	100	1400	1400	0,23
Черкаська	річка	6	6	100	4000	4000	0,65
Чернівецька	річка	0,5	0,5	100	2	2	0,00032
Чернігівська	повітря	0,418	12,418	3,4	8	8008	1,30
	річка	12		96,6	8000		
Разом по Україні		909,48				614650,1	100

В Україні планується досить широко використовувати природні низькопотенціальні джерела енергії, зокрема воду – морську, річкову, частка отримання теплової потужності від якої коливається в межах від 22 до 98 % в розрізі регіонів. Так, відсоток отримання теплової потужності від використання

води в якості низькотемпературного джерела енергії в Житомирській області становить 98,2 %, в Чернігівській області – 96,6 %, в Автономній республіці Крим – 90,6 %, в Запорізькій області – 70,3 %, в Вінницькій, Миколаївській, Полтавській, Черкаській, Чернівецькій областях – 100 %.

Друге місце посідає теплова енергія, яка може бути отримана від техногенних джерел теплоти, а саме каналізаційних та технічних вод. Її частка в розрізі областей України коливається в межах від 17,3 до 99,6 %. Зокрема в Київській області вона становить 99,6 %, в Кіровоградській – 94,4 %, в Рівненській – 86,5 %, в Харківській – 87,5 %.

Слід відзначити, що найбільші щорічні обсяги економії природного газу від використання теплонасосних систем в структурі областей України припадають на Дніпропетровську область – 19,36 %, Київську та Луганську області – приблизно по 15 %, Автономну республіку Крим – 11,19 %, Вінницьку область – 8,05 %, Житомирську, Херсонську, Запорізьку області – по 5 %.

На даний час в нашій державі працюють лише подиничні установки, а створення і впровадження теплових насосів базується переважно на ентузіазмі виконавців, оскільки впровадження даних систем є фінансово досить затратним. При цьому слід відмітити, що впровадження теплових насосів в інших країнах світу проходить при державній підтримці шляхом надання субсидій покупцям теплових насосів, податкових та кредитних пільг, субсидій виробникам теплонасосного устаткування, двоступеневого тарифу на закупівлю електроенергії.

Консорціум EurObserv'ER, що займається моніторингом та аналізом розвитку відновлювальної енергетики в країнах ЄС опублікував звіт, відповідно до якого у 2014 році було продано 797 тис. теплових насосів (рис. 8.3). Кожна країна має свої особливості ринку. У той час як продажі теплових насосів у Франції пережили справжній бум, ринок Німеччини дещо знизився. Скандинавський ринок стабільний вже протягом тривалого часу. Так наприклад, в Швеції було реалізовано близько 95000 теплових насосів, як і в попередні два роки. Слід відмітити, що в Швеції проживає тільки 9,5 млн. жителів. Менше 60 тис. насосів було продано в Німеччині, з її більш ніж 80 мільйонами жителів. При цьому, ринок Німеччини визначається одним з найперспективніших, особливо враховуючи нові зміни до Положення про енергозбереження (EnEV). Так, при встановленні теплового насоса у новому будинку надається субсидія з розрахунку 10 € на 1 м² житлової площі (але не більше 2000 €), що складає 10 % інвестиційних витрат. У разі реконструкції будинку – субсидія 30 € на 1 м² житлової площі (але не більше 3000 €), що складає до 15 % інвестиційних витрат.

У Швеції передбачена субсидія у розмірі 30 % вартості встановлення теплового насоса (постачання і монтаж), але не більше 3300 € за умови, що опалювальна система з ґрунтовим джерелом споживатиме не більше 35 % електроенергії, що її споживала попередня система.

У Австрії звертають увагу на необхідність використання високоефективних теплових насосів. Ефективність теплових насосів оцінюють

за коефіцієнтом перетворення (коефіцієнт трансформації тепла, продуктивності, перетворення температур) тепла E_t , який показує відношення одержаного корисного тепла на обігрів приміщення до витраченої повної енергії для приводу в дію вузлів та механізмів теплового насоса. Так, для новобудов передбачена субсидія в розмірі 2200 €, якщо сезонний коефіцієнт перетворення теплового насоса становить більше 4,5 (4,3 з підігріванням води) і субсидія 1500 € – сезонний коефіцієнт перетворення більше 3,8 (3,6 з підігріванням води). У будівлях після реконструкції субсидія збільшується на 220 €, але у випадку заміни котлів вік яких становить не менше 15 років.

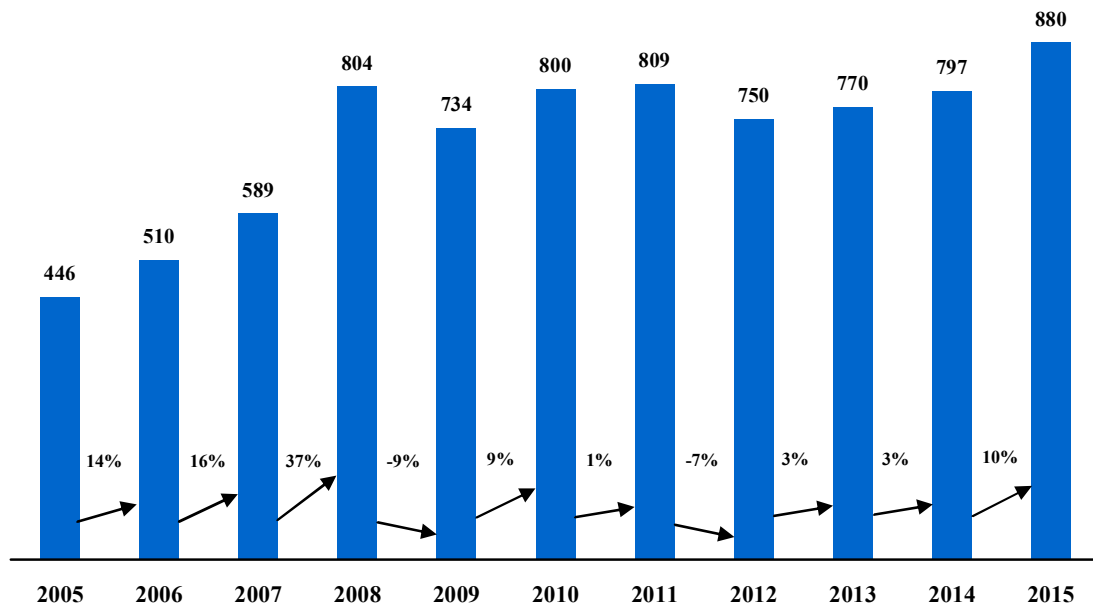


Рис. 8.3. Динаміка продажів теплових насосів у країнах ЄС (тис. шт.)

У Франції практикують податкові пільги на рівні 25–50 % від вартості теплонасосного обладнання.

За останніми даними Європейської асоціації теплових насосів (ЕНРА), ринок теплових насосів у країнах ЄС в 2015 році виріс на 880179 одиниць. Це сприяє зниженню на 24 млн. тон викидів CO_2 та збільшенню зайнятості населення у даній сфері. Географічно, значну частку зростання можна віднести до збільшення продажів в країнах Середземномор'я – Іспанії (+15 %), Італії (+20 %) і Франції (+8 %). Ці цифри могли бути ще більшими, – зі слів експерта в області статистики Heating & Cooling Strategy, якщо б відповідні державні структури переглянули Директиви щодо відновлюваних джерел енергії.

Український ринок теплових насосів має аналогічні тенденції. Але станом на сьогодні, об'єми використання теплових насосів в Україні мінімальні. Впроваджено лише одну промислову теплонасосну установку (ТНУ) тепловою потужністю 1,5 мВт (м. Краматорськ), близько 40 ТНУ тепловою потужністю від 200 до 300 кВт та близько 900 ТНУ потужністю до 50 кВт.

Ріст вартості та нестабільність на ринку викопного палива мають стимулювати темпи впровадження теплових насосів. Звичайно, ключовими факторами для розвитку українського ринку матимуть покращення економічної

ситуації та державна програма стимулювання відновлювальної енергетики. Теплові насоси, використовуючи низькопотенційну відновлювальну енергію довкілля, споживають у 3–4 рази менше енергії, порівняно із традиційним тепlopостачанням, а економічно досяжний потенціал для України становить близько 31,3 млрд. кВт год/рік, що еквівалентно заміщенню 4,2 млрд. м³ природного газу.

8.2. Класифікація теплових насосів та принцип їх роботи

Тепловий насос (ТН) – це універсальний прилад, що забезпечує виконання трьох операцій – опалення, гаряче водopостачання та кондиціонування.

Основна відмінність теплового насосу від всіх інших джерел тепла полягає у можливості використовувати безкоштовну поновлювану низькотемпературну енергію навколишнього середовища. Близько 75–80 % від потужності, яку видає тепловий насос, фактично «викачується» з навколишнього середовища, використовуючи розсіяну енергію ґрунту, води та повітря. І тільки 20–25 % (рис. 8.4) енергії необхідно затратити для роботи самого теплового насоса.

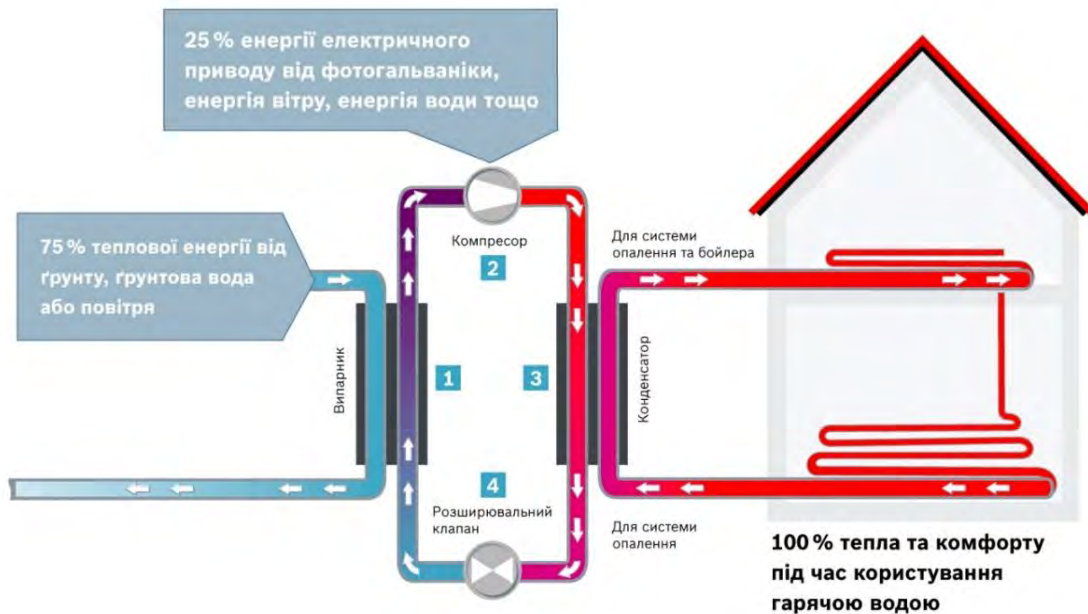


Рис. 8.4. Принципова схема роботи теплового насоса

Принцип дії теплового насоса закладається в тому, що незамерзаюча рідина (суміш гліколю або припіленгліколю та води), що отримала тепло із замкнутого земляного колектора, свердловини або ґрунтових вод, спрямовується до теплового насоса, де тепло віддається внутрішньому контуру (через випарник) теплового насоса. Тепло від внутрішнього контуру ТН, з циркулюючим в ньому холодоагентом, передається в зворотній контур (через

конденсатор) системи опалення будинку та для отримання гарячої води. Потім охолоджена рідина повертається назад до низькотемпературного джерела, де знову забирає від нього тепло.

Внутрішній обмінник тепла – призначений для передачі тепла у внутрішній простір будівлі або до установки теплої води для побутових чи промислових цілей, що знаходиться в будинку, або ж бере участь у прийомі тепла з будівлі. Внутрішній контур теплового насоса складається з таких компонентів: випарник; компресор; конденсатор; розширювальний (дросельний) клапан; система трубопроводів та управляюча автоматика.

Зовнішній обмінник тепла – призначений для створення можливості приймання теплоти із середовища, що знаходиться поза будівлею або з іншого доступного джерела тепла, або ж для передачі тепла у це середовище.

Тепловий насос (англ. *heat pump*) – прилад, який переносить розсіяну теплову енергію землі, води або повітря у відносно високопотенційне тепло для системи опалення будівлі.

Попросту кажучи, тепловий насос за допомогою теплообмінників збирає теплову енергію із землі (води, повітря) і «переносить» її в приміщення. Теплові насоси здатні не тільки опалювати приміщення, але й забезпечувати гаряче водопостачання, а також здійснювати кондиціювання повітря (при наявності реверсивного клапана, що дозволяє працювати тепловому насосу у зворотному режимі).

В залежності від принципу роботи, **теплові насоси поділяють на:** компресорні, абсорбційні, хімічні та термоелектричні.

Компресійні теплові насоси завжди діють за допомогою механічної енергії, яка використовується для транспортування тепла на більш високий енергетичний рівень.

Абсорбційний тепловий насос для транспортування тепла на більш високий енергетичний рівень використовує теплову форму енергії (за допомогою електропідігріву чи будь-якого палива).

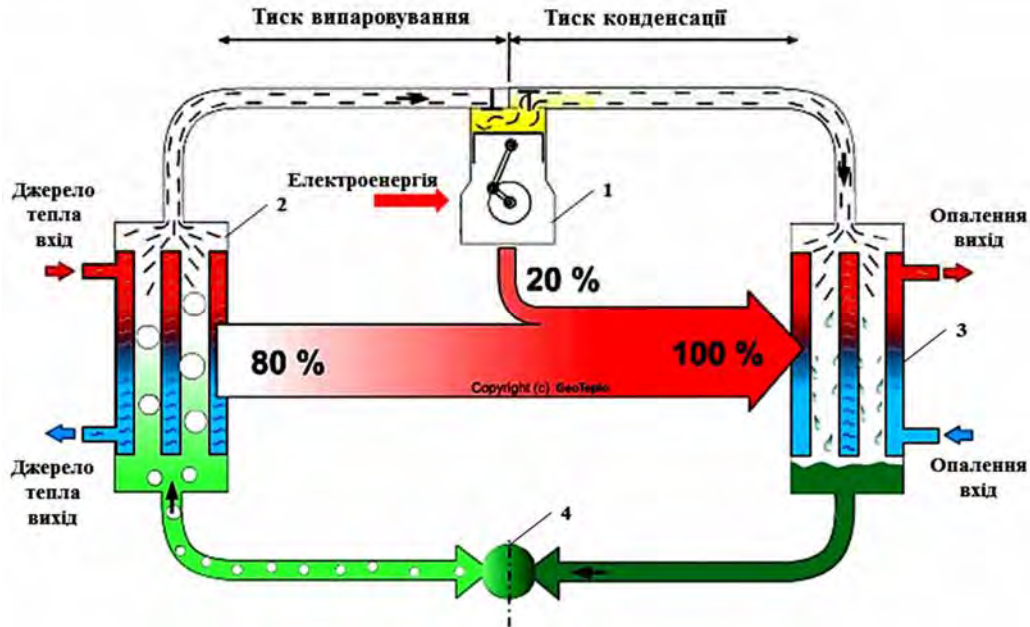
Хімічний тепловий насос для транспортування тепла на більш високий енергетичний рівень використовує хімічну форму енергії.

Термоелектричний тепловий насос для транспортування тепла на більш високий енергетичний рівень використовує електричну форму енергії.

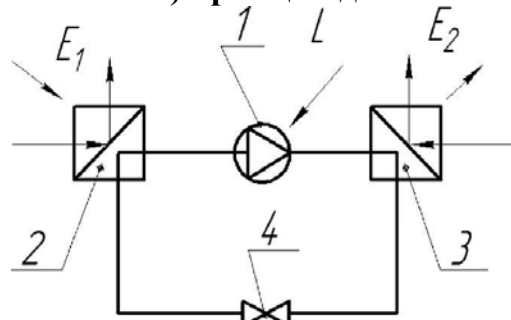
Сьогодні найбільшого застосування набули компресорні теплові насоси та, у дещо меншій мірі, абсорбційні.

Принцип роботи **компресорного теплового насоса** (рис. 8.5) полягає в тому, що холодоагент (робоча речовина) під високим тиском проходить через дросель 4 до випарника 2, де, в наслідок різкого зменшення тиску (відповідно до ефекту Джоуля-Томсона), відбувається процес його кипіння (набуває газоподібного стану) при досить низькій температурі. У випарнику 2 холодоагент відбирає тепло від ґрунтового або водяного контуру низькотемпературного джерела, підвищуючи свою температуру. Із випарника 2 холодоагент у газоподібному стані надходить до компресора 1, де стискається до високого тиску. У наслідок цього холодоагент, відповідно до закону Клайперона-Менделєєва, підвищує свою температуру до 85 °С і вище. Із

високою температурою холодоагент надходить до конденсатора 3, де в процесі передачі тепла опалювальному контуру, охолоджуючись, переходить у рідкий стан. При цьому температура холодоагента дещо знижується, а опалювального контуру підвищується. Пройшовши через дросель 4 процес повторюється. Коли температура в будинку досягає необхідного рівня, терморегулятор вимикає тепловий насос. Як тільки температура в опалювальному контурі падає, терморегулятор знову запускає тепловий насос.



а) принцип дії



б) схема роботи

1 – компресор; 2 – випарник; 3 – конденсатор; 4 – дросельний вентиль

Рис. 8.5. Компресорний тепловий насос

Таким чином, принцип роботи теплового насоса заснований на оберненому циклі Карно.

В якості робочої речовини (холодоагенту), що знаходиться у компресорних теплових насосах, найчастіше використовують фреон – речовина з низькою температурою випаровування. Оскільки фреон згубно діє на озоновий шар атмосфери нашої планети, зараз його замінюють такими речовинами, як аміак, RC-318 та метиламіни.

Ефективність теплових насосів характеризує коефіцієнт продуктивності (або коефіцієнт перетворення теплового насоса) E_t , який визначається, як відношення отримуваної теплової потужності до витраченої механічної роботи компресора:

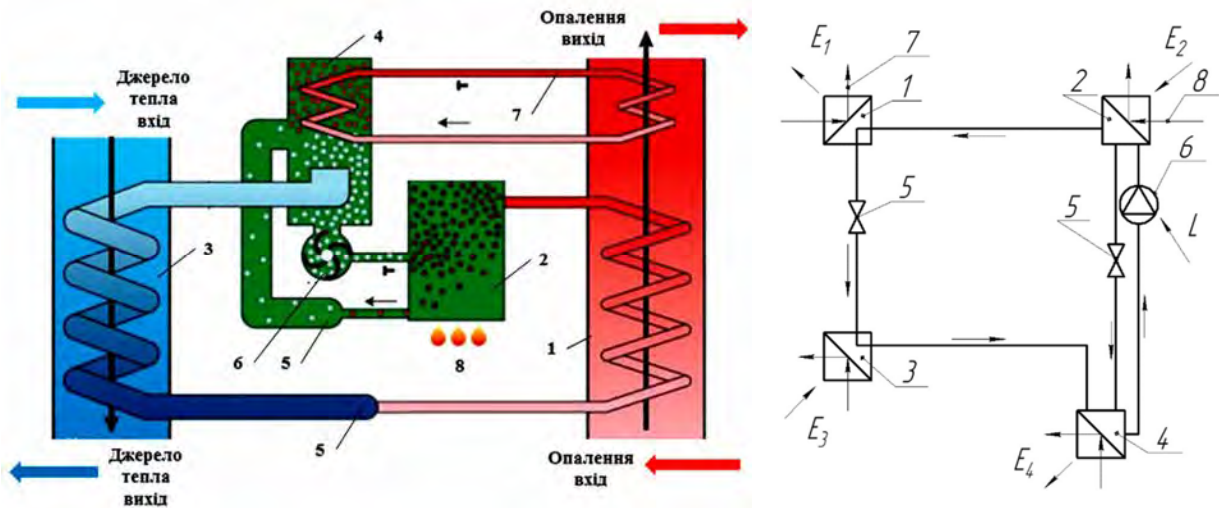
$$E_t = E_2/L = (E_1 + L)/L, \quad (8.1)$$

де: E_t – коефіцієнт перетворення теплового насоса, відн. од.; E_1 – енергія, отримана з низькотемпературного джерела, Дж; E_2 – енергія, яка передається обігрівальній установці, Дж; L – механічна робота компресора, Дж.

Компресорні теплові насоси характеризуються високими значеннями вказаного коефіцієнта $E_t = 2,5-6$ (теоретично навіть вище – до 8).

Принцип дії **абсорбційних теплових насосів** (рис. 8.6) заснований на здатності рідин та солей поглинати випари робочої рідини. Найбільш поширеними джерелами робочої пари для абсорбційних систем є:

- вода (робоча рідина) і літій-бромід (абсорбент);
- аміак (робоча рідина) і вода (абсорбент).



а) принцип дії

б) схема роботи

1 – конденсатор; 2 – десорбер (генератор); 3 – випарник; 4 – абсорбер (поглинач); 5 – дросельований вентиль; 6 – насос; 7 – теплота, яка передається обігрівальному контуру; 8 – підведене тепло зовні

Рис. 8.6. Абсорбційний тепловий насос

У абсорбційних теплових насосах, стиснення робочої рідини досягається за рахунок нагрівання її під тиском в системі, до складу якої входить поглинач 4, насос 6, генератор 2 та дросельний клапан 5. Пара низького тиску на виході з випарника 3 поглинається абсорбентом. В наслідок цього процесу генерується тепло. Утворений розчин (суміш робочої рідини та абсорбенту) за допомогою насоса 6 перекачується під тиском і потрапляє до генератора (десорбера) 2, де википає при високій температурі. Робоча рідина (пара) конденсуються в конденсаторі 1, в той час як абсорбент повертається в поглинач (абсорбер) 4 до початкового стану через дросельний клапан 5.

Тепло «випаюється» з низькотемпературного джерела тепла у випарнику 3. Корисний вихід тепла здійснюється при вирівнюванні температур в конденсаторі 1 та поглиначі 4. До генератора 2 високотемпературне тепло (гаряча вода, водяна пара, топкові гази, природний газ, електронагрів тощо) надходить, щоб запустити процес роботи теплового насоса. Для роботи малопотужного насоса 6, необхідно затратити невелику кількість електроенергії. У десорбері 2 насичена аміаком вода нагрівається за рахунок тепла, що підводиться ззовні 8 (вторинна теплота технологічних процесів, геотермальні води, сонячні колектори, біогаз). Це призводить до утворення пари із аміаку (випаровується швидше від води), який потім конденсується у конденсаторі 1, віддаючи тепло нагрівальному середовищу 7. Сконденсований аміак перетікає через дроселюючий вентиль 5 до випарника 3, де, за рахунок різкого розширення, випаровуючись відбирає тепло від низькотемпературного джерела. Із випарника 3 аміак надходить до абсорбера 4, насичуючи збідний розчин аміаку, що повертається із десорбера 2. Під час насичення, в наслідок хімічної реакції, виділяється тепло абсорбції, яке відводиться до нагрівального середовища 7.

Коефіцієнти продуктивності E_t абсорбційних теплових насосів визначаються залежністю:

$$E_t = (E_1 + E_4) / (E_2 + E_3 + L), \quad (8.2)$$

де: E_1 , E_4 – енергія, яка передається нагрівальній установці, Дж; E_2 – теплова енергія, що подається у варильний апарат, Дж; E_3 – енергія, отримана із низькотемпературного джерела енергії, Дж; L – механічна робота компресора, Дж.

Порівняно з компресорними насосами, абсорбційні теплові насоси характеризуються більш низькою (у 2–3 рази) величиною коефіцієнта E_t , який становить 1,3–1,6. Перевагою абсорбційних теплових насосів перед компресорними є безшумність у роботі.

Термоелектричні теплові насоси. Принцип дії термоелектричних теплових насосів базується на ефекті Пельтьє (1834 р.). Сутність ефекту полягає у виділенні або поглинанні теплоти (залежно від напрямку електричного струму) у місці з'єднання двох різних матеріалів (чи напівпровідників) під дією постійної напруги.

На основі ефекту Пельтьє створюють термоелектричні модулі (рис. 8.7) – основний елемент термоелектричних теплових насосів. Принцип роботи термоелектричного модуля (ТЕМ) досить простий. Він являє собою масив напівпровідників p - і n -типів, послідовно з'єднаних між собою мідними провідниками (масив переходів «напівпровідник-метал»). Розглянемо принцип дії ТЕМ на прикладі двох з'єднаних між собою мідними контактами напівпровідників p - і n -типів, тобто масив чотирьох переходів «метал-напівпровідник». Припустимо, струм направлений від напівпровідника n -типу до напівпровідника p -типу. Нагадаємо, що за напрям струму вибирається напрямом, протилежне до впорядкованого руху електронів в металі, тому, рухаючись по замкненому контуру ланцюга, електрони будуть послідовно

долати чотири переходи: 1) мідь-напівпровідник p -типу; 2) напівпровідник p -типу-мідь; 3) мідь-напівпровідник n -типу; 4) напівпровідник n -типу-мідь.

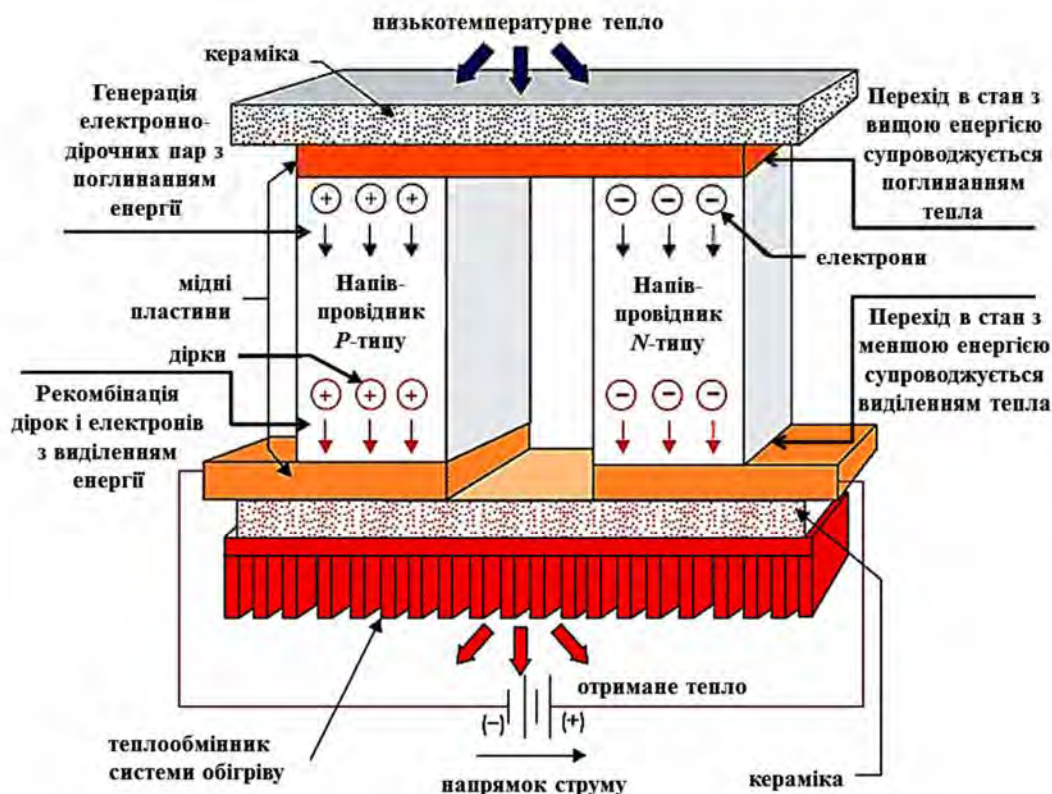


Рис. 8.7. Принцип роботи термоелектричного модуля теплового насоса

На першому переході електрони потрапляють з мідного провідника в напівпровідник p -типу, де основними носіями заряду є дірки. У напівпровіднику p -типу поблизу переходу відбувається рекомбінація дірок і електронів, що супроводжується виділенням енергії, оскільки з енергетичної точки зору електрони переходять зі стану з більш високою енергією (такою енергією електрони володіють в зоні провідності) в стан з меншою енергією (такою енергією електрони володіють у валентній зоні). Тому область на межі переходу «мідь-напівпровідник» p -типу нагрівається.

На другому переході електрони з напівпровідника p -типу переходять в метал. У напівпровіднику p -типу електрони в даній зоні утворюються за рахунок генерації електронно-діркових пар. У процесі генерації електронно-діркових пар, з енергетичної точки зору, електрони переходять з валентної зони (зі стану з меншою енергією) в зону провідності (в стан з більш високою енергією), що супроводжується поглинанням енергії. Тому область на межі даного переходу поглинає зовнішнє тепло.

На наступному переході електрони переходять з міді в напівпровідник n -типу. Енергія електронів в металі і напівпровіднику різна, причому електрони в напівпровіднику мають вищу енергію, ніж в металі. Перехід електронів з металу в напівпровідник n -типу, з енергетичної точки зору, відповідає збільшенню енергії електронів і, отже, супроводжується поглинанням енергії. В

наслідок чого на межі переходу «мідь-напівпровідник» *n*-типу відбувається поглинання зовнішньої теплоти.

На останньому переході електрони переходять з напівпровідника *n*-типу в мідь. В даному випадку ми маємо справу з енергетичним процесом, зворотним до розглянутого раніше, тобто в процесі переходу електрони переходять зі стану з більш високою енергією (зона провідності в напівпровіднику) в стан з меншою енергією (зона провідності в металі). В результаті такого переходу виділяється енергія, що призводить до нагрівання зони переходу «напівпровідник *n*-типу-мідь». Отримане тепло відводиться теплообмінником для потреб обігріву або приготування теплої води.

Отже, в результаті проходження струму через таку послідовність переходів два переходи будуть нагріватися, а два – охолоджуватися. В елементі Пельтьє кількість пов'язаних один з одним переходів може бути дуже великою. Але головне, ті котрі нагріваються розташовують в одній площині, а ті котрі охолоджуються – в іншій. Таким чином, одна керамічна пластина нагрівається, а інша, навпаки, охолоджується (рис. 8.8).



Рис. 8.8. Структура термоелектричного модуля

Кількість тепла E_1 , що поглинається, залежить від різниці коефіцієнтів термоелектричних сил поєднаних матеріалів, сили струму та часу дії. «Привідною» є енергія E_W , що отримана від джерела постійної напруги.

Коефіцієнт продуктивності E_t визначається залежністю:

$$E_t = E_2 / E_W = (E_1 + E_W) / E_W, \quad (8.3)$$

де: E_1 – теплота, що поглинається із нижнього джерела теплоти, Дж; E_2 – теплота, що віддається обігрівальній установці, Дж; E_W – енергія, яка береться із джерела електричного струму, Дж.

Величина коефіцієнта перетворення E_t термоелектричних теплових насосів значно нижча від компресорних ТН, знаходиться на рівні від 1,4 до 2. Термоелектричні теплові насоси знайшли своє застосування перш за все у

системах охолодження електронних пристроїв (наприклад, потужні комп'ютери), в кондиціонерах та холодильниках невеликої потужності, для обігріву приміщення та нагріву води і т.д.

Хімічні теплові насоси працюють на основі використання теплоти, яка виділяється при проходженні ендотермічних та екзотермічних хімічних реакцій. Ці насоси знаходяться лише у фазі дослідних робіт, тому не відомі широкому загалу.

8.3. Опалювальні системи на основі теплових насосів

Умовою роботи теплового насосу є наявність джерела енергії, тепло від якого буде відбиратись для забезпечення процесу кипіння робочого тіла у випарнику.

За типом джерела тепла насоси поділяються на наступні групи:

- **геотермальні** – використовується тепло ґрунту або підземних вод;
- **повітряні** – використовується тепло навколишнього повітря;
- **використовують вторинне тепло** іншого теплового процесу, яке потребує утилізації (наприклад, тепло технологічного процесу чи стічні води).

Температура джерела тепла має вирішальне значення для продуктивності та ефективності теплового насосу. Тому при виборі типу обладнання дуже важливе правильне проектування всієї системи теплопостачання, для визначення необхідної потужності теплового насосу та температурного режиму роботи. У випадку використання геотермальної енергії обов'язковим є обстеження земельної ділянки для визначення типу ґрунту, його теплоємності, геологічних особливостей та можливості розташування ґрунтових зондів чи колекторів. При використанні води в якості джерела тепла – обов'язково провести хімічний аналіз води.

Ґрунт – найбільш оптимальне джерело розсіяного тепла. Вже на глибині 5–7 метрів температура ґрунту практично стала протягом всього року і складає 10–12 °С (рис. 8.9).

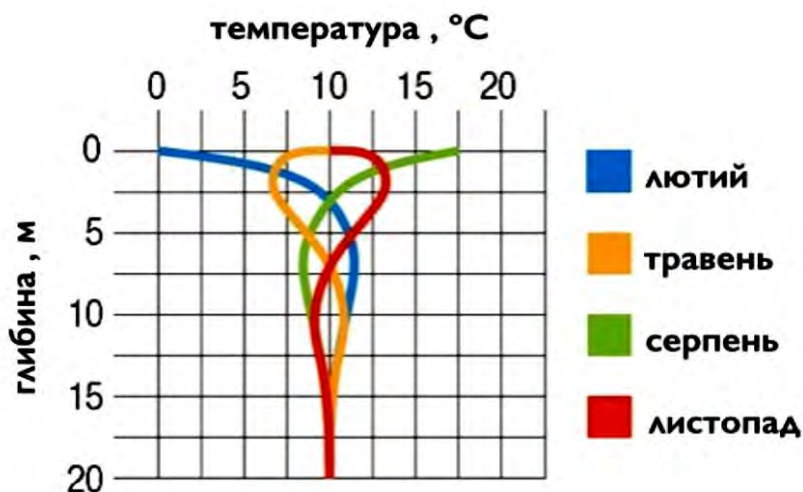


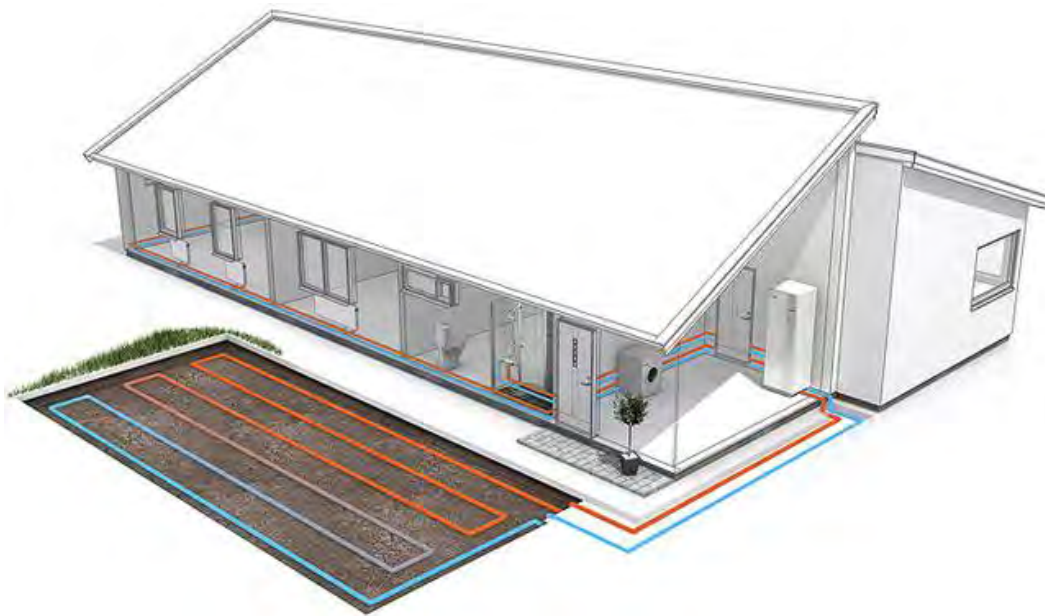
Рис. 8.9. Динаміка температури ґрунту залежно від глибини

Ґрунт акумулює сонячне випромінювання, яка падає на його поверхню та постійно отримує тепло від земного ядра. Ґрунт характеризується стабільною температурою, яка мало залежить від погоди. Теплоємність ґрунту залежить від декількох факторів – типу ґрунту, геологічного складу, вологості. Чим вища вологість – тим більше тепла можна отримати. Вологий глиняний ґрунт буде мати найкращі теплові характеристики, а великий вміст піску значно зменшить кількість відібраного тепла.

Відбір геотермальної енергії може здійснюватись декількома методами:

- за допомогою горизонтальних чи вертикальних ґрунтових колекторів;
- за допомогою вертикальних ґрунтових зондів;
- за допомогою водяного контуру, що розміщується у свердловині.

Ґрунтовий колектор. Первинний контур геотермального теплового насосу може бути виконаний у вигляді горизонтального ґрунтового колектору (рис. 8.10, а), який розташовується на глибині 1,2–1,5 м (на 0,2 м глибше глибини промерзання ґрунту). Така глибина забезпечує достатньо стабільну температуру протягом року.



а) горизонтальний колектор



б) спіральний колектор



в) вертикальний колектор

Рис. 8.10. Типи ґрунтових колекторів теплового насоса

Тепловіддача від ґрунтового середовища залежить від типу ґрунту та коливається в межах від 10 до 35 Вт/м² (пісок сухий – 10 Вт/м², глина суха – 20 Вт/м², глина волога – 25 Вт/м², глина сильно зволожена – 35 Вт/м²). Влаштування ґрунтового колектору потребує досить значної площі земельної ділянки. Зменшити площу вкладання можна за рахунок спіральних колекторів (рис. 8.10, б). Крім горизонтального колектору може використовуватись також вертикальний колектор, який займає меншу площу, але вимагає більшого об'єму земляних робіт за рахунок більшої глибини (15–30 м) Це в свою чергу може привести до удорожчання геотермальної системи.

Одним з різновидів вертикального колектора є енергетичні корзини (рис. 8.10, в), що дозволяють збільшити відбір тепла з одиниці площі, забезпечити компактність та зменшити глибину встановлення – 4 м.

При плануванні ґрунтового колектора необхідно дотримуватись гідравлічного балансу – всі контури повинні бути однакової довжини. Слід використовувати контури довжиною не більше 100 м, щоб запобігти підвищеній витраті енергії циркуляційними насосами. Земельна ділянка, на якій знаходиться ґрунтовий колектор, повинна мати мінімальну забудову та затінення, щоб повноцінно відновлюватись упродовж теплого періоду року. Не можна висаджувати над колектором дерева з розвинутою системою коріння, в тому числі і для запобігання пошкодженню самих колекторів.

Сонячне випромінювання та опади забезпечують повну регенерацію ґрунту для ефективної віддачі накопиченого тепла в опалювальний сезон. Виконуються ґрунтові колектори з поліетиленових труб різних діаметрів. Також на ринку присутні готові модулі у вигляді попередньо зібраних трубних секцій.

При використанні **вертикальних ґрунтових зондів** (рис. 8.11) тепловий насос працює зі стабільною продуктивністю та високою ефективністю упродовж всього року. Зонди опускаються на глибину від 40 до 120 м. Із одного метра свердловини можна отримати від 30 до 70 Вт тепла. Середній показник складає близько 50 Вт/м, який в основному і приймається для розрахунку загальної довжини системи геотермальних зондів.

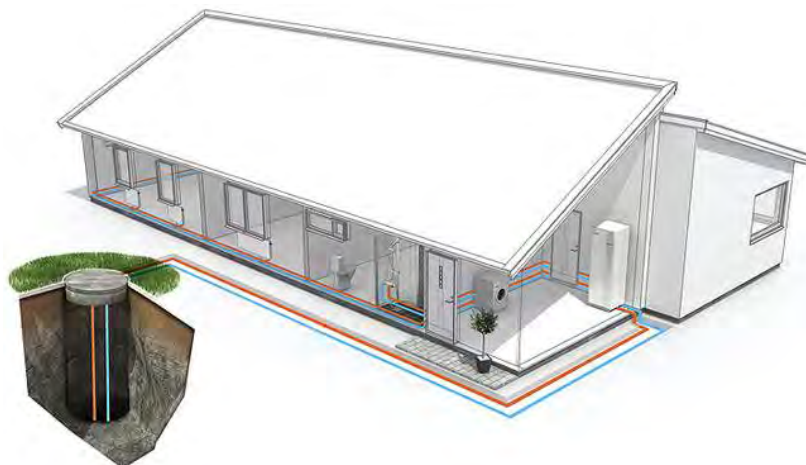


Рис. 8.11. Схема застосування вертикальних ґрунтових зондів

Недостатня довжина та кількість ґрунтових зондів призведе до зменшення продуктивності теплового насосу, обмерзання свердловин і як наслідок – недостатньої кількості тепла для обігріву об'єкту.

Відбір тепла відбувається за допомогою зондів, виготовлених із поліетиленових труб. Це можуть бути 2-х або 4-х трубні U-подібні зонди. Сьогодні, крім зондів з гладкими трубами доступні також і турбулентні зонди, які мають внутрішню спіральну нарізку, для створення турбулентного потоку. Використання таких турбо-зондів зменшує гідравлічний опір та збільшує ефективність системи.

Свердловини з розміщеними в них ґрунтовими зондами повинні заповнюватись фіксуючим терморозчином, який має визначені параметри теплопровідності. Крім того розчин забезпечує захист зондів від механічного пошкодження. При плануванні розташування земляних зондів необхідно дотримуватись мінімальних відстаней між свердловинами – від 5 до 6 м. Також забороняється висаджувати дерева з глибокою кореневою системою на місці розміщення геотермальних зондів.

У якості теплоносія для ґрунтових зондів застосовуються незамерзаючі розчини, наприклад, на основі етиленгліколю (температура замерзання до 15 °С). Незамерзаючі розчини обов'язково повинні бути екологічно нейтральні, адже під час аварії та витіку відбудеться забруднення ґрунтових вод та значної прилеглої території.

Контур теплового насоса в ґрунтових водах (рис. 8.11). Підземні ґрунтові води є одним з найефективніших джерел первинного тепла для роботи теплових насосів. Упродовж року температура ґрунтової води залишається стабільною та знаходиться в межах від 7 до 12 °С.

Схема використання енергії води включає в себе дві свердловини:

- «верхня» забезпечує відбір води для подачі на теплообмінник водоводяного теплового насосу, де відбувається передача тепла;
- «нижня» приймає охолоджену тепловим насосом воду.



Рис. 8.12. Схема теплового насоса з використанням тепла ґрунтових вод

Тепло відбирається за допомогою труб, занурених у воду. Відстань між точкою отримання тепла (забору води) і точкою повернення (повернення використаної у ТН води) має бути не менше 10 метрів. Тепловіддача ґрунтових вод може сягати 80 Вт з одного метра глибини колодязя. У більшості випадків якість води не дозволяє працювати напряму з високоефективними теплообмінниками теплових насосів. У такому випадку рекомендується встановлення проміжного теплообмінника, який відповідає конкретним умовам експлуатації та захищає тепловий насос.

Обидві свердловини повинні відповідати об'ємам споживаної тепловим насосом води. Для отримання 1 кВт тепла з ґрунтових вод потрібно забезпечити продуктивність системи на рівні 0,25 м³/год.

В якості джерела тепла можуть також використовуватись поверхневі води. Але під час проектування такої схеми потрібно враховувати суттєві коливання температури води в залежності від пори року.

Джерело тепла – навколишнє повітря. На вулиці встановлюється зовнішній блок, який містить теплообмінник та вентилятор (рис. 8.13). Повітря подається на випарник, де відбувається відбір тепла і після охолодження знову повертається в навколишнє середовище.

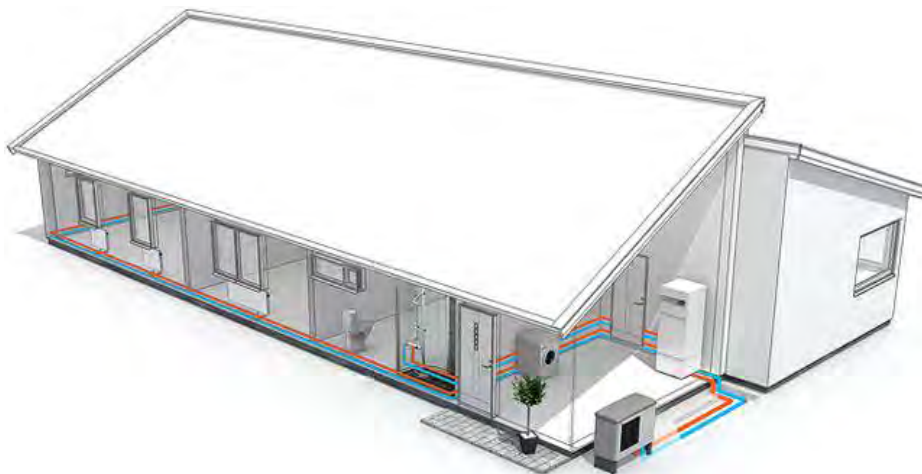


Рис. 8.13. Схема повітряного теплового насоса

Сучасні технології дозволяють експлуатувати повітряні теплові насоси до температури зовнішнього повітря до мінус 25 °С. Для роботи при низьких температурах насоси обладнуються додатковим електричним нагрівачем або працюють в системі з додатковим теплогенератором (наприклад, дров'яним каміном, котрий обладнано водяним контуром). Застосовуючи даний тип обладнання для опалення пасивних та енергоефективних будинків можна повністю забезпечити нагрів лише завдяки повітряному тепловому насосу. Навіть при низьких зовнішніх температурах такі будинки потребують незначну кількість тепла. Важливим фактором, який необхідно враховувати при плануванні повітряних теплових насосів, є звукові характеристики. Від шумових характеристик буде залежати комфорт проживання поруч з таким тепловим насосом.

Основною причиною шуму повітряного насосу під час роботи є вентилятор. Вентиляційна решітка та інші компоненти також можуть бути причиною утворення шуму. Використання фірмою Waterkotte новітньої форми крильчатки, що нагадує крило сови, дало змогу покращити акустичні характеристики вентилятора (рис. 8.14, а). Узгодження параметрів решітки зовнішнього блоку з продуктивністю вентилятора дозволило знизити звуковий тиск теплового насосу до 34 дБ на віддалі 4 м.

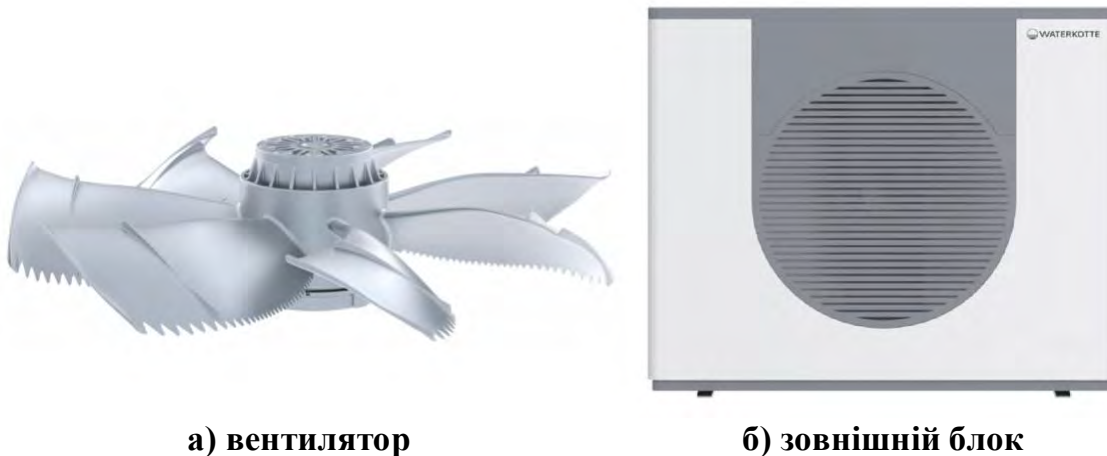


Рис. 8.14. Складові повітряного теплового насоса EcoTouch Air

Широкого поширення в останні роки набули повітряні насоси моноблочного типу, потужністю від 8 до 12 кВт. Конструкція такого теплового насосу передбачає встановлення холодильного та гідравлічного контуру в зовнішньому блоці, у приміщення заводяться лише трубопроводи системи опалення та встановлюється регулятор управління (або гідравлічна станція). Переваги таких насосів – нижча вартість (відсутність земляних робіт), простота встановлення та відсутність робіт з холодильним контуром (фреоном).

Оптимальним рішенням для використання повітряних теплових насосів є **бівалентний режим роботи** – поєднання із водяним контуром інших джерел тепла (газовим чи пелетним котлом, дров'яним або пелетним каміном). За такої схеми від 70 до 90 % теплового навантаження забезпечуватиметься тепловим насосом "повітря-вода" і лише при дуже низьких температурах вмикатиметься додатковий теплогенератор.

У залежності від середовища, через яке відбирається тепло та середовища, за допомогою якого воно віддається у внутрішній теплообмінник, виділяють декілька основних опалювальних систем: **повітря-повітря, повітря-вода, вода-вода**.

Подана класифікація дещо спрощена, визначення «вода» означає будь-який рідкий носій тепла, а у визначення «повітря» включають топкові гази, пару, вторинне тепло системи вентиляції і т. д.

До складу обігрівальних систем, крім представлених елементів теплових насосів, входять внутрішні та зовнішні обмінники тепла, структура яких залежить від виду обігрівальної системи.

Задача **внутрішніх обмінників тепла** полягає в передачі тепла у внутрішній простір будинку чи до установки нагрівання води, або в акумулюванні теплоти відомих джерел.

Задача **зовнішніх обмінників тепла** полягає у створенні можливості вбирання теплоти із середовища, що знаходиться поза будинком чи з іншого доступного джерела тепла, або в передачі тепла у це середовище.

Обігрівальна система типу повітря-повітря (рис. 8.15). У цій системі теплота береться із зовнішнього повітря або ж засмоктується з опалюваного приміщення та передається до опалювальної установки. По суті, теплові насоси даного типу – це сучасні кондиціонери, які можуть не тільки охолоджувати влітку, але й обігрівати взимку. Вони дешеві в установці, оскільки не вимагають прокладки зовнішнього колектора, досить економічні й тихі.

Дані теплові насоси можуть випускатися в двох варіантах виконання:

- варіант моноблок (руфтоп);
- варіант «спліт», при цьому **зовнішній блок** є тепловим насосом типу «повітря-вода», а в якості **внутрішніх блоків** виступають фанкойли.

Руфтоп – це поєднання в одному корпусі зовнішнього та внутрішнього блоків. Використовуються для обслуговування великих приміщень з можливістю використання теплоти технологічних процесів або вентиляції.

Фанкойл (вентиляторний конвектор) – теплообмінник, до якого подається тепло- або холодоносії (найчастіше вода), через який за допомогою вбудованого вентилятора пропускається повітря, яке в залежності від температури води або нагрівається або охолоджується.

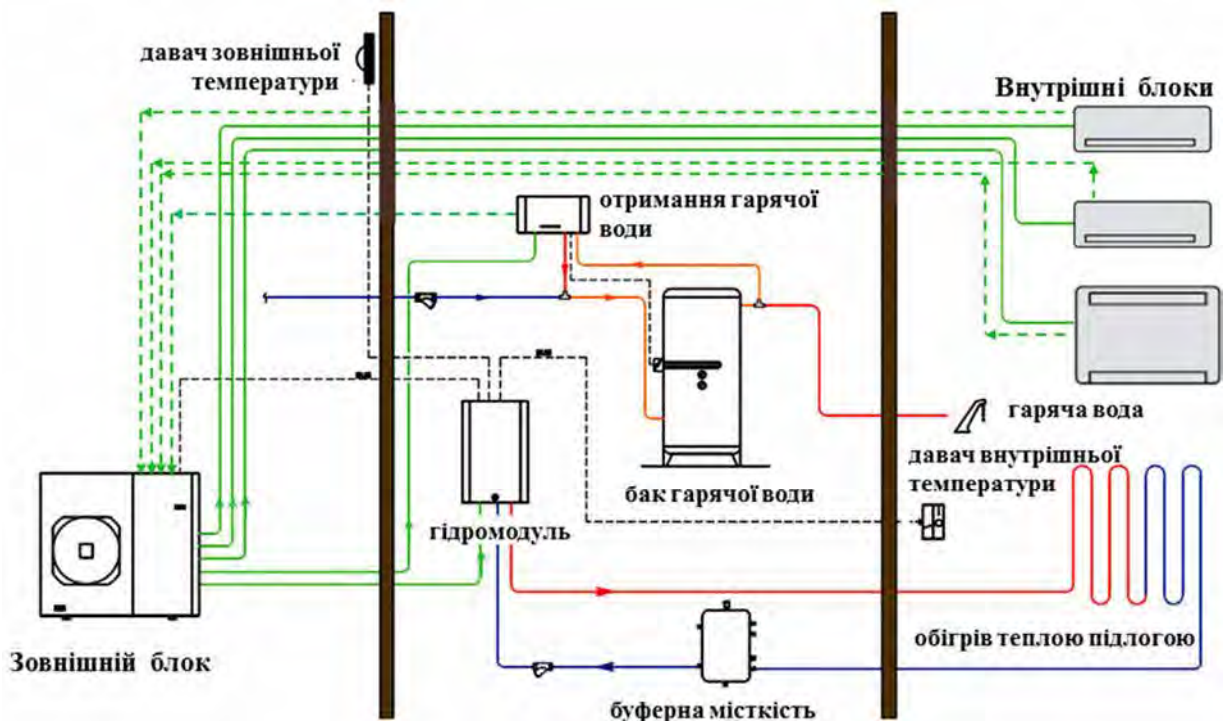


Рис. 8.15. Структура опалювальної системи на основі теплового насоса типу «повітря-повітря» та «повітря-вода»

Фанкойли автоматично підтримують задану температуру, а також здійснюють очищення та підмішування свіжого повітря. У зимовий період фанкойли здатні повністю замінити систему водяного опалення.

Для отримання гарячої води на побутові потреби (рис. 8.15), до системи «повітря-повітря» додають нагрівач та бойлер з можливістю електропідігріву. Перевагою такого поєднання є можливість отримання гарячої води незалежно від того в якому режимі працює тепловий насос – на обігрів чи охолодження (як кондиціонер) приміщення. З метою обігріву приміщень за допомогою теплої підлоги або радіаторів, систему «повітря-повітря» дообладнують гідромодулем. Основним завданням гідромодуля є отримання гарячої води для системи опалення приміщення в залежності від температури довкілля, може подавати воду і до водяних конвекторів. У такому випадку отримуємо систему типу «повітря-вода».

Обігрівальна система типу "повітря-вода". У цій системі тепло береться із зовнішнього повітря або засмоктується із опалюваного приміщення і передається, за рахунок циркуляції холодоагенту теплового насоса, до води, яка використовується як нагрівальне середовище у системі опалювання приміщень та приготуванні гарячої води для побутових потреб (рис. 8.15).

В якості внутрішніх блоків, на місці вентиляторних конвекторів, використовують радіатори традиційної системи обігріву приміщення, доповнюючи систему обігріву теплою підлогою.

В обігрівальній системі типу "вода-вода" тепло береться від води і передається циркуляцією холодоагенту теплового насоса до споживача, при цьому в якості низькопотенційного джерела теплоти можуть використовуватись ґрунтові, поверхневі води та ґрунт.

З точки зору способу роботи розрізняють наступні системи теплових насосів: моновалентна, бівалентна, бівалентно-паралельна, альтернативна.

Робота теплового насоса у **моновалентній системі** полягає у тому, що тепловий насос являється єдиним джерелом, що забезпечує постійну подачу теплоти до опалювальної установки. Ця система використовується лише тоді, коли джерело теплової енергії має відносно постійну та високу температуру протягом усього року (наприклад, стічні комунальні води).

Бівалентна система роботи теплового насоса полягає в тому, що вона працює разом з іншими опалювальними установками. Тепловий насос забезпечує теплом тільки в межах можливого (залежно від зовнішніх умов), після чого у подальшому обігріві приміщення приймає участь традиційна опалювальна система. Межа перемикання залежить від температури на виході із теплового насоса, при якій забезпечується необхідна теплова потужність для обігріву приміщення.

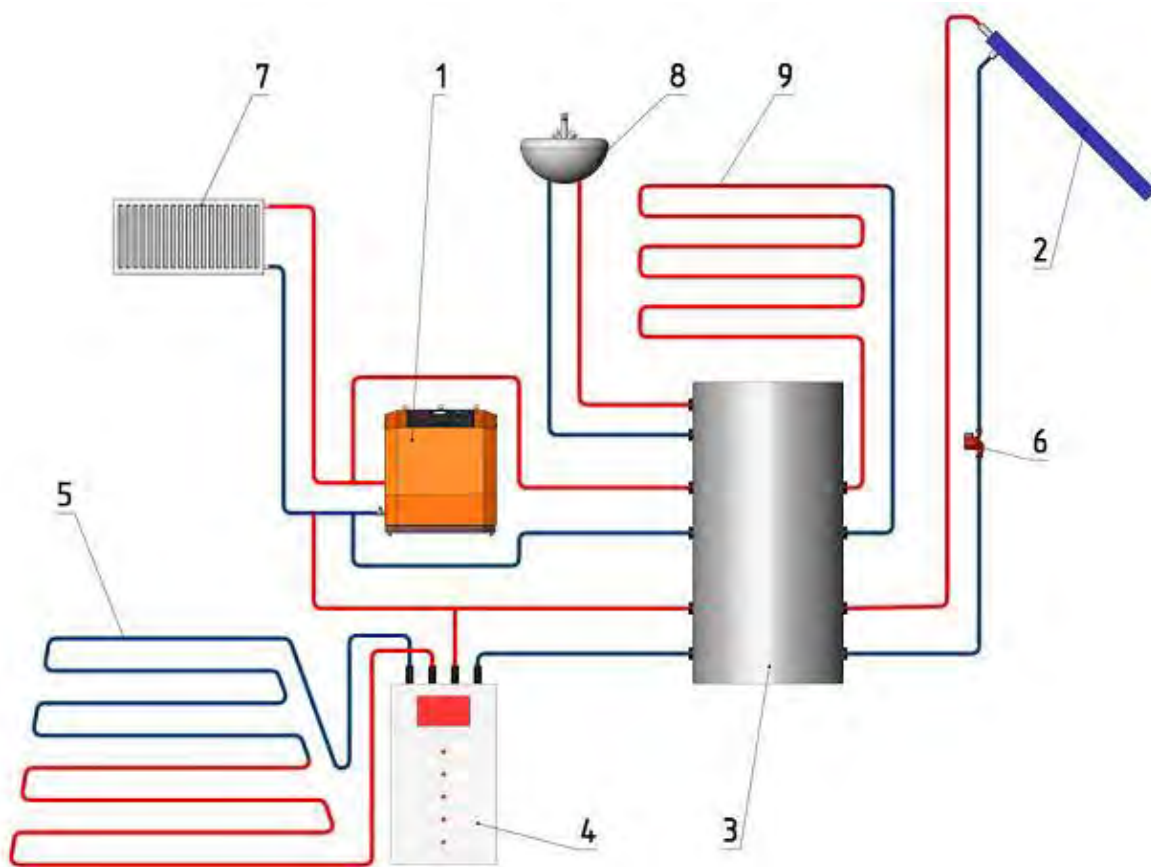
Цю систему досить часто застосовують на практиці, оскільки інколи потужності теплового насоса, особливо у холодний сезон, не завжди вистачає для забезпечення бажаних температурних умов.

У **бівалентно-паралельній системі**, як і в системі, представленій вище, тепловий насос працює разом з іншою нагрівальною установкою. Різниця між цими системами полягає лише у тому, що у бівалентно-паралельній системі,

якщо тепловий насос не може досягти необхідної температури, паралельно вмикається інший нагрівальний пристрій.

Робота теплового насоса в **альтернативній системі** полягає в тому, що тепловий насос, в залежності від існуючих потреб, працює як нагрівальний пристрій, або як охолоджувальний. Триходовий вентиль, що керується термостатом, викликає зміну напрямку протікання робочого середовища. Кожен обмінник тепла працює періодично як конденсатор або як випарник. Завдяки цьому, наприклад, вода, що перекачується через нагрівальні пристрої, в залежності від потреб, нагрівається (опалення приміщень) або охолоджується (кондиціонування приміщень).

На рис. 8.16 представлена схема опалення та гарячого водопостачання бівалентної паралельної системи на основі теплового насосу 4 із сонячним колектором 2, що слугує для опалювання приміщень та підігрівання теплої води для побутових потреб.



1 – газовий котел (теплогенератор); 2 – сонячний колектор; 3 – резервуар для води; 4 – тепловий насос; 5 – нижнє джерело теплоти; 6 – насос системи сонячного колектора; 7 – радіатор опалення; 8 – гаряча вода для побутових потреб; 9 – система обігріву «тепла підлога»

Рис. 8.16. Схема бівалентної паралельної системи із сонячним колектором

Абсорбоване сонячним колектором тепло зберігається у водному теплому акумуляторі 3, при необхідності водний резервуар може бути

використаний як нижнє джерело теплоти для теплового насоса. За допомогою сонячної енергії та роботи теплового насоса можна покрити близько 65 % річних потреб у теплі. Іншу частину покриває додаткове опалювання (наприклад, газове). Нагрівальні можливості теплового насоса знаходяться на рівні температури готової до використання води в межах від 55 до 65 °С. Тому, для вирівнювання добових коливань потреби у теплі та гарячій воді використовується акумулятор тепла.

8.4. Нестандартні рішення акумулювання низькопотенціальної енергії

Останнім часом все більше уваги приділяється пошуку нетрадиційних, і в той же час, нестандартних підходів до отримання низькотемпературного джерела тепла для теплових насосів.

До відносно нової технології належить геотермальна вентиляція, опалення «кригою» та магнітний тепловий насос.

Геотермальна вентиляція – базується на принципі теплового насоса, призначена для стабілізації температури припливного повітря протягом усього року в діапазоні від 16 до 20 °С (рис. 8.17).



Рис. 8.17. Система геотермальної вентиляції

Це стало можливо завдяки використанню системи підземних трубопроводів, які діючи за основним законом теплообміну («більш нагріті тіла віддають тепло менш нагрітим»). Трубопроводи пропускають через ґрунт, температура якого цілий рік знаходиться в межах від 5 до 10 °С, тоді ґрунт

взимку – нагріває холодне вуличне повітря, а влітку – охолоджує тепле внутрішнє повітря.

Пропонується два варіанти геотермальних систем:

– де ґрунтовим теплообмінником служить повітроводи з неіржавіючої сталі з гарними аеродинамічними характеристиками;

– де ґрунтовим теплообмінником є повітровід «труба в трубі», у внутрішній частині якого переміщається витяжне повітря (відпрацьоване), а в зовнішній трубі – повітря, яке забирається з вулиці, тобто припливне (свіже).

Експериментальні дослідження показали, що в зимовий період ґрунтовий теплообмінник може нагрівати припливне повітря, що надходить у приміщення, до температури вищої від нуля градусів, а у літній період охолоджувати зовнішнє повітря до 18–20 °С.

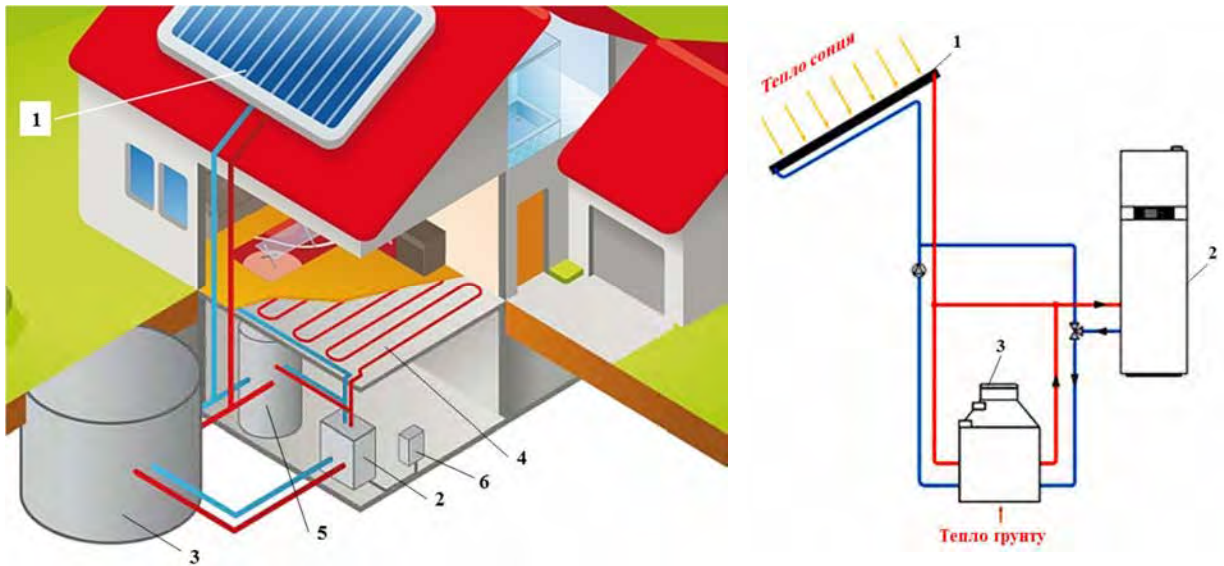
Опалення «кригою». При зміні агрегатного стану води виділяється значна енергія (енергії фазових переходів), яку можна використовувати як нижнє джерело тепла. Йдеться про те, що вода при замерзанні виділяє багато теплової енергії (330 кДж/кг), що майже у 80 разів більше, ніж потрібно для її нагріву-охолодження на 1 °С. При цьому вона фактично не змінює свою температуру (близько -1 °С) до того моменту, коли не замерзне весь об'єм. Перехід води з рідкого в твердий агрегатний стан відбувається у льодяному баку.

Опалювальна система на основі використання енергії кристалізації води складається з теплового насоса, ємності з чистою водою (льодяний бак з теплообмінником), сонячних колекторів (бажано застосувати повітряні абсорбери – композитні сонячні повітряні колектори) та системи автоматичного керування (рис. 8.18).

У баку по спіралі прокладені пластикові труби розсільного контуру теплового насоса. На зовнішній стінці бункера розташований регенеративний теплообмінник. Через нього в льодосховище надходить тепло від сонячних колекторів та повітряних абсорберів. Як тільки температура води в баку опускається нижче температури навколишнього ґрунту, вступає в дію геотермальне тепло. Навіть коли бункер повністю замерзає, він продовжує отримувати тепло від навколишньої землі, кількість якої залежить від типу ґрунту. Влітку ж навпаки, зайве тепло з бака буде відводитися через стінки у ґрунт, таким чином, усувається проблема його перегріву.

Тепловий насос відбирає тепло із ємності до того моменту, коли весь об'єм води не замерзне. Потім відбувається регенерація ємності за рахунок тепла ґрунту та тепла повітря і сонця (за допомогою сонячних колекторів). Система працює на межі замерзання-розмерзання води, тобто при температурі від -1 до +1 °С. В цьому температурному проміжку вода дозволяє акумулювати набагато більше енергії – 330 кДж/кг, аніж при інших температурах. Із одного літра криги (приблизно 916 грам) можна отримати приблизно 306 кДж енергії. Це відповідає приблизно 0,085 кВт год. Енергія згорання одного літра дизельного палива складає 10 кВт год. Таким чином 120 літрів криги тотожні одному літру дизельного палива, а об'єм резервуару на 10 тис. літрів (мінімальна ємність для індивідуальних житлових будинків) акумулює

приблизно 850 кВт год. енергії, що виділяється при кожному циклі замерзання. У європейських країнах, особливо в Німеччині, льодяне опалення знаходить досить широке застосування – існує великий портфель відповідних об'єктів – як індивідуальних житлових будинків, так і багатоквартирних, офісних, торгових і виробничих будівель. У 2014 році біля м. Гамбург було побудовано мікрорайон на 500 квартир (найбільша система льодяного опалення в світі), центральне опалення яких організовано за допомогою льоду в ємності на 1,5 мільйона літрів води.



а) загальний вигляд системи опалення

б) принцип дії

1 – сонячний колектор; 2 – тепловий насос; 3 – льодяний бак; 4 – система «тепла підлога»; 5 – накопичувальний резервуар гарячої води; 6 – контроллер

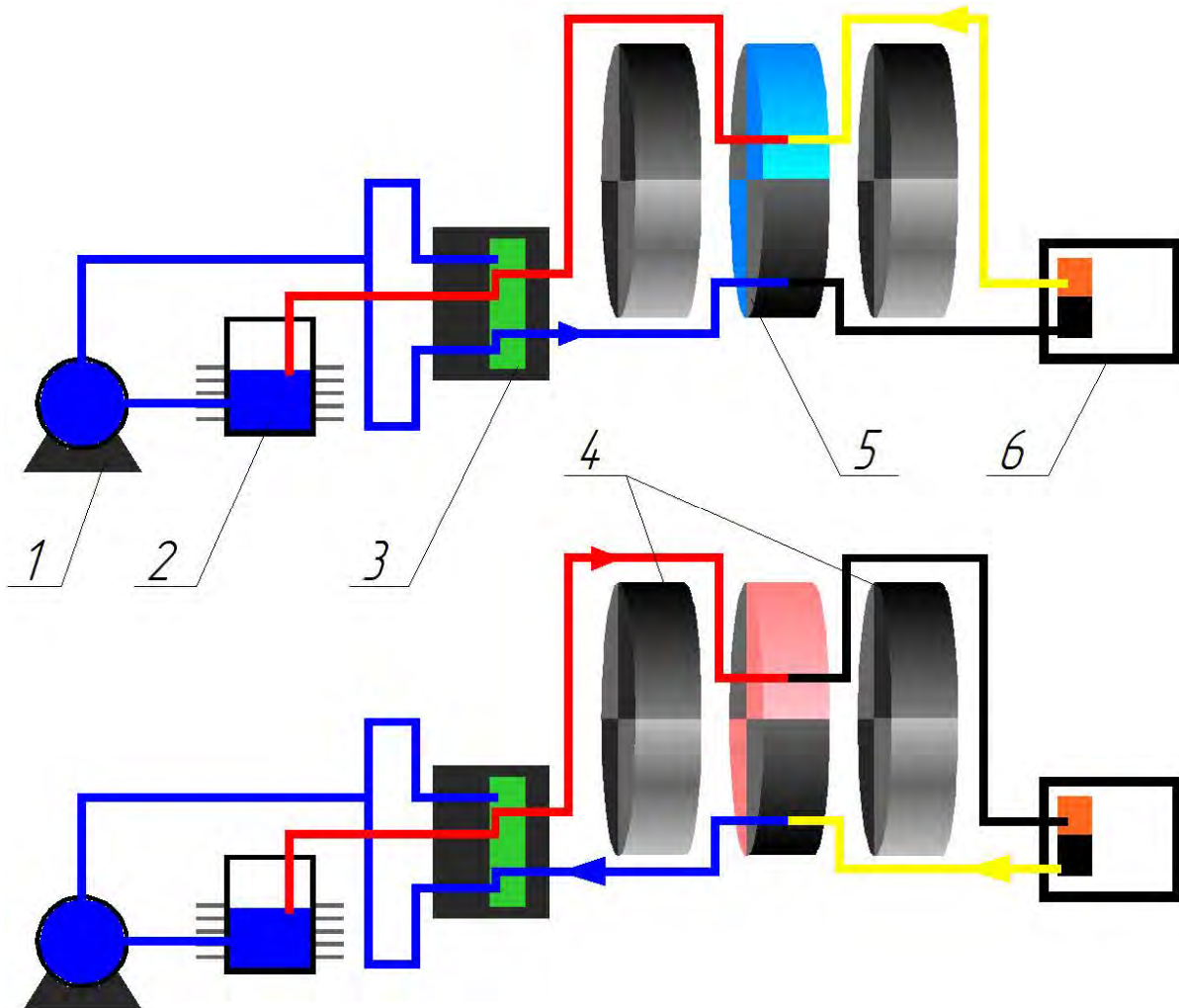
Рис. 8.18. Система опалення з використанням енергії фазового переходу води

Систему опалення за допомогою льоду можна порівняти за вартістю з традиційним способом організації опалення на основі звичайного теплового насоса. Її використання може бути виправдане у випадках, коли місце на ділянці обмежено, або існують обмеження по влаштуванню глибоких свердловин для зондів теплового насоса. Крім того, обмежений обсяг енергії, обумовлений розмірами ємності, а також відповідне «по природі» для теплових насосів низькотемпературне опалення (теплі підлоги) передбачає використання льодяного опалення тільки в будівлях високого ступеня енергоефективності, тобто дуже якісно спроектованих і добре утеплених будинках.

Магнітний тепловий насос. В основі принципу роботи магнітного теплового насоса лежить фізичне явище, що має назву магнітокалоричний ефект. Більш яскраво ефект проявляється у пара- і феромагнетиків, до яких відносять такі речовини як солі заліза, нікелю, кобальту і ряду рідкоземельних металів. Потрапляючи в зовнішнє магнітне поле, ці речовини починають намагнічуватися і виробляють тепло (рис. 8.19). Це досягається за рахунок

переорієнтації магнітних моментів мікрочасток уздовж силових ліній поля. Коли речовини залишають зовнішнє магнітне поле, вони розмагнічуються. Це призводить до того, що на розупорядкування магнітних моментів витрачається внутрішня енергія пара- і ферромагнетиків, що призводить до їх швидкого охолодження.

Подібна технологія магнітного охолодження і обігріву має ряд переваг в порівнянні з класичною схемою. В першу чергу, це висока енергоефективність. За коефіцієнтом перетворення електроенергії в холод подібні магнітні установки вже сьогодні перевершують компресорні зразки. Коефіцієнт корисної дії лабораторного прототипу такої магнітної холодильної машини склав 60 %, в той час як кращий показник традиційної установки ледве сягає 40 %. До того ж, робота магнітної кліматичної техніки ближча до ідеального теплового циклу.



1 – насос; 2 – бак для води; 3 – роторний клапан; 4 – постійний магніт; 5 – магнітна робоча речовина; 6 – теплообмінник

Рис. 8.19. Схема роботи магнітного теплового насоса в режимі охолодження-нагрівня

Що стосується екологічності, то і тут «новинка» обіцяє бути успішною через заміну в ній холодоагентів, які негативно впливають на озоновий шар нашої планети, звичайною водою. Забезпечення плавної роботи і відсутність вібрацій, властивих компресорним пристроїв, є ще одним суттєвим аргументом на користь технології магнітних теплових насосів і холодильних установок.

До недавніх пір до матеріалів з найбільш вираженим магнітокалоричним ефектом відносили солі рідкоземельного металу гадолінію (Gd). Але причина неможливості застосування цього елемента в побутовій техніці банальна: гадоліній – дуже дорогий (близько 200 \$ за кг) і в основному використовується в космічній техніці. У рамках своєї дослідницької роботи компаніям Chubu Electric Power і Santoku вдалося технологічно отримати нову робочу речовину, під назвою – лантановане залізо. Цей матеріал майже в два рази перевищує показники гадолінію за діапазоном зміни температур в магнітному полі.

Подібні рішення і нетрадиційні підходи на кліматичному ринку дозволяють сподіватися, що в питаннях організації оптимального мікроклімату ще не сказано останнє слово.

8.5. Ефективність використання теплових насосів у системах теплопостачання

Зростаючий попит на теплові насоси в країнах Євросоюзу вказує на виправданість у використанні низькотемпературних джерел енергії, яка, в першу чергу, базується на значній економії коштів на опалення будинку. Тим не менше, тепловий насос виправдує себе тільки в добре утепленому будинку, з тепловтратами не більше 100 Вт/м². Отже, чим краще утеплений будинок, тим більш вигідніша його експлуатація. Це, в свою чергу, накладає додаткові вимоги до якісного проектування та використання якісних будівельних та теплоізоляційних матеріалів.

Дослідженнями провідних виробників теплонасосного обладнання встановлено (рис. 8.20), що чим менша різниця (ΔT) між температурою джерела теплоти (T_x) та температурою теплоносія в опалювальному контурі (T_r), тим більший коефіцієнт перетворення тепла – **COP** (з англійської мови – coefficient of performance).

Коефіцієнт перетворення – це відношення отриманої внаслідок конденсації вивільненої високотемпературної енергії тепла до витрат, що полягають у необхідності підведення зовні додаткової механічної енергії на стиск холодоагенту у компресорі теплового насоса. Визначити коефіцієнт перетворення можна за допомогою **p-h** діаграми, скориставшись формулою:

$$COP = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_2}, \quad (8.4)$$

де: h_2 – ентальпія на початку стиску холодоагенту, Вт год./кг; h_3 – ентальпія в кінці стиску – на початку тепловиділення, Вт год./кг; h_4 – ентальпія в кінці зрідження холодоагенту, Вт год./кг.

Коефіцієнт перетворення для сучасних теплових насосів знаходиться в межах від 3,5 до 5,5, що означає – у скільки разів тепловий насос віддає більше

енергії від тієї що затратив на її отримання. Встановлено, що зниження температури нагрівального середовища на 1 К підвищує коефіцієнт перетворення на 2,5 %, а збільшення температури низькотемпературного джерела на 1 К підвищує коефіцієнт перетворення на 2,7 %.

Вигідніше опалювати приміщення низькотемпературними системами опалення: типу «тепла підлога» або повітряним опаленням (типу «повітря-повітря»), тому що в цих випадках температура теплоносія за медичними вимогами і будівельними нормами не буде перевищувати гранично допустиму величину 40 °С, а коефіцієнт перетворення має найвище значення ($COP=5,7$ для системи «тепла підлога» та $COP=3,3$ для радіаторного опалення).

З метою забезпечення максимальної ефективності використання теплових насосів практикується їх експлуатація у парі з додатковим генератором тепла (бівалентна схема опалення). Так як кількість дійсно холодних днів не перевищує від 10 до 15 % від тривалості опалювального сезону, як правило, потужність теплового насоса призначають на рівні 70–80 % від розрахункової. Усі потреби будинку у теплі покриваються тепловим насосом доти, доки вулична температура не опуститься нижче певного розрахункового рівня (температури бівалентності). Із цього моменту в роботу включається другий генератор тепла (електронагрівник, газовий або твердопаливний котел, сонячний колектор тощо).

Чим більший коефіцієнт завантаження теплового насосу, тим доцільніше його використання. Наприклад, системи нагріву води для тваринницьких ферм працюють у постійному режимі, упродовж всього року. Їх коефіцієнт завантаження (використання потужності протягом року) може сягати 80 %. В системах опалення приватного будинку коефіцієнт завантаження обладнання складає близько 30–40 %. В першому випадку річна економія та окупність теплового насосу рівної потужності буде в 2–3 рази вищою.

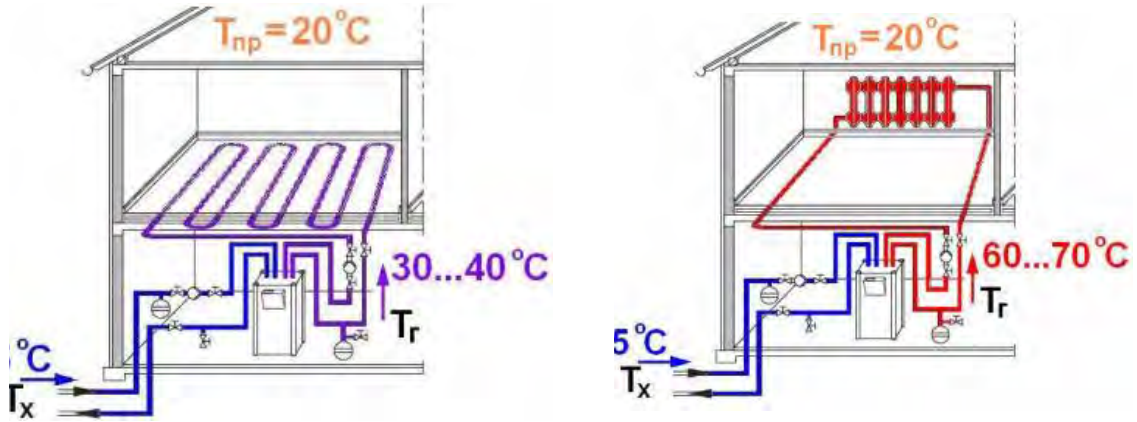
Чим більша тепла потужність необхідна, тим доцільніше використання теплових насосів. По-перше, питома вартість для теплових насосів великої потужності в 3–5 рази нижча, ніж для теплових насосів малої потужності. По-друге, чим більші обсяги споживання теплоти, тим більша економія від застосування теплових насосів в абсолютному вимірі.

Безперечними перевагами теплових насосів є економічність, широкий спектр застосування, екологічність, універсальність та безпека.

Економічність. Ефективність використання теплових насосів вища, ніж у будь-яких котлів, що спалюють паливо, а коефіцієнт ефективності (E) теплових насосів завжди більше одиниці. Наприклад, за умови потужності на привод компресора 1 кВт та потужності низькотемпературного джерела 3 кВт отримуємо коефіцієнт ефективності рівний $E=4$ (рис. 8.21).

Широкий спектр застосування. На нашій планеті існує безліч розсіяного сонячного тепла. Ґрунт та повітря є скрізь, тому не існує проблем з низькопотенційним джерелом енергії. Теплові насоси, незалежно від погодних умов та наявності викопного палива, зберуть це тепло для споживачів. Усе, що потрібно для цього – електрична енергія. Якщо вона недоступна, це теж не

проблема – деякі моделі теплових насосів можуть працювати в парі зі сонячними колекторами, вітрогенераторами, дизель-генераторами і т.д.



А – опалення «тепла підлога»

Б – радіаторне опалення

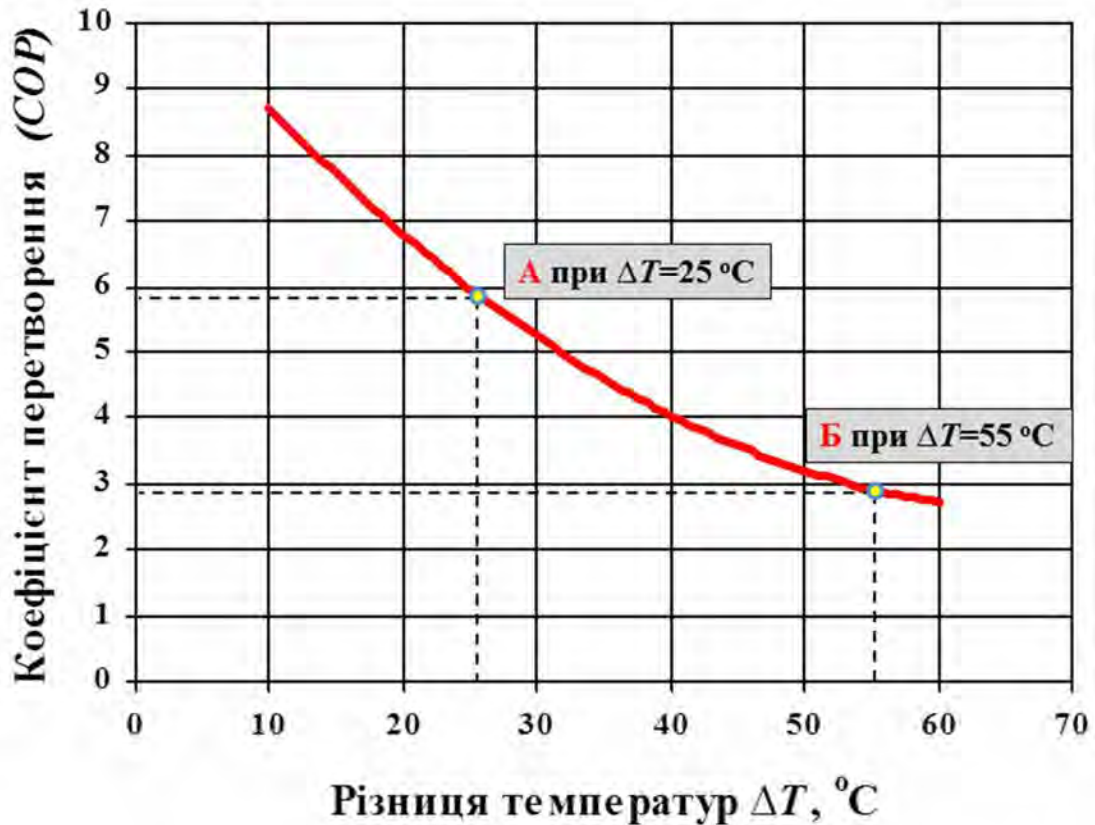


Рис. 8.20. Ефективність теплового насоса у різних системах опалення (залежність коефіцієнта COP від різниці температур $\Delta T = T_r - T_x$)

Екологічність. Тепловий насос не тільки заощаджує гроші, але й береже навколишнє середовище – не спалює викопне паливо. Тому навколо будинку на ґрунті немає слідів сірчаної, азотистої, фосфорної кислот і бензольних з'єднань.

На ТЕЦ скорочується витрата газу або вугілля на виробництво електрики, при цьому зменшуються викиди до атмосфери окисів типу CO , CO_2 , NO_x , SO_2 , PbO_2 . Застосовувані у теплових насосах хладагони не містять хлорвуглецю та є озонобезпечними.

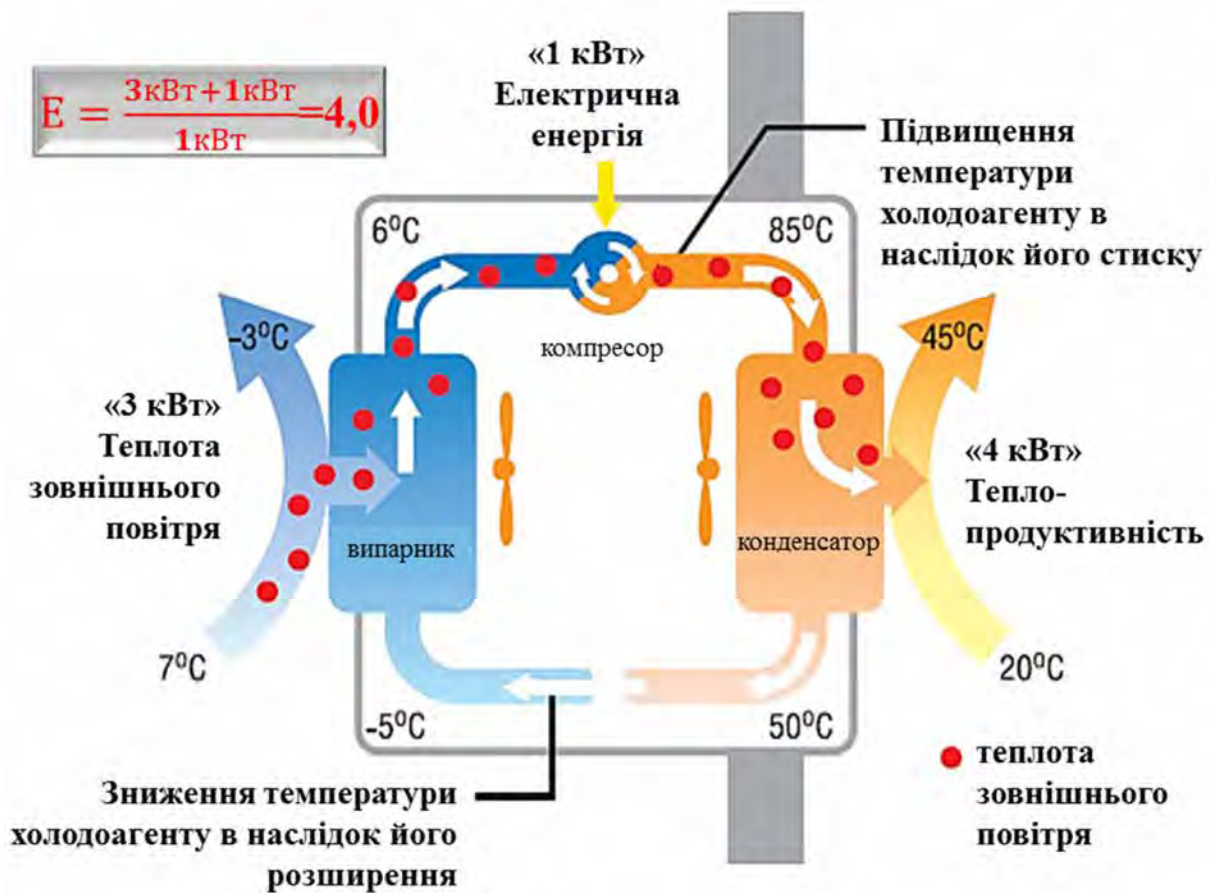


Рис. 8.21. Визначення коефіцієнта ефективності ТН

Універсальність. Теплові насоси, обладнані реверсивним клапаном, працюють, як на опалення, так і на охолодження. Тепловий насос може відбирати тепло з повітря приміщення, охолоджуючи його. Влітку надлишкове тепло можна використовувати для підігріву побутової води.

Безпека. Теплові насоси вибухо- та пожежобезпечні. У процесі опалення відсутні небезпечні гази, відкритий вогонь або шкідливі суміші. Деталі теплового насоса не нагріваються до високих температур, здатних стати причиною пожежі. Зупинка теплового насоса не приведе до його поломки, ним можна сміливо користуватися після тривалого простою. Також виключене замерзання рідин у компресорі або інших складових частинах.

До недоліків теплових насосів, які використовуються для опалення, слід віднести велику вартість встановленого обладнання та зворотна залежність їх ефективності від різниці температур між джерелом теплоти і споживачем. Так, зворотна залежність ефективності використання теплових насосів від різниці температур між джерелом теплоти і споживачем накладає певні обмеження на

використання систем типу «повітря-вода». Реальні значення коефіцієнту трансформації сучасних теплових насосів становлять від 2 при температурі джерела мінус 20 °С, і приблизно до 4 за температури джерела плюс 7 °С. Це призводить до того, що для забезпечення заданого температурного режиму споживача при низьких температурах повітря необхідно використовувати обладнання зі значною надлишковою потужністю, що пов'язане із нерациональним використанням капіталовкладень (втім, це стосується і будь-яких інших джерел теплової енергії). Вирішенням цієї проблеми є застосування бівалентної схеми опалення, при якій основне (базове) навантаження несе тепловий насос, а пікові навантаження покриваються допоміжним джерелом (газовий або електричний котлом). Оптимальна потужність теплонасосної установки становить від 60 до 70 % від необхідної встановленої потужності, що також впливає на закупівельну вартість установки опалення тепловим насосом. У цьому випадку тепловий насос забезпечує не менше 95 % потреби споживача в тепловій енергії за весь опалювальний сезон. При такій схемі середньосезонний коефіцієнт перетворення енергії для кліматичних умов Центральної Європи становить не менше 3.

Запитання для самоконтролю

1. Хто вперше запропонував прототип теплового насоса?
2. Вкажіть призначення теплового насоса.
3. Що таке верхнє джерело енергії?
4. Що розуміють під поняттям – нижнє джерело енергії?
5. Що відносять до природних джерел низькопотенціальної енергії.
6. Які техногенні джерела низькопотенціальної енергії Ви знаєте?
7. Які джерела низькопотенціальної енергії мають найвищий енергетичний рівень?
8. Які джерела низькотемпературного тепла сільськогосподарського виробництва Ви знаєте.
9. Як в країнах Євросоюзу держава мотивує придбання теплових насосів?
10. Дайте визначення терміну – тепловий насос.
11. Який принцип дії теплового насоса?
12. З яких основних елементів складається тепловий насос?
13. Як теплові насоси класифікують за принципом дії?
14. Яка відмінність між принципом дії компресійного та абсорбційного теплового насоса?
15. Який ефект покладено у принцип дії термоелектричного теплового насоса?
16. Як визначити коефіцієнт перетворення тепла тепловим насосом?
17. Що таке бівалентна система опалення?
18. Охарактеризуйте обігрівальні системи на основі теплових насосів?
19. Назвіть методи відбору геотермальної енергії.
20. Назвіть переваги та недоліки у використанні теплових насосів.

Література

1. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних і нетрадиційних джерел енергії України / НАН України, Інститут відновлюваної енергетики, Держ. ком. України з енергозбереження. – К., 2005. – 45 с.
2. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://saee.gov.ua/uk/ae/termo-energy>.
3. Рей Д. Тепловые насосы : пер. с англ. / Д. Рей, Д. Макмайкл. – М. : Энергоиздат, 1982. – 224 с.
4. 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.
5. Європейський ринок теплових насосів в 2014 році. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://сахара.ua/informaciya/statti/jevropejskij-rinok-teplovih-nasosiv-v-2014-rotsi>.
6. Heat pumps on the rise – time to move to system integration! [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.ehpa.org/about/news/article/heat-pumps-on-the-rise-time-to-move-to-system-integration>.
7. Снежкін Ю. Ф. Енергоефективні теплонасосні технології: стан і перспективи впровадження в Україні. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://old.minregion.gov.ua/attachments/content>.
8. Принцип дії теплового насоса. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.siriusone.net/index.php?action=page&page_id=118.
9. Тепловий насос – технологія, що постійно змінюється. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://сахара.ua/ru/informaciya/statti/teplovij-nasos-tehnologija-scho-postijno-rozvivajetsja>.
10. Климатическая техника будущего : магнит вместо компрессора. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.tehnoclimate.com.ua/vse_novosti/novosti_kompanii/klimaticheskaya_tehnika_buduwego_magnit_vmesto_kompressora/.
11. European Heat Pumps Association. Market and statistics report. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.ehpa.org/market-data/>.
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. 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.

9. ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ВІТРУ

9.1. Потенціал вітрової енергетики

Вітроенергетика – галузь відновлюваної енергетики, яка спеціалізується на перетворенні кінетичної енергії вітру в електричну енергію.

Вітер як джерело енергії є непрямую формою сонячної енергії, тому належить до відновлюваних джерел енергії. Атмосфера Землі вбирає сонячну радіацію нерівномірно, так як кут падіння сонячних променів на її поверхню змінюється, залежно від широти та пори року. Повітря при нагріванні розширюється та підіймається догори, утворюючи спрямовані потоки повітряних мас. Там де повітря нагрівається більше, ці потоки підіймаються вище та зосереджуються у зонах низького тиску, а холодніше повітря опускається нижче, створюючи зони високого тиску. Різниця атмосферного тиску змушує повітря пересуватися від зони високого тиску до зони низького тиску з пропорційною швидкістю. Загалом, від 1 до 2 % від усієї сонячної енергії, що надходить до поверхні, перетворюється на енергію вітру.

Таким чином, головними факторами, що визначають циркуляцію атмосфери у глобальному масштабі, є різниця у нагріві повітря Сонцем між екваторіальними і полярними районами, що викликає різницю у температурі та, відповідно, густині повітря, а тому й різницю тиску, а також ефект Коріоліса. Щоб найкраще використати енергію вітру, важливо досконало розуміти добові та сезонні зміни напряму та сили вітрів, зміну швидкості вітру в залежності від висоти над поверхнею землі, кількість поривів вітру за короткі проміжки часу, а також статистичні дані за декілька років.

Найпершим винаходом, що використовує енергію вітру, вважається вітрило. Перше згадування про вітряний млин у Європі, спочатку у Франції, належить до початку XII століття. Це були млини з горизонтальною віссю обертання.

В останні роки енергія вітру все більше використовується для одержання електроенергії. Створюються вітряки великої потужності і встановлюються на місцевості, де дмуть часті й сильні вітри. Кількість і якість вітродвигунів у розвинених країнах Світу зростає щорічно (рис. 9.1). За різними оцінками, щорічні темпи зростання складають від 25 до 50 %. Значні темпи розвитку вітроенергетики пояснюється тим, що їй властиві найменші питомі капіталовкладення в порівнянні з іншими видами відновлюваних джерел енергії. Сьогодні вітроенергетика використовується більш ніж у 30 країнах. Світовими лідерами із застосування енергії вітру є Китай, США, Німеччина, Індія (рис. 9.2).

У багатьох країнах виникла нова галузь – вітроенергетичне машинобудування. Очевидно, і в найближчій перспективі вітроенергетика збереже свої передові позиції. На це вказує динаміка зростання потужностей вітроелектростанцій (ВЕС) країн-лідерів. Так, упродовж 2015 року тільки Китай наростив потужності на 48,5 %, США – на 13,5 %, а Німеччина – на 9,5 %.

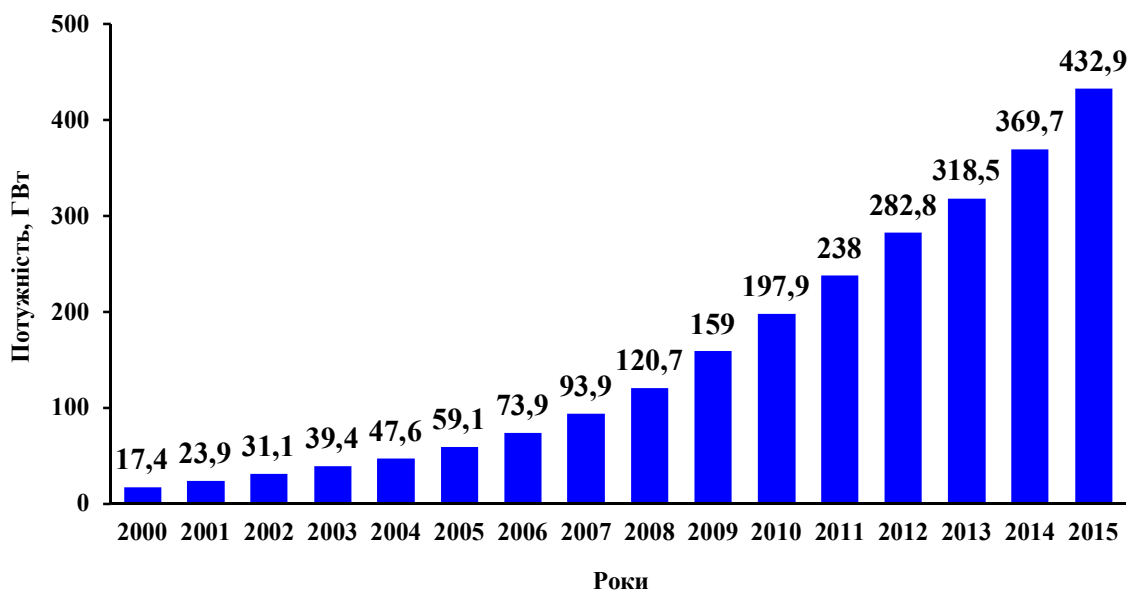


Рис. 9.1. Динаміка потужності Світової вітроенергетики
(<http://www.gwec.net/>)

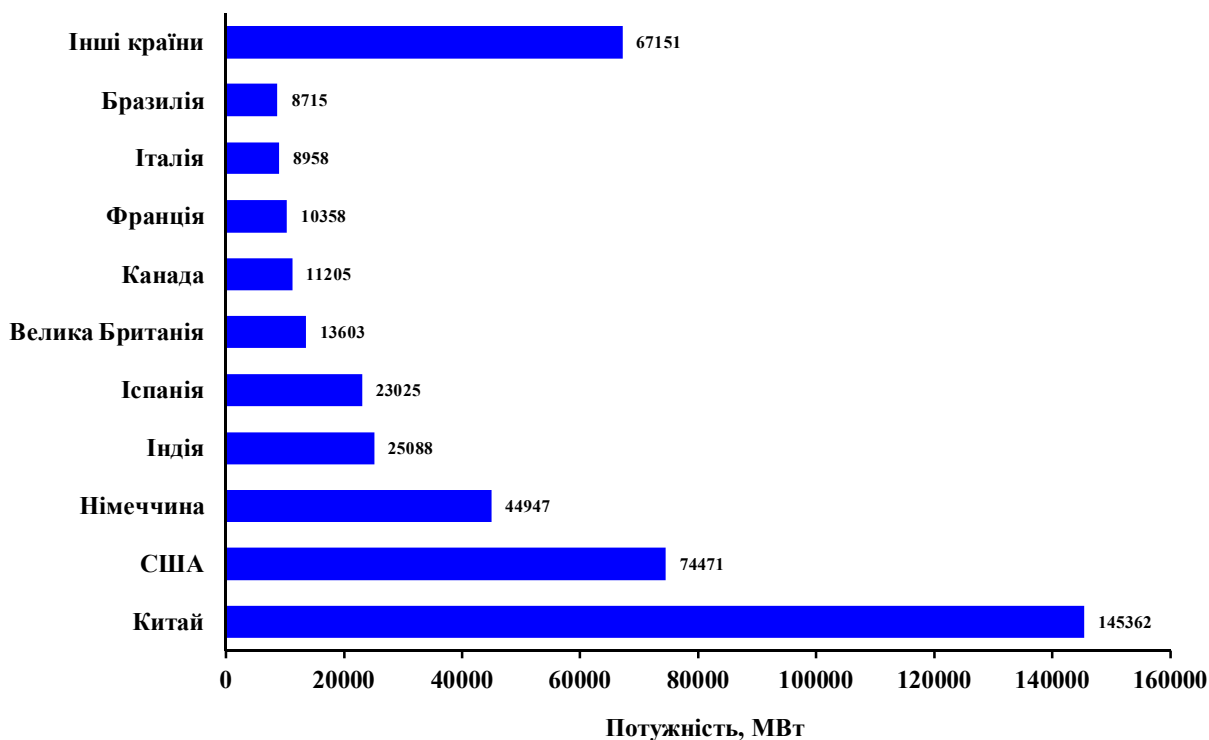


Рис. 9.2. Встановлена потужність вітроенергетики передових країн Світу станом на кінець 2015 року
(<http://www.gwec.net/>)

Процес становлення української вітроенергетики розпочався у 1996 році, коли була введена Новоазовська ВЕС проектною потужністю 50 МВт, у 1997 році запрацювала Трускавецька ВЕС. У 2000 році в Україні працювало вже 134

вітротурбіни. Значне зростання впровадження ВЕС спостерігається починаючи з 2009 року, коли Уряд України ввів у дію «зелений» тариф на відновлювану енергетику. Станом на початок 2015 р. в Україні встановлена потужність вітроелектростанцій складає 513,9 МВт (з врахуванням 87,8 МВт на тимчасово окупованій території АР Крим), що становить 0,93 % від загального обсягу генеруючих електроенергію потужностей країни та 46 % потужності об'єктів відновлюваної енергетики (рис. 9.3).

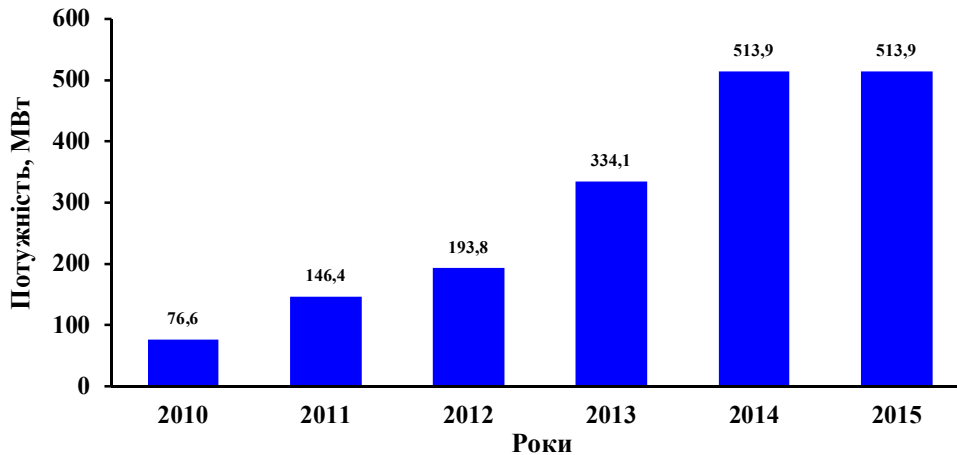


Рис. 9.3. Динаміка становлення вітроенергетики України
(<http://saee.gov.ua/>)

Інститутом відновлюваної енергетики НАН України складена карта вітроенергетичного потенціалу нашої країни (рис. 9.4).

Найбільш привабливими регіонами для використання енергії вітру (рис. 9.4) є узбережжя Чорного та Азовського морів, гірські райони тимчасово окупованої АР Крим, територія Карпатських гір, Одеська, Херсонська та Миколаївська області. Зі збільшенням висоти зростає кінетична енергія повітряного потоку та, відповідно, обсяги генерації електроенергії ВЕС.

За оцінками експертів Української вітроенергетичної асоціації (УВЕА) біля 7 тис. кв. км території країни має вітроенергетичний потенціал для масштабних вітроенергетичних проєктів, де вітер розвиває середню швидкість більше 5 м/с. А для малої вітроенергетики достатньо швидкості вітру від 4 до 4,5 м/с, що покриває значно більші площі.

Технічний потенціал вітрової енергії регіону – це сумарна електрична енергія, яка може бути отримана в регіоні від використання валового потенціалу вітрової енергії (W_B) при сучасному рівні розвитку технічних засобів і дотриманні екологічних норм.

Технічний потенціал залежить від параметрів вітроенергетичної установки, середньорічної швидкості вітру в зоні на висоті оголовка, а також частини площі зони, придатної для спорудження установки, може бути визначений за формулою:

$$W_T = W_B c_p \eta_{\text{ген}} \eta_{\text{мех}} \frac{S_T}{S}, \quad (9.1)$$

де: c_p – коефіцієнт використання енергії вітру, залежить від типу вітроустановки; $\eta_{\text{ген}}$ – ККД генератора вітроустановки, $\eta_{\text{ген}}=0,90-0,98$; $\eta_{\text{мех}}$ – ККД редуктора вітроустановки, $\eta_{\text{мех}}=0,70-0,85$; S_T – площа зони (регіону) на якому з урахуванням технічних і екологічних обмежень можливе розміщення вітроустановок, приймається на рівні від 10 до 30 % всієї площі S зони (регіону).

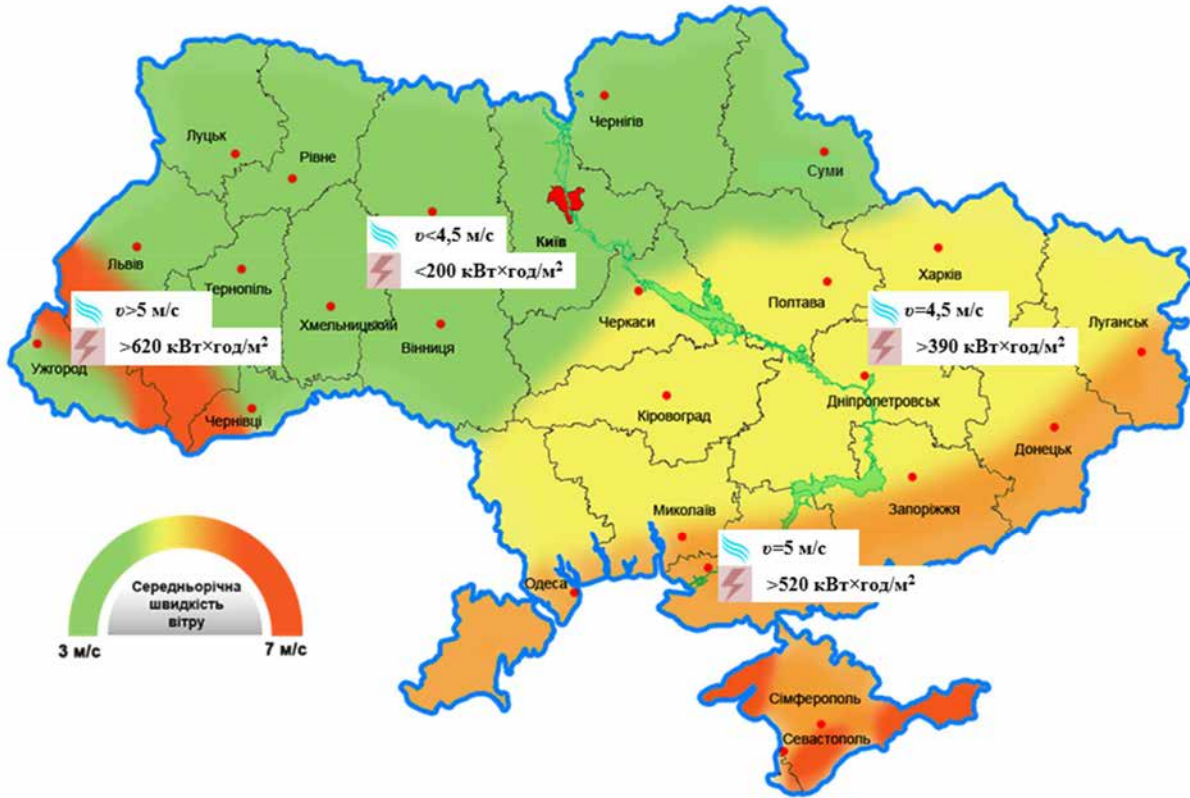


Рис. 9.4. Технічно-можлива річна генерація енергії (⚡) ВЕС за умови середньої швидкості вітру (🌀) на висоті 10 м відповідного регіону (<http://www.ive.org.ua/>)

Валовий (теоретичний) потенціал вітрової енергії регіону – це частина середньорічної сумарної вітрової енергії, яка доступна для використання на площі регіону (S), визначається за формулою:

$$W_B = E_B \frac{S}{20} = \frac{1}{20} \rho T S \sum_{i=1}^n v_i^3 t_i, \quad (9.2)$$

де: E_B – валова кінетична енергії вітру в регіоні; ρ – щільність повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$; v_i – значення i -тої швидкості повітряного потоку, $\text{м}/\text{с}$; t_i – повторюванність i -тої швидкості повітряного потоку, с ; T – тривалість року, с .

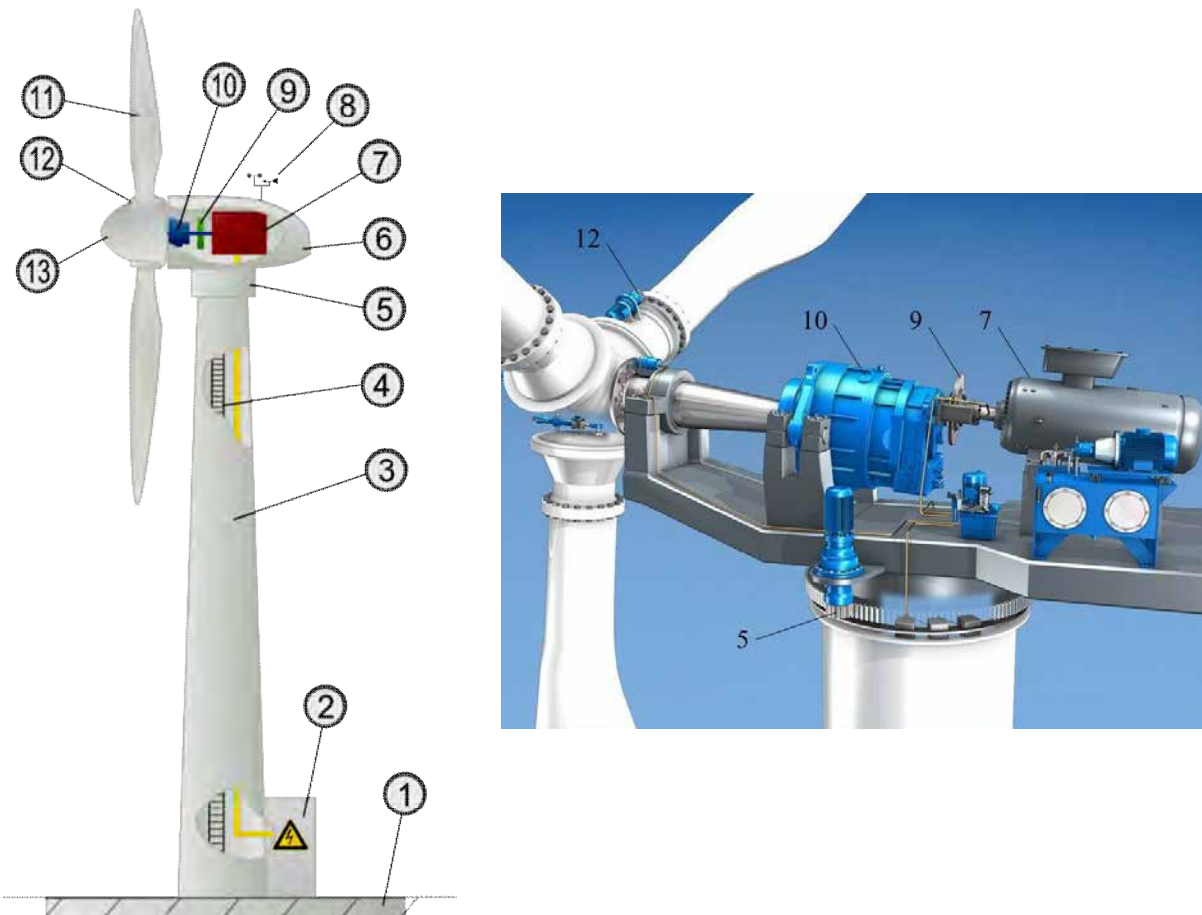
За даними Міжгалузевого науково-технічного центру вітроенергетики Національної академії наук України, територія нашої країни має значні ресурси вітрової енергії, які оцінюються у 30 ТВт год./рік. Загальний вітровий потенціал нашої країни досягає відмітки від 16 до 24 ГВт потужності (дані Всесвітньої асоціації вітроенергетики), що перевищує діючі показники Великої Британії.

9.2. Технічні засоби перетворення кінетичної енергії вітру

Вітрогенератор – пристрій що перетворює кінетичну енергію вітру на електричну енергію. В загальному, вітрогенератор складається з вітрової турбіни (вітрове колесо), електрогенератора та допоміжного обладнання.

За конструкцією вітрогенератори поділяються на апарати з горизонтальною та вертикальною віссю вітрової турбіни.

Вітрогенератори із горизонтальною віссю (паралельно потоку вітру) обертання вітрового колеса є найбільш поширеними (рис. 9.5) за рахунок високого значення коефіцієнта використання енергії вітру ($c_p=0,46-0,48$) та відносно малих динамічних навантажень.



1 – фундамент; 2 – силова шафа; 3 – вежа; 4 – сходи; 5 – поворотний механізм; 6 – гондола; 7 – електричний генератор; 8 – система контролю напрямку та швидкості вітру; 9 – гальмівна система; 10 – трансмісія; 11 – лопаті; 12 – система зміни кута атаки; 13 – ковпак ротора.

Рис. 9.5. Будова вітрогенератора з горизонтальною віссю турбіни

Коефіцієнт використання енергії вітру (c_p) характеризує співвідношення між енергією повітря за турбіною та кінетичною енергією повітря перед турбіною, який, відповідно до закону А. Беца (1919 р.), не може перевищувати граничне значення – 0,593. Таку величину коефіцієнта називають

теоретичним ККД ідеального вітрового колеса. Дійсне значення коефіцієнта c_p розраховують за формулою:

$$c_p = \frac{1}{2v_1^3}(v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2), \quad (9.3)$$

де: v_1 – швидкість набігаючого повітряного потоку, м/с; v_2 – швидкість повітряного потоку за турбіною, м/с.

Таким чином, має існувати оптимальне співвідношення швидкостей потоку повітря перед ротором і за ротором, при якому відбувається максимальне перетворення енергії вітру в механічну енергію обертання ротора вітрогенератора. Встановлено, що максимальний ККД вітрогенератора досягається, коли швидкість повітря за турбіною в три рази нижче швидкості повітря перед турбіною ($v_2=1/3 v_1$).

Потужність вітрогенератора визначається за формулою:

$$P_B = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 c_p \eta_{\text{ген}} \eta_{\text{мех}}, \quad (9.4)$$

де: v – швидкість повітряного потоку, м/с; R – радіус вітрової турбіни, м.

Підвищити ступінь використання енергії вітру можна шляхом оптимізації профілів лопатей вітрової турбіни, в наслідок чого збільшується крутний момент на ведучому валу трансмісії приводу генератора за рахунок зростання піднімальної сили лопатей.

Вітрогенератори з горизонтальною віссю мають наступні недоліки:

- необхідність у додатковому пристрої орієнтації за напрямком вітру;
- наявність високої шогли (мінімальна висота має бути у двічі більшою за радіус вітрового колеса).

В порівнянні з вертикально-осьовими, вітрогенератори з горизонтальною віссю мають наступні переваги:

- можливість самостійного пуску без допоміжного приводу за рахунок зміни кута установки лопатей;
- більшого значення коефіцієнта використання енергії вітру;
- більшого значення коефіцієнта швидкохідності і, як наслідок цього, велику частоту обертання ротора, що дозволяє зменшити масогабаритні показники електромеханічного обладнання;
- виключення необхідності в кутовій передачі обертального моменту.

До апаратів з горизонтальною віссю належать, також, так звані вітрильні турбіни, в яких лопаті є подібними до вітрил. Такі турбіни характеризуються значно меншим коефіцієнтом використання енергії вітру, але можуть працювати в умовах слабких вітрів, що досягається значною площею встановлених лопатей.

Вітрогенератори з вертикальною віссю (перпендикулярною до потоку вітру) обертання ротора ефективно використовуються на місцевостях із частими змінами напрямку вітру. У загальному випадку для вітродрвигуна в якості активної поверхні, що сприймає енергію вітрового потоку, на практиці використовують такі основні види роторів (рис. 9.6): ротор Савоніуса; турбіна

Дар'є; ортогональний Н-ротор Дар'є (ротор Еванса); гелікоїдний ротор Дар'є (турбіна Горлова).



Рис. 9.6. Типи роторів вітрогенератора з вертикальною віссю

Ротор Савоніуса названо на честь його винахідника – фінського інженера Сигурда Савоніуса (1929 р). Складається ротор із щогли та, як правило, двох лопатей у формі порожнистих напівциліндрів зміщених відносно один одного таким чином, що утворюють суцільну опукло-увігнуту геометричну форму. Принцип роботи базується на використанні різниці опорів, що виникають при одночасному обтіканні повітряним потоком увігнутої та опуклої поверхні ротора. За рахунок цього має незначний коефіцієнт використання енергії вітру $c_p=0,15-0,20$.

Особливість геометрії ротора полягає в тому, що він завжди орієнтований на вітер, тому не потребує додаткових пристроїв орієнтації та адаптований до турбулентності. До переваг ротора належить, також, великий початковий обертовий момент та низька початкова швидкість повітряного потоку. Тому його часто використовують як пусковий вітродвигун для інших типів вертикально-осьових роторів.

У 1931 році французький авіаконструктор Жорж Дар'є (George Darrieus) запропонував власну конструкцію вітродвигуна з вертикальною віссю обертання – **ротор Дар'є**. Ротор має симетричну конструкцію, складається із двох та більше аеродинамічних крил радіального типу. Крутний момент формується завдяки різному опору увігнутої та випуклої частин ротора. На кожне з крил діє підйомна сила, величина якої залежить від кута між вектором швидкості потоку повітря та миттєвої швидкості крила. Максимального значення підйомна сила досягає при ортогональності (перпендикулярності) даних векторів. З огляду на те, що вектор миттєвої швидкості крила циклічно змінюється в процесі обертання, момент сили, що створюється ротором, також є змінним. Коефіцієнт використання енергії вітру значно вищий і досягає величини $c_p=0,30-0,35$.

Дволопатевий ротор Дар'є почати обертатися самостійно не може, тому для його запуску використовується або генератор в режимі електродвигуна, або спеціальний двигун (наприклад, ротор Савоніуса). Необхідність мати незалежне джерело живлення для запуску ротора істотно знижує можливості поширення даного типу вітрогенераторів. У разі застосування трьох і більше лопатей проблема самопуску ротора менш відчутна. Існують модифікації ротора з керованим кутом атаки лопатей турбіни, що спрощує його самопуск.

Недоліком конструкції ротора Дар'є є високі динамічні навантаження та помітний шум. Вітроколесо Дар'є характеризується високим значенням крутного моменту за рахунок великого геометричного заповнення простору між крилами, що належить до його неодмінних переваг.

Н-ротор (ротор Еванса) є модифікованим варіантом ротора Дар'є. Обертаний момент на приводному валу створюється підйомною силою двох (може бути три, чотири) вертикально розташованих лопатей з аеродинамічним профілем. Для запуску Н-ротора також потрібна зовнішня розкрутка, а для зупинки достатньо повернути лопаті на 90° навколо їх вертикальних осей.

Із-за меншої охоплюваної поверхні, Н-ротор має трохи менший коефіцієнт використання енергії вітру ($c_p=0,30$) порівняно із ротором Дар'є, але вищий ніж для ротора Савоніуса.

Гелікоїдний ротор (турбіна Горлова) є найбільш досконалою модифікацією ротора Дар'є, конструкція якого вирішує основну проблему ортогональних роторів – нерівномірність обертання. Це досягається за рахунок спіралевидних лопатей, що виготовлені у формі крила літака, тому ротор обертається тільки в одному напрямку. Перевагою гелікоїдного ротора є значно нижчі динамічні навантаження на опорні вузли приводного вала. За рахунок спіралевидної форми лопатей швидкість обертання турбіни у два рази вища за швидкість потоку повітря. Внаслідок цього збільшується коефіцієнт використання енергії вітру, який найвищий серед усіх типів вертикально-осьових роторів ($c_p=0,4$). До недоліків гелікоїдного ротора належить складність виготовлення спіралевидних лопатей та, як наслідок, значна їх вартість.

Серед вертикальних вітродвигунів карусельного типу найбільш поширеним є **ротор Масгроува** (Musgrove). Обертаний момент дволопатевого ротора створюється за допомогою підйомної сили. Лопаті мають аеродинамічний профіль і в початковий стартовий момент розташовані вертикально, тобто паралельно осі обертання (рис. 9.7, а). При зростанні швидкості вітру зростає і швидкість обертання, тому за рахунок дії відцентрових сил лопаті починають складатися, що спричиняє зменшення охоплюваної площі. За умови максимальної розрахункової швидкості вітру вітроколесо зупиняється оскільки лопаті повністю складаються. (рис. 9.7, б).

Як і всі різновиди роторів Дар'є, ротору Масгроува для запуску необхідно надати початковий обертальний момент.

Потужність, яку генерує вітроенергетична установка (ВЕУ) з вертикально-осьовим ротором визначається за формулою:

$$P_H = \frac{1}{2} \rho A_0 v^3 c_p \eta_{\text{ген}} \eta_{\text{мех}}, \quad (9.5)$$

де: A_0 – площа обвідної лопатями ротора поверхні, м^2 .

Для Н-ротора, площа обвідної поверхні ротора визначається за формулою:

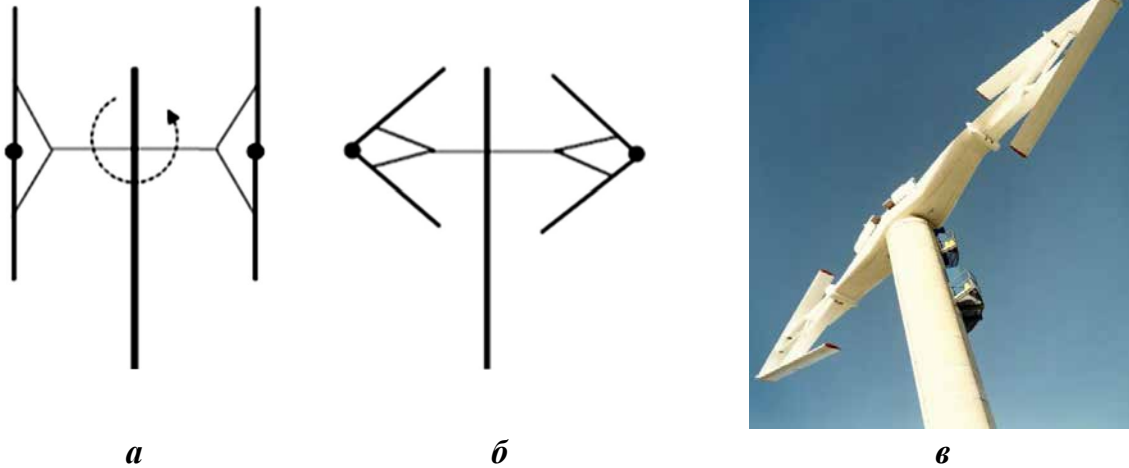
$$A_0 = 2HR, \quad (9.6)$$

де: H – висота лопатей, м ; R – радіус траєкторії руху лопатей, м .

Оскільки для вертикально-осьових роторів присутній додатковий зустрічний опір на обертання, коефіцієнт використання енергії вітру визначається наступним чином:

$$c_p = 2c_x \left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right)^2 \frac{v_2}{v_1}, \quad (9.7)$$

де: v_1 – швидкість набігаючого повітряного потоку, м/с ; v_2 – швидкість повітряного потоку за турбіною, причому $v_2 = 1/3 v_1$, м/с ; c_x – коефіцієнт опору ротора, приймається $c_x = 0,65$.



a – лопаті паралельно осі; *б* – лопаті складені; *в* – загальний вигляд
Рис. 9.7. Вітрогенератор з ротором Масгроува

Ортогональні вертикально-осьові вітродвигуни, у порівнянні з пропелерними горизонтально-осьовими, наділені такими перевагами:

- незалежність функціонування від напрямку вітрового потоку, що усуває необхідність орієнтування вітродвигуна на цей напрямок;

- можливість розміщувати електромеханічне обладнання біля основи опори, що знижує вимоги до її міцності і жорсткості, спрощує технічне обслуговування та ремонт;

- можливість кріплення лопатей до ротора в декількох місцях, що знижує вимоги по міцності і жорсткості лопаті;

- менше значенням окружної швидкості лопаті за меншої величини коефіцієнта швидкохідності;

- відносна простота виготовлення лопатей більшості типів роторів.

До недоліків вертикально-осьових вітрогенераторів слід віднести:

– набагато більша схильність до утомливих руйнувань, через досить часті автоколивальні процеси;

– пульсація крутного моменту, що призводить до пульсацій потужності та інших параметрів генераторів;

– обмеження потужності до 5 МВт для вітрогенераторів з роторами типу Дар'є та Н-ротора із-за значного перевантаження підп'ятника-підшипника головного валу. Цей недолік обмежує зростання потужності вертикально-осьових вітрогенераторів, хоча ВЕУ невеликої потужності успішно експлуатуються.

– менший коефіцієнт використання енергії вітру.

Конкурувати з кращими на сьогодні горизонтально-осьовими вітрогенераторами можуть лише ротори Дар'є. Вони порівняно прості за конструкцією, не вимагають додаткових механізмів орієнтації на вітер і обмеження потужності, що розвивається, при швидкостях, які перевищують розрахункові. Крім того, при використанні таких ВЕУ для роботи в енергосистемах простіше вирішується завдання створення машин мегаватного класу.

9.3. Ефективність використання вітрогенераторів

Швидкохідність вітрогенератора, поряд із коефіцієнтом використання енергії вітру, є найважливішим параметром, що визначає основні конструкційні рішення стосовно вітротурбін. Коефіцієнт швидкохідності (Z) залежить від діаметра вітрової турбіни, швидкості її обертання та швидкості потоку повітря, визначається за формулою:

$$Z = \frac{R\omega}{v_l} \approx \frac{4\pi}{N}, \quad (9.8)$$

де: v_l – швидкість набігаючого повітряного потоку, м/с; N – кількість лопатей, шт.; ω – кутова швидкість вітотурбіни, с⁻¹.

Отже, умовою максимально можливого «знімання» енергії вітру є підтримання коефіцієнта c_p в зоні найбільшого значення, тобто необхідно забезпечити постійним значення швидкохідності. Згідно залежності (9.8) при зменшенні швидкості вітру (v_l) необхідно знизити число оборотів вітроколеса (ω) і навпаки.

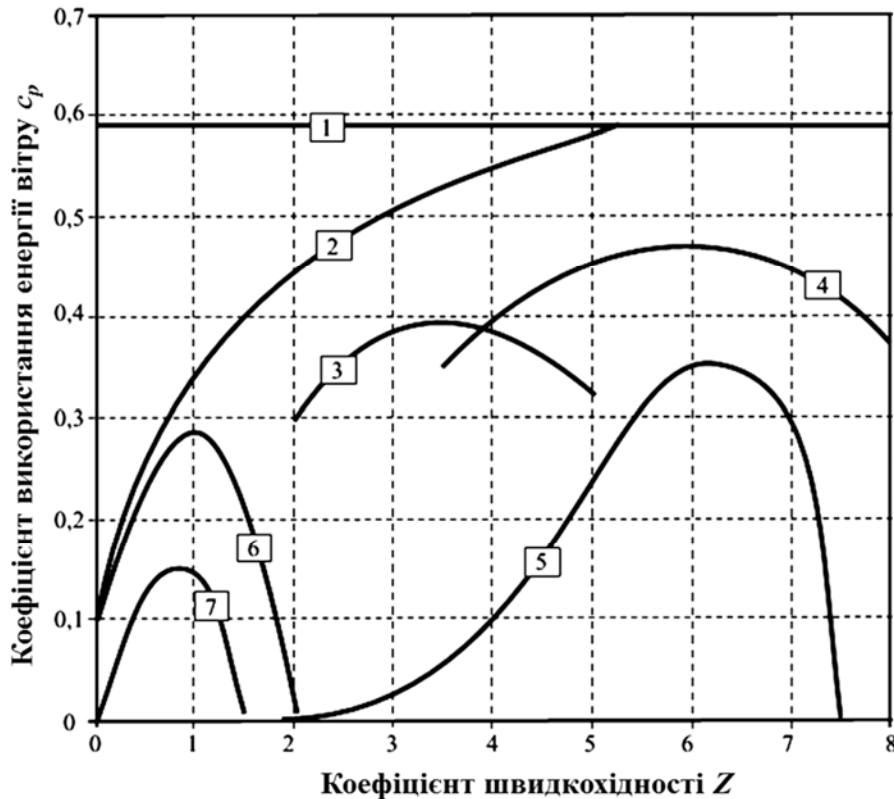
В залежності від значення коефіцієнта швидкохідності, вітрові двигуни поділяють на:

– тихохідні, з коефіцієнтом швидкохідності $Z < 1,5$, вони мають ротор з великою кількістю лопатей (від 12 до 40) та відрізняються великим пусковим моментом;

– середньошвидкісні, коефіцієнт швидкохідності яких знаходиться в діапазоні від 1,5 до 3,5, вітроколесо має від 4 до 7 лопатей;

– швидкохідні, у яких коефіцієнт швидкохідності вищий за величину 3,5, ротори виконані у вигляді авіаційного пропелера з трьома, двома або однією лопаттю, характеризуються невеликим пусковим моментом.

Залежність між коефіцієнтом використання енергії вітру (c_p) та швидкохідністю (Z) дозволяє досить однозначно робити висновок про можливості вітроколiс різних конструкцій щодо ефективності використання енергії вітру (рис. 9.8).



1 – критерій Беца; 2 – критерій Глаурта (ідеальний пропелер); 3 – трилопате вітроколесо; 4 – дволопате вітроколесо; 5 – ротор Дар'є; 6 – багатолопате вітроколесо; 7 – ротор Савоніуса.

Рис. 9.8. Залежність коефіцієнта використання енергії вітру (c_p) від коефіцієнта швидкохідності (Z) (Г. Півняк та ін.)

У роботі вітроустановки можна виділити два граничні режими:

- режим з постійним коефіцієнтом швидкохідності Z і, отже, з постійним коефіцієнтом використання енергії вітру c_p ;
- режим з постійною частотою обертання вітроколеса і, отже, зі змінним коефіцієнтом c_p .

При перевищенні швидкості вітру деякої номінальної величини починає діяти фактор обмеження потужності, тому вітроустановку необхідно примусово вводиться в режим зниження коефіцієнта c_p . Ось чому в більшості сучасних вітрогенераторів віддають перевагу вітроколесам зі змінною швидкістю обертання в досить широкому діапазоні.

Існує три основних принципи ефективного впровадження вітроелектричних станцій які формують наступні схеми: паралельна робота з мережею; автономна робота; пряме перетворення електричної енергії в теплову.

Паралельна робота з мережею. У цьому випадку електрична енергія, яку виробляє ВЕС, має відповідати вимогам якості електричної енергії у мережі. Мережа, у свою чергу, повинна мати можливість прийняти потужність від ВЕС (пропускна здатність ЛЕП, наявність відповідних лічильників електроенергії тощо) та вчасно реагувати на зміну її кількості (рис. 9.9).

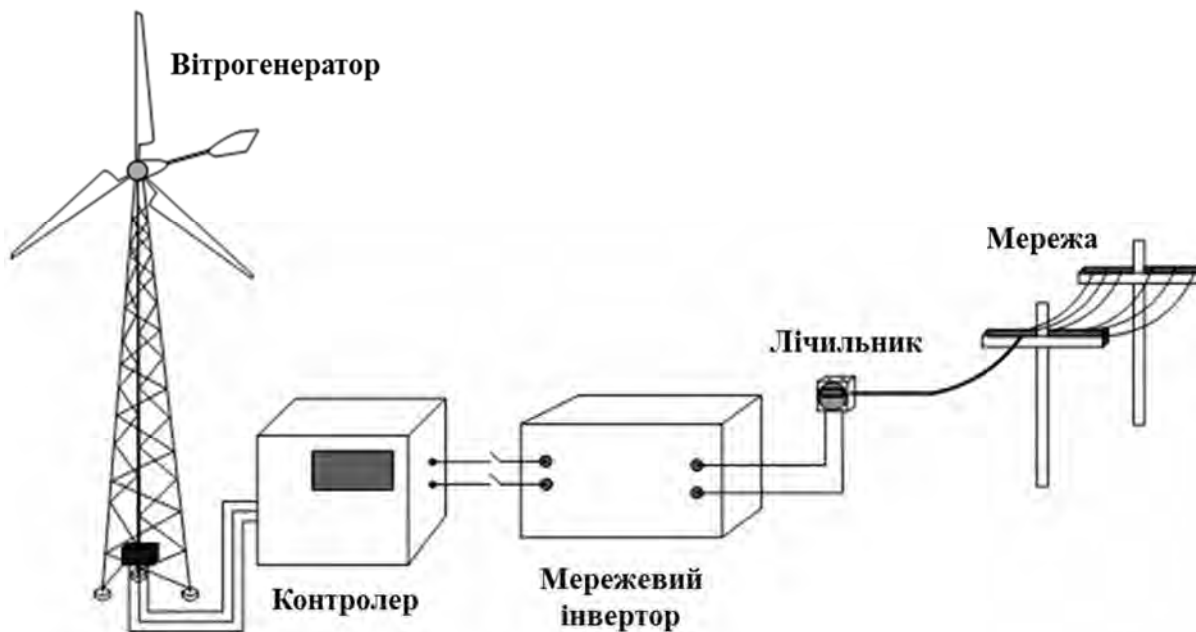


Рис. 9.9. Схема паралельної роботи вітрогенератора

Вітрогенератор перетворює механічну енергію повітряних потоків у електричну, виробляючи змінний електричний струм. Контролер призначений для перетворення змінного електричного струму в постійний, а інвертор забезпечує перетворення постійного струму в змінний промислової частоти (50 Гц) та напруги (220/380 В), що подається мережею до споживача. В умовах надлишку виробленої електроенергії мережевий інвертор дозволяє віддавати її в мережу, а в разі відсутності вітру використовувати енергію електромережі. Перемикання режимів здійснюється в автоматичному режимі. Контроль вироблення і споживання враховується спеціальними пристроями обліку (електричний лічильник). За такою схемою працюють найбільш стрімко зростаючі станції які дозволяють продавати електроенергію до мережі за «зеленим» тарифом.

Автономна робота ВЕС передбачає встановлення акумуляторних батарей, які призначені для накопичення електричної енергії, що виробляється вітрогенератором за сприятливих погодних умов. Наявність акумуляторів значно збільшує загальну вартість системи. Встановлювати автономну систему найбільш доцільно в поєднанні з фотоелектричним модулем (рис. 9.10).

Вітрогенератор з накопиченням електроенергії в акумуляторах може працювати паралельно з мережею. Паралельна робота здійснюється за допомогою пристрою АВР (автоматичне введення резерву). АВР дозволяє перемикати живлення об'єкту за відсутності вітру і повному розряді

акумуляторів на електромережу або навпаки, перемикає навантаження на акумуляторні батареї при втраті живлення від електромережі.

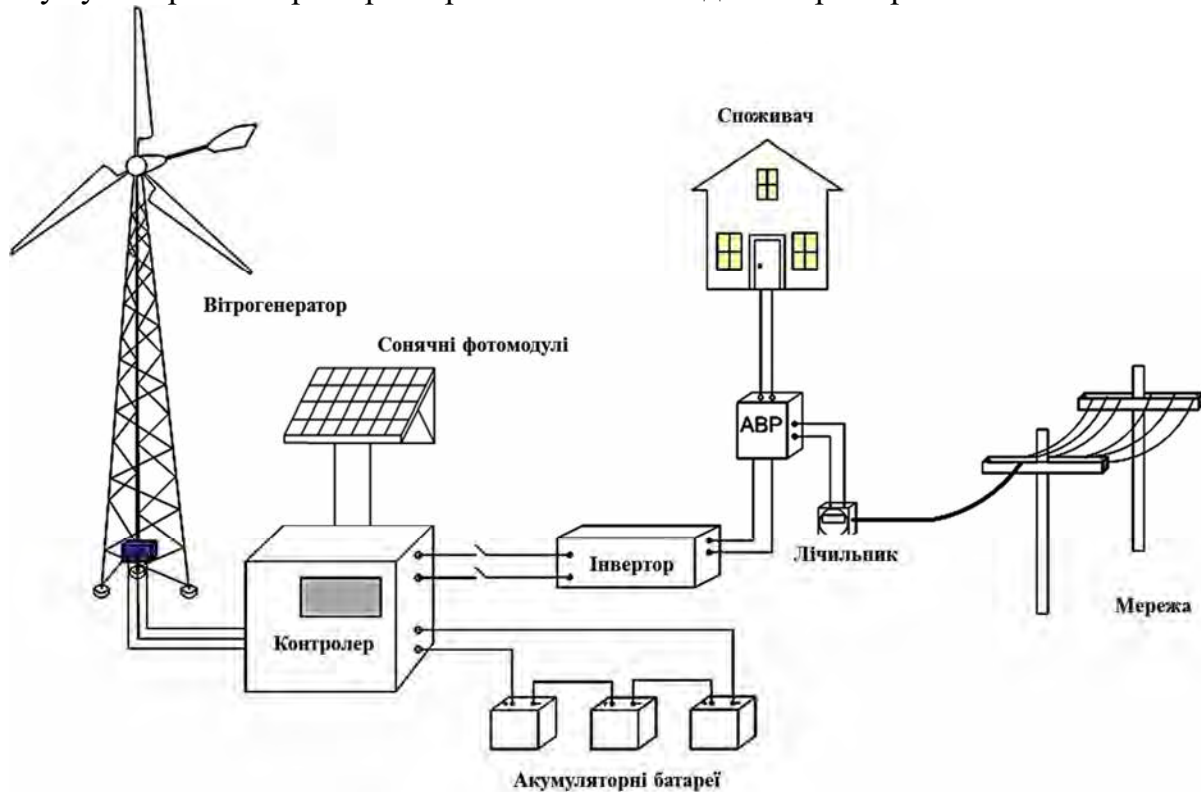


Рис. 9.10. Схема комбінованої роботи вітрогенератора

Вітро-сонячні (гібридні) системи електропостачання особливо ефективні для цілорічного автономного електропостачання. Ці системи являють собою станції на базі вітрогенераторів і фотоелектричних модулів приєднаних до єдиної енергосистеми. Продуктивність фотоелектричних батарей досить висока влітку і відносно низька взимку. У свою чергу, забезпечення електроенергією, що отримана за рахунок енергії вітру, в літній час є проблематичним через часті безвітряні дні. Тому переваги гібридної системи «вітер-сонце» стають очевидним.

Пряме перетворення електричної енергії в теплову. Електрична енергія, що виробляється ВЕС, перетворюється в теплову шляхом нагрівання об'єму води електричними ТЕНами. Тобто акумулятором тепла є вода. Таку схему можна використовувати для попереднього нагрівання води в системі гарячого водопостачання. Основним недоліком при цьому є несталість та нерегульованість вітрового потоку.

Вибір тієї чи іншої системи залежить від конкретних умов експлуатації та тими завданнями на реалізацію яких вона призначена. Як правило намагаються максимізувати виробництво електричної енергії упродовж року для зменшення, наприклад, споживання палива тепловими електростанціями єдиної енергосистеми, або прагнуть забезпечити виробництво необхідного мінімуму електричної енергії, навіть при слабкому вітрі, щоб, наприклад, підтримувати працездатність насосів системи водопостачання.

9.4. Екологічні та економічні аспекти використання вітроелектростанцій

Думка про те, що виробництво електроенергії за рахунок відновлюваних джерел належить до екологічно чистих способів не в повній мірі відповідає дійсності. Дані джерела енергії володіють принципово іншим спектром впливу на навколишнє середовище в порівнянні з традиційними енергоустановками. Певні види екологічного впливу нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії на навколишнє середовище не достатньо вивчені до теперішнього часу, особливо в часовому вимірі, а тому потребують детального опрацювання.

У загальному випадку вітроенергетика дозволяє зменшити ступінь вторгнення у довкілля:

- відпадає потреба у будівництві шахт (добування вугілля), бурінні свердловин (добування природного газу та нафти), прокладанні трубопроводних магістралей і т. д.;

- відсутнє забруднення емісією вуглекислого газу, важкими металами та іншими шкідливими речовинами в наслідок спалювання викопного палива;

- відсутнє теплове забруднення (скидання теплої води із системи охолодження атомних та теплових електростанцій);

- відпадає потреба змінювати екосистему шляхом затоплення значних територій, зміни напрямку течій річок і т. д.

Робота вітрогенератора потужністю 1 МВт упродовж 20 років дозволяє заощадити приблизно 29 тис. тонн вугілля або 92 тис. барелів нафти. Застосування одного такого генератора щорічно «очищає» атмосферу від 1800 т CO_2 , 9-ти т SO_2 та 4-х т оксидів азоту. За експертними оцінками до 2050 року світова вітроенергетика дозволить скоротити річне забруднення атмосферного повітря вуглекислим газом на 1,5 млрд. тон.

Слід мати на увазі, що вітроенергетика має локальний вплив на навколишнє середовище. Це означає, що ніякі аварійні ситуації на вітроелектростанції не можуть привести до загибелі значної кількості людей тому не мають катастрофічних наслідків, на відміну від атомних електростанцій і гідроелектростанцій з високими греблями.

Основними негативними факторами впливу вітроенергетики на довкілля можна вважати наступні:

- ерозія ґрунту, виникає при спорудженні фундаменту ВЕУ, проведенні будівельно-монтажних робіт, будівництві доріг;

- візуальне вторгнення в ландшафт викликає у прихильників дикої природи супротив щодо зміни природного пейзажу;

- загроза загибелі птахів – фізичний вплив ВЕУ при зіткненні з турбінами, лопатями і вежами, порушення середовища проживання, порушення маршруту міграції птахів;

- акустичний і звуковий шум під час роботи вітроенергетичних установок, особливо згубним є інфразвукове випромінювання;

– негативний вплив на роботу теле-, радіо і навігаційних пристроїв, викликаний відбиванням електромагнітних хвиль лопатями вітрових турбін, що позначається на якості телевізійних та радіопередач, а також на роботоздатності різних навігаційних систем у районі розміщення вітрового парку ВЕС на відстані декількох кілометрів;

– перешкоди повітряному транспорту, аналогічно високим будівлям і спорудам, що викликає потребу у нанесенні на карту локацій ВЕУ.

Вартість виробленої на ВЕС електроенергії залежить насамперед від її обсягу, який в свою чергу визначається величиною середньорічної швидкості вітру, витратами на обслуговування та експлуатацію, терміном служби вітроустановки, ставкою за кредит, а також залежить від величини капітальних вкладень. Так, за даними США, собівартість електричної енергії ВЕС становить від 4,8 до 4,9 цента/кВт год. при швидкості вітру 7 м/с, від 3,6 до 3,7 цента/кВт год. при швидкості вітру 8 м/с і від 2,5 до 2,6 цента/кВт год. при швидкості вітру 9,5 м/с, тоді як собівартість електроенергії виробленої на вугільних електростанціях становить від 4,5 до 6 цента/кВт год.

Отже, продуктивність вітроелектростанції залежить від сили вітру – фактора, що відрізняється великою мінливістю. Відповідно, подавання виробленої вітрогенератором електроенергії в енергосистему відрізняється великою нерівномірністю як в добовому, так і в тижневому, місячному, річному і багаторічному розрізі. Враховуючи, що енергосистема сама має неоднорідності навантаження (піки і провали енергоспоживання), регулювати які вітроенергетика, природно, не може, введення значної частки вітроенергетики в енергосистему сприяє її дестабілізації.

Дана особливість вітроенергетики істотно здорожує вироблену електроенергію. Проблеми в мережах і диспетчеризації енергосистем через нестабільність роботи ВЕС вже починаються при досягненні частки в 20–25 % від загальної встановленої потужності енергосистеми.

Слід відзначити як позитивний фактор те, що питомі капітальні витрати і собівартість виробництва електроенергії на ВЕС за останні 25 років суттєво знизилися з 4000 до 1000 дол./кВт потужності вітрогенератора.

Вважається, що застосування вітрогенераторів в побуті для забезпечення електроенергією побутових споживачів є недостатньо доцільним із наступних міркувань:

– необхідність у перетворювачах та синхронізаторах із зовнішньою мережею, вартість яких становить приблизно 50 % вартості всієї установки;

– потреба у додатковому обладнанні (наприклад, бензиновий або дизельний генератор), для забезпечення безперебійного живлення у випадку нестабільного вітру або при відсутності зовнішньої електромережі, та акумуляторних батарей, вартість яких може досягати 25 % вартості ВЕУ.

Слід зазначити, що при збільшенні одиничної потужності ВЕУ питома вартість встановленої потужності ВЕС як правило зменшується. Тому вітрова енергетика залишається найбільш екологічно чистою та економічно виправданою технологією використання відновлюваних джерел.

9.5. Нетипові конструкції вітрогенераторів

Деякі дослідники вказують на обмеженість можливостей у подальшому удосконаленні горизонтально-осьових вітрогенераторів, при тому, що вертикально-осьові вітрогенератори мають більшу конструкційну різноманітність. Але з врахуванням можливих небезпек обертових частин вітрогенераторів, донині йде пошук доцільних конструкцій перетворювачів кінетичної енергії вітру у напрямку зниження техногенного тиску на довкілля та середовище мешкання людей.

Компанія RESA представила вітрову турбіну, яка має чимало відмінностей від традиційних турбін, одна із яких – значна кількість лопатей що формують конічну поверхню (рис. 9.11). Нова турбіна здатна працювати навіть за низькошвидкісного потоку повітря.



Рис. 9.11. Вітрогенератор Eco Whisper Turbine

Найбільшим досягненням компанії стало те, що під час роботи вітрогенератор не видає особливого шуму та вібрацій, і на 30 % ефективніше виробляє енергію, порівняно із конкурентами. На безшумність вітрогенератора вказує його власна назва – Eco Whisper Turbine, що дослівно перекладається як «турбіна екологічного шепоту».

У діаметрі вітряк становить 6,5 м, має 30 лопатей, що виготовлені з алюмінію, висота щогли складає 21,1 м, а потужність приблизно 20 кВт. Зі слів розробників, нова турбіна здатна витримувати швидкості вітру до 220 км/год., а за екстремальних умов погоди її можна скласти.

Компанія «SheerWind» із міста Часка (США) стверджує, що створений ними вітрогенератор «INVELOX» здатен виробити у шість разів більше електроенергії, ніж звичайні вітрогенератори (рис. 9.12).

В основі системи «INVELOX» лежить наступна ідея: широко відкриті розтруби вловлюють вітер і передають його до турбіни, яка розташована на рівні землі. Перед тим, як потрапити до вітрової турбіни, вітер у напрямних каналах збільшує свою швидкість у чотири рази (від 10 миль/год. до 40 миль/год.). Окрім цього, компанія «SheerWind» стверджує, що система може створювати електроенергію при швидкості вітру від 1 миль/год. (0,45 м/с).



Рис. 9.12. Вітрогенератор «INVELOX»

Спеціалісти компанії **Saphon Energy** створили безлопатевий вітрогенератор (рис. 9.13). Вітрогенератор не має лопатей і елементів, котрі крутяться. Зовнішній вигляд нового вітрового генератора нагадує побутову телевізійну супутникову антену – увігнута тарілка. Тарілка повертається до вітру (за допомогою хвостовика) і використовує ефект паруса. Вся площа тарілки сприймає тиск вітрового потоку і перетворює силу вітру в механічний рух (зворотно-поступальний).

Круглий «парус» вітрогенератора розтягнений на круглій рамі, котра вловлює вітер. За рахунок використання повітряних клапанів, парус під дією вітру здійснює коливальний рух. За допомогою системи тяг зусилля передається на поршні гідравлічної системи, яка енергію механічних коливань перетворюється у високий тиск гідравлічної рідини. Гідравлічна рідина віддає свою накопичену енергію електрогенератору.



Рис. 9.13. Вітрогенератор фірми «Saphon Energy»

У конструкції вітрогенератора відсутні складні механічні передачі, коробки швидкостей та інші пристрої, котрі використовуються в традиційних вітроелектростанціях. Відсутність обертових вузлів і механізмів збільшує надійність всієї конструкції та безпеку для птахів. Дослідний зразок має діаметр 1,2 м та генеровану потужність 0,50 кВт.

Голландська **фірма Месапоо** розробила електростатичний вітрогенератор, котрий не має лопатей і рухомих деталей.

У якості джерела та накопичувача енергії тут використовуються краплини води, котрі виходять з горизонтально розміщених сопел. Краплини води позитивно заряджені, і в звичайних умовах притягуються до негативно заряджених електродів або поверхонь. Але за допомогою вітру краплини відносяться до електродів аналогічного заряду, що призводить до збільшення потенційної енергії. Конструктивно генератор має рамку, всередині котрої знаходяться ізольовані трубки. Кожна трубка має сопла і кілька електродів. Кількість виробленої енергії залежить від кількості краплин води, від заряду краплин, від швидкості вітру і сили електричного поля. За таким принципом працює тільки один пристрій, котрий розміщено на території університету, що розробив технологію, в місті Делфт (Delft).

Невпинне генерування нових ідей щодо принципово-нових пристроїв акумулявання енергії вітру викликане тим, що вітроенергетика є найбільш динамічною галуззю відновлюваної енергетики у всьому світі.

Запитання для самоконтролю

1. До якої галузі енергетики належить вітроенергетика?
2. Що є рушійною силою переміщення повітряних мас?
3. Назвіть країну серед лідерів впровадження вітроенергетики.
4. Який рік вважається початком зародження галузі вітроенергетики в Україні?
5. Що таке технічний потенціал вітрової енергії регіону?
6. Що таке валовий потенціал вітрової енергії регіону?
7. Що розуміють під терміном вітрогенератор?
8. Що характеризує коефіцієнт використання енергії вітру (c_p)?
9. Які шляхи підвищення ступеня використання енергії вітру вітрогенератором?
10. Яке оптимальне співвідношення між швидкостями потоку повітря перед ротором і за ним?
11. Які основні недоліки притаманні горизонтально-осьовим вітрогенераторам?
12. Які переваги мають горизонтально-осьові вітрогенератори, порівняно із вертикально-осьовими ?
13. Назвіть основні види роторів вертикально-осьових вітрогенераторів.
14. У чому полягає особливість геометрії ротора Савоніуса?
15. Вкажіть коефіцієнт використання енергії вітру ротором Савоніуса.
16. До якого типу належать крила ротора Дар'є?
17. Що є основним недоліком конструкції ротора Дар'є?
18. Назвіть переваги ротора Дар'є.
19. Чому Н-ротор має менший коефіцієнт використання енергії вітру порівняно із ротором Дар'є?
20. Яка відмінність гелікоїдного ротора від Н-ротора?
21. Які переваги має гелікоїдний ротор?
22. Що належить до недоліків гелікоїдного ротора?
23. Назвіть найбільш поширений ротор карусельного типу, його конструкційні та експлуатаційні особливості.
24. Вкажіть переваги ортогональних вітродвигунів, порівняно із горизонтально-осьовими.
25. Що можна віднести до недоліків вертикально-осьових вітрогенераторів?
26. Від чого залежить величина коефіцієнта швидкохідності вітрогенератора(Z)?
27. Як класифікуються вітрогенератори за швидкохідністю?
28. Які два граничних режими можна виділити у роботі вітроустановки?
29. Які найбільш поширені схеми використання вітроелектричних станцій (ВЕС)?
30. Що належить до позитивних моментів використання вітроенергетики?
31. Назвіть основні негативні фактори впливу вітроенергетики на довкілля.

Література

1. Global wind energy council. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://gwec.net/>.
2. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://sae.gov.ua/>.
3. Інститут відновлюваної енергетики НАН України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.ive.org.ua/>.
4. Основи вітроенергетики : підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков. – Д. : НГУ, 2015. – 335 с.
5. IRENA Renewable energy capacity statistics 2015. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://irena.org/resource>.
6. Перспективи розвитку відновлюваної енергетики в Україні. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://irena.org/remap>.
7. Вітроенергетика України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.uwea.com.ua/>.
8. Кудря С. О. Потенціал використання відновлюваних джерел енергії. Досвід розвинутих країн з питань розвитку відновлюваної енергетики. [Електронний ресурс] / С. О. Кудря. – Режим доступу : <http://www.ive.org.ua/>.
9. Представлено найтихіший в світі вітрогенератор. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://erudition.com.ua/tehnolohiji-2/predstavleno-najtyhishyj-v-sviti-vitrohenerator/>.
10. Десять вражаючих вітрогенераторів майбутнього. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://navkolonas.com/archives/1098>.
11. Turbulent Flow Characteristics and Dynamics Response of a Vertical-Axis Spiral Rotor. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.mdpi.com/1996-1073/6/6/2741/htm>.
12. Ewicon – The World’s First Blade-less Wind Turbine. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://wonderfulengineering.com/ewicon-the-worlds-first-blade-less-wind-turbine/>.

10. СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА

10.1. Загальна характеристика

Сонце є найпотужнішим джерелом енергії, що перевищує можливості енергетичних запасів Землі в сто тисяч разів. Кількість енергії, що надходить від Сонця перевищує в десять тисяч разів обсяги енергії, вироблені на всій Землі. На рис. 10.1. схематично показано розподіл променевої енергії Сонця, що доходить до земної атмосфери.

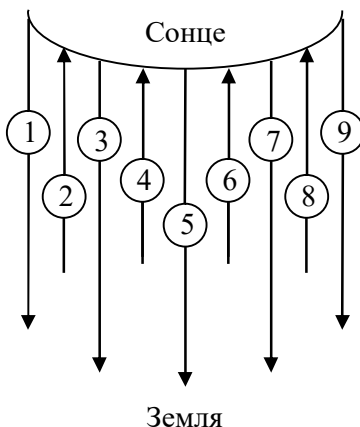


Рис. 10.1. Розподіл променевої енергії Сонця

Променева енергія Сонця, що доходить до нашої атмосфери, розподіляється на дев'ять частин: 1 – перетворюється в енергію вітру (2,5 %); 2 – відбивається атмосферою (7 %); 3 – перетворюється в енергію морських течій (0,4 %); 4 – відбивається хмарами (27 %); 5 – падає на поверхню океану (33 %); 6 – відбивається від Землі (7 %); 7 – падає на поверхню суші (15 %); 8 – зменшує теплове випромінювання Землі; 9 – засвоюється рослинами (0,12 %).

Значна частина сонячної енергії, що потрапляє на Землю, перетворюється в енергію продуктів фотосинтезу, які є основним джерелом теплової та мускульної енергії живих організмів. Рослинний світ і його відходи при спалюванні перетворюються в теплову енергію, а відходи рослинного і тваринного світу після бродіння можуть перетворюватися в горючі гази (метан, сірководень тощо) і органічні добрива, енергія яких згодом знову перейде в енергію продуктів рослинного світу. Ця частина сонячної енергії одна із найважливіших, тому що завдяки їй проходять фізіологічні процеси всіх живих організмів, що актуально для вирощування продукції сільського господарства. У процесі фотосинтезу в хімічну енергію переходить лише від 1 до 2 % сонячної енергії.

Першопричиною енергії випромінювання Сонця є реакція термоядерного синтезу легких елементів у глибинах планети. У свою чергу, енергія, що доходить до Землі у кількості приблизно $1,35 \text{ кВт/м}^2$, є причиною більшості поновлюваних джерел енергії.

Сонячна енергетика – напрямок альтернативної енергетики, який заснований на безпосередньому використанні сонячного випромінювання для отримання енергії в будь-якому вигляді. Сонячна енергетика використовує відновлювані джерела енергії і є екологічно чистою, тобто не виробляє шкідливих відходів під час активної фази використання.

Сонячну енергетику найчастіше поділяють на такі напрямки:

- геліотермальна енергетика – нагрів теплоносія для опалення, гарячого водопостачання та інших потреб, який відбувається за допомогою прямого перетворення сонячного випромінювання в теплову енергію;
- отримання електроенергії за допомогою теплових машин, нагрівання робочого тіла в яких відбувається за рахунок сонячної енергії;
- фотовольтаїка – перетворення сонячної енергії в електроенергію за допомогою сонячних панелей (сонячних батарей).



Рис. 10.2. Вигляд геліоколектора та сонячної батареї

Переваги енергії сонячної радіації порівняно з традиційними видами палива:

- джерело сонячної енергії практично невичерпне;
- енергію сонячної радіації можна використовувати на більшості ділянок поверхні Землі як місцеве джерело електро- чи теплопостачання;
- існує можливість безпосереднього перетворення енергії сонячної радіації в електричну;
- доступна для отримання високих температур (більше 500°C);
- існує можливість прискорення фотохімічних процесів;
- безпека для навколишнього середовища у процесі використання сонячних установок.

Поряд з безперечними перевагами сонячній енергетиці притаманні ряд недоліків. Використання великих площ землі під електростанції, що створює труднощі для їх розташування (наприклад, для електростанції потужністю 1 ГВт це може бути декілька десятків квадратних кілометрів). Проте, фотоелектричні елементи на великих сонячних електростанціях встановлюються на висоті від 1,8 до 2,5 м, що дозволяє використовувати землі під електростанцією для сільськогосподарських потреб, наприклад, для випасу худоби.

Ефективність сонячних установок залежить від географічного розташування. Потік сонячної енергії на поверхні Землі суттєво залежить від широти і клімату. У різних місцевостях середня кількість сонячних днів в році значно відрізняється.

Середньорічна кількість сумарної сонячної радіації, що надходить на 1 м² поверхні, знаходиться в межах від 1070 кВт год./м² у північній частині України до 1400 кВт год./м² на півдні (рис. 10.3).

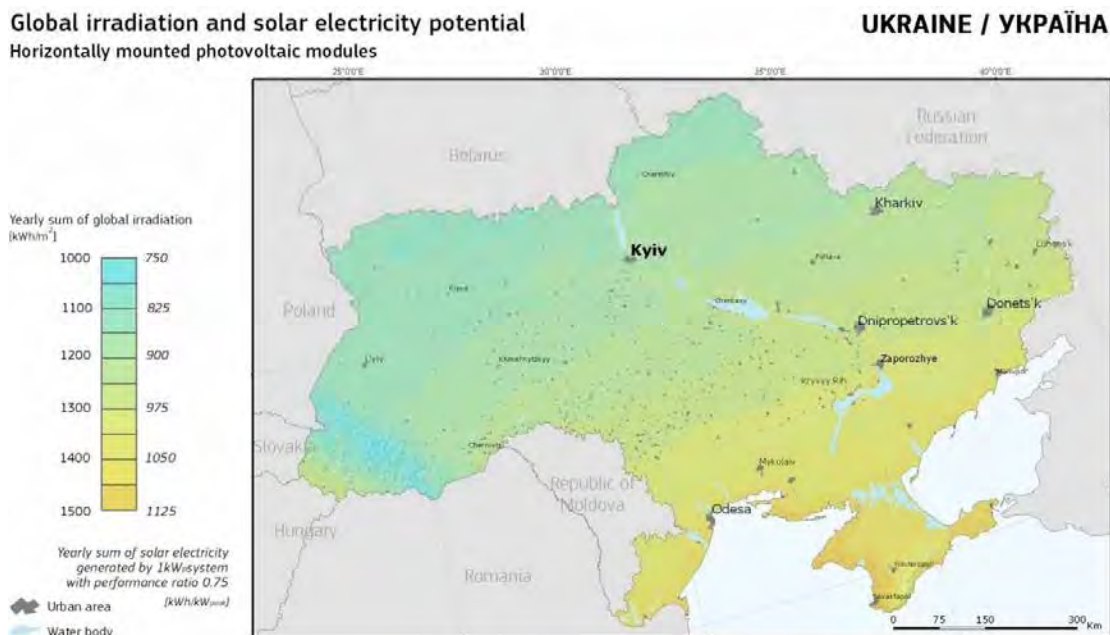


Рис. 10.3. Розподіл сонячної енергії на одиницю площі горизонтальної поверхні для території України

Середньодобове значення сонячної радіації за місяцями року для окремих міст України наведено в табл. 10.1.

Табл. 10.1. Показники сонячної радіації за місяцями

Населений пункт	Значення сонячної радіації, кВт год./м ² /день											
	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень
Київ	1,07	1,87	2,95	3,96	5,25	5,22	5,25	4,67	3,12	1,94	1,02	0,86
Житомир	1,01	1,82	2,87	3,88	5,16	5,19	5,04	4,66	3,06	1,87	1,04	0,83
Одеса	1,25	2,10	3,07	4,38	5,65	5,85	6,03	5,34	3,93	2,52	1,36	1,04
Ялта	1,27	2,06	3,05	4,30	5,44	5,84	6,20	5,34	4,07	2,67	1,55	1,07

Сонячні електро- чи термальні станції не працюють вночі і недостатньо ефективні у ранкових і вечірніх сутінках. У той час, як пік споживання енергії припадає саме на вечірні години. Крім того, потужність сонячних установок може стрімко і несподівано коливатися через зміни погодних умов.

На даний час залишається високою вартість сонячних панелей. Але за останні роки намітилася позитивна тенденція щодо зниження вартості сировини для виготовлення фотоелектричних модулів. На рис. 10.4 наведена динаміка зміни вартості полікристалічного кремнію.

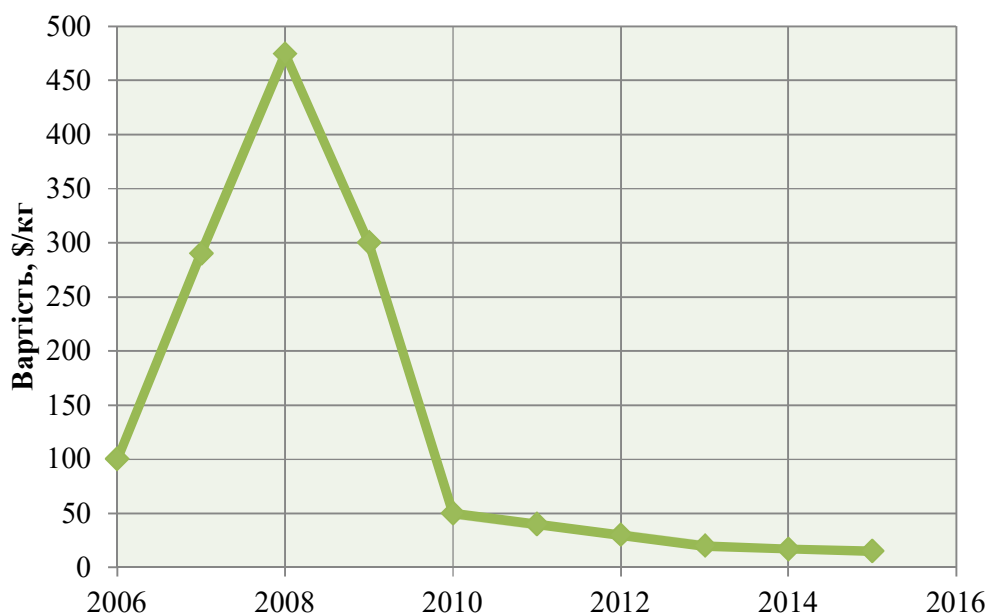


Рис. 10.4. Графік зміни вартості полікристалічного кремнію

ККД сонячних елементів має досить низькі показники і в середньому становить 16 %, у кращих зразків досягає 25 %. У дослідних лабораторіях отримані зразки фотоперетворювачів із ККД, який сягає 47 %.

Але не дивлячись на існуючі недоліки, освоєння сонячної енергії залишається одним із пріоритетних напрямів розвитку відновлюваної енергетики. Здійснюється пошук нових і вдосконалення існуючих технологій, виведення їх до економічно ефективного рівня та розширення сфер використання. Головними причинами такої уваги є очікуване вичерпання запасів органічних видів палива, різке зростання їх вартості, недосконалість та низька ефективність технологій їхнього використання, шкідливий вплив на довкілля, наслідки якого все більше і більше турбують світову спільноту.

У країнах ЄС широко використовуються так звані «сонячні зобов'язання» відносно будівництва з використанням нових сонячних технологій. Це сприяє істотним змінам у житловому фонді, готуючи його до неминучого дефіциту викопного палива, дає потужний сигнал для користувачів і для будівельного бізнесу. Серед останніх ініціатив можна назвати проект «Тисяча дахів» у Німеччині (2250 будинків були обладнані фотоелектричними установками) та програма «Мільйон сонячних дахів» у США. Серед лідерів сонячної енергетики також є Японія та Італія. З огляду на довгострокову перспективу сонячна енергетика в значній частині може забезпечити розв'язання енергетичних проблем у житловому фонді.

За останні десять років встановлена потужність геліосистем у світі зростає

більше чим у 4 рази, а фотоелектричних систем – у 30 разів. На рис. 10.5 червоним кольором подано графік збільшення потужності термальних установок, синім – динаміка росту загальної потужності сонячних панелей.

Серед країн, які лідирують у галузі геліотермальної енергетики, – Китай (64 % встановленої потужності), США (5,8 %), Німеччина (4,2 %), Туреччина (3,9 %), Бразилія (2,1 %). Лідери з використання фотоелектричних систем – Німеччина (38 ГВт), Японія (23 ГВт), Китай (28 ГВт), Італія (18,5 ГВт), США (18 ГВт).

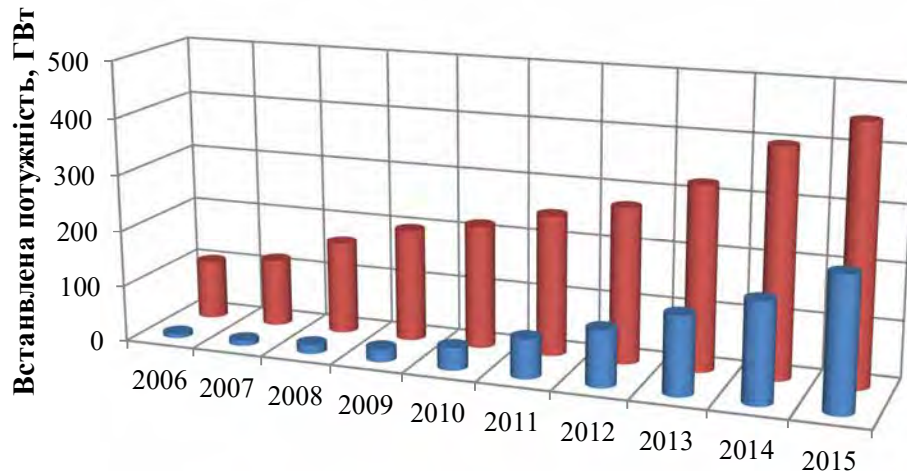


Рис. 10.5. Динаміка росту встановленої потужності об’єктів сонячної енергетики

Україна має наступні показники на кінець 2016 року:

- загальна потужність встановлених фотоелектричних систем – 0,8 ГВт.
- всього введено в експлуатацію термальних установок – 0,15 ГВт.

Перспективність та доцільність розвитку сонячної енергетики в Україні визначається такими факторами:

- надходження енергії сумарної сонячної радіації на територію України становить 750 трильйонів кВт год./рік;
- наявність розвинутої промислової інфраструктури, потенційно готової до швидкого впровадження виробництва сонячних енергоустановок та необхідних комплектуючих у промислових масштабах;
- можливість організації значних експортних поставок сонячних енергоустановок та комплектуючих до них, що зумовить швидку окупність вкладених коштів.

Україна має потужну інфраструктуру, зокрема розвинуту сировинну базу, машинобудування і металообробку, електротехнічну промисловість, мікроелектроніку, які можуть задовольняти потреби в необхідних засобах для ефективного розвитку геліоенергетики.

Пріоритетні напрямки розвитку сонячної енергетики України на сучасному етапі:

- впровадження систем гарячого водопостачання та опалення з використанням сонячних колекторів;
- створення високоефективного обладнання для фотоелектричної енергетики;
- створення комбінованих сонячно-паливних електростанцій та котелень.

10.2. Геліотермальна енергетика

Всі сонячні колектори можна розділити на 3 види: вакуумні, плоскі та колектори-концентратори.

Вакуумний колектор вкладається із довгих скляних трубок-оболонки довжиною 1800 мм, діаметром 5,8 см. Робота вакуумних трубок заснована на принципі термотрубки (технологія *heatpipe*), яка представляє собою порожнистий мідний стержень, запаяний з обох кінців з розширенням у верхній частині (рис. 10.6). Усередині стержня знаходиться нетоксична рідина (іноргатик). При нагріванні до температури кипіння рідина піднімається в пароподібному стані у верхню частину – наконечник (конденсатор), температура на якому може досягати від 250 до 380°C. Рідина конденсується, віддаючи тепло. Конденсат стікає по стінках трубки вниз і процес повторюється. Теплова трубка вставляється в скляну трубу і фіксується між двома алюмінієвими ребрами. Форма ребер забезпечує надійний контакт теплової трубки і внутрішньої поверхні вакуумної труби, що є умовою максимальної передачі тепла до мідної теплової трубки, а потім до теплоносія в проточному теплообміннику. Внутрішня порожнина теплової трубки вакуумована, тому рідина випаровується навіть при температурі близько 30°C. При меншій температурі трубка «закривається» і додатково зберігає тепло.

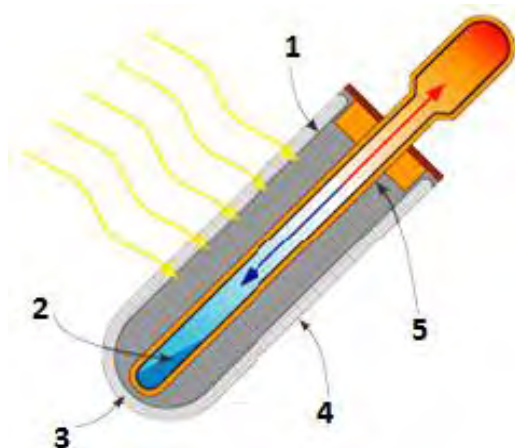
Тепло від головки термотрубки передається до основи колектора – приймача. Приймач сонячного колектора мідний з поліуретановою ізоляцією, закритий нержавіючим корпусом або корпусом з алюмінієвого сплаву. Передача тепла відбувається через мідну "гільзу" приймача. Завдяки цьому опалювальний контур відділений від трубок. При пошкодженні однієї трубки колектор продовжує працювати. Процедура заміни трубок дуже проста, при цьому немає необхідності зливати незамерзаючу суміш з контуру теплообмінника.

Вакуумна труба складається з двох скляних труб. Конструкція скляних вакуумних труб схожа на конструкцію термоса, одна трубка вставлена в іншу з великим діаметром. Зовнішня труба виконана з прозорого надміцного боросилікатного скла. Внутрішня труба також зроблена з прозорого боросилікатного скла, покритого спеціальним селективним нанопокриттям, яке забезпечує максимальне поглинання тепла при мінімальному відбитті.

Товщина скляної стінки-оболонки складає 2,2 мм, що достатньо для захисту від граду, снігу і сильних поривів вітру. Завдяки круглій формі трубок-оболонки прямі і розсіяні промені і інфрачервоне випромінювання проходять

до термотрубки під різними кутами, що збільшує ефективність поглинання енергії впродовж руху сонця зі сходу на захід упродовж дня. Щоб уникнути тепловтрат з простору між двома трубами викачане повітря і створений вакуум. Для підтримки вакууму між двома скляними трубами використовується барієвий газопоглинач. При виробництві газопоглинач піддається впливу високих температур, внаслідок чого нижній кінець вакуумної труби покривається шаром чистого барію. Цей шар барію поглинає речовини, які виділяються з труби в процесі зберігання і експлуатації, підтримуючи таким чином стан вакууму. Шар барію також є чітким візуальним індикатором стану вакууму, коли вакуум зникає, сріблястий барієвий шар стає білим. Це дає змогу встановити справність трубки.

Діапазон робочих температур системи від 60 до 150°C. Вакуумний колектор з термотрубною – найтехнологічніший на даний момент тип колектора, який може ефективно працювати за температури навколишнього середовища до мінус 50°C.



1 – селективне покриття, 2 – інергетик, 3 – вакуум, 4 – боросилікатне скло, 5 – теплова трубка

Рис. 10.6. До пояснення процесів у вакуумному колекторі

Ще одним типом трубчастих геліоколекторів є пристрої з коаксіальними трубками, в яких розташований проточний теплообмінник U-подібної форми. При високій ефективності трубки U-типу мають один суттєвий недолік – вони представляють собою єдиний цілий елемент і повинні монтуватися одночасно. При цьому, така конструкція виключає заміну одиночних трубок при виході їх з ладу. Також недоліками колекторів з трубками U-типу, у порівнянні з тепловими трубками є їх більший гідравлічний опір, підвищені вимоги до теплоносія і, що важливо, більш висока вартість.

Підвищення експлуатаційних температур до рівня від 120 до 250°C можливо шляхом уведення в сонячні колектори концентраторів за допомогою параболоциліндричних відбивачів, прокладених під поглинаючими елементами (рис. 5.7). Для отримання більш високих експлуатаційних температур потрібні також пристрої стеження за сонцем.



1 – вакуумна трубка, 2 – U-подібна труба, 3 – алюмінієвий теплопровідний шар, 4 – селективне покриття, 5 – рефлектор
Рис. 10.7. Трубчасті колектори з рефлекторами

Окрім пристроїв за технологією термотрубки, набули поширення трубчасті вакуумні колектори з прямою теплопередачею воді (рис. 10.8).



Рис. 10.8. Вакуумний колектор з прямою теплопередачею воді

У такому колекторі вакуумні трубки з'єднані з накопичувальним баком. Із контуру теплообмінника вода тече прямо в трубки, нагрівається і повертається назад. Такі системи ще називають термосифонними. До переваг цих систем слід віднести безпосередню передачу тепла воді без участі інших елементів. Термосифонні системи працюють за принципом природної конвекції, під час якої тепла вода рухається вгору. У термосифонних системах бак повинен бути розташований вище колектора. Коли вода в трубках колектора нагрівається, вона піднімається у верхню частину бака. Більш прохолодна вода з баку тече

вниз, таким чином, забезпечується циркуляція у всій системі. У маленьких системах бак об'єднаний з колектором і не розрахований на магістральний тиск, тому термосифонні системи потрібно використовувати або з подачею води з вище розташованої ємності або через редуктори зниження тиску. Така система має мінімальний гідравлічний опір. Термосифонні системи застосовують для забезпечення гарячою водою об'єктів, які експлуатуються в теплу пору року.

Для підвищення ефективності такі системи додатково можуть бути обладнані вбудованим теплообмінником. Вакуумний колектор з прямою теплопередачею і вбудованим теплообмінником має всі переваги і особливості попереднього типу колекторів.

Відмінністю від попереднього варіанту є наявність вбудованого в бак ефективного теплообмінника, що дозволяє з'єднати колектор з баком до напірної мережі водопостачання. При цьому в колекторі підтримується мінімальний гідростатичний тиск. Водогрійний контур можна наповнювати незамерзаючою рідиною, що дозволяє використовувати його і при невеликих мінусових температурах (до мінус 5...10°C). Іншою перевагою є те, що в колекторі не відкладаються солі жорсткості і інші забруднення, так як обсяг теплоносія один і той же, а вода для господарських потреб проходить тільки через внутрішній мідний теплообмінник.

Колектор-концентратор (Parabolicsolarcollector) для концентрації сонячної енергії використовує дзеркальну поверхню, яка фокусує світло з великої поверхні на меншій поверхні абсорбера. Завдяки цьому досягається достатньо висока температура.

У деяких випадках випромінювання може концентруватися у фокусній точці, в інших випадках – уздовж тонкої фокальної лінії. Спеціальні пристрої відстеження забезпечують зміну положення концентратора для найбільш ефективного поглинання сонячної енергії упродовж світлового дня. Діапазон робочих температур від 80 до 150°C. Концентратори найбільш ефективні в пустельних регіонах і близько до екватора та використовуються в основному в промисловості через їх велику вартість. Загальний вигляд геліостанції з колекторами-концентраторами зображений на рис.10.9.

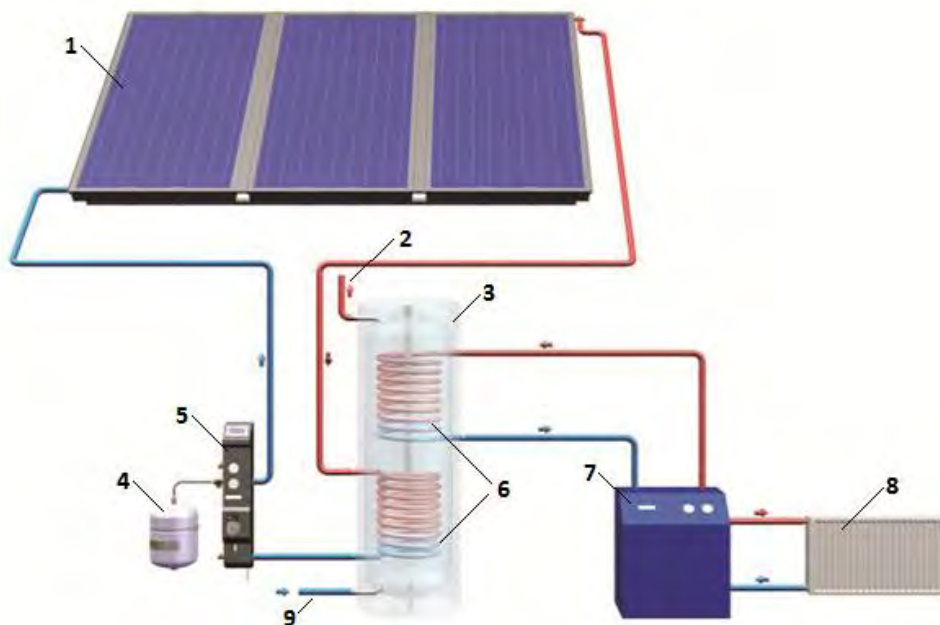
Колектори виробляють теплову енергію тоді коли є сонячна енергія. Іноді можуть виникати такі ситуації, коли неможливо використати згенеровану енергію або в певний момент часу, з якихось причин це недоцільно. Тоді в геліосистемі відбувається своєрідний застій (стагнація).

Стагнація геліосистем – це надлишок теплової енергії через недостатній або відсутній відбір енергії з наступним кипінням рідини (теплоносія) в колекторі. Це явище не дуже сприятливе для колектора, хоча це не аварійна ситуація. Стагнація в більшості випадків відбувається влітку. Найбільше до стагнації схильні комбіновані геліосистеми, в яких тепла енергія йде на опалення. Застій відбувається, коли припиняється або дуже сповільнюється циркуляція, при цьому сонячне випромінювання не припиняє впливу на колектор. Безперервна дія сонячних променів і застій призводить до того, що температура теплоносія починає зростати, що призводить до закипання рідини та різкого зростання тиску в сонячному контурі.



Рис. 10.9. Геліостанція з колекторами-концентраторами

Схема традиційної системи, в якій нагрів води відбувається за рахунок сонячної енергії, зображена на рис. 10.10. Газовий або електричний котел забезпечує роботу системи опалення та підтримання температури господарської води в холодну пору року.



1 – геліоколектор, 2 – гаряча вода, 3 – бак-акумулятор, 4 – розширювальний бачок, 5 – насосна група, 6 – теплообмінники, 7 – котел, 8 – радіатор системи опалення, 9 – вхід холодної води

Рис. 10.10. Схема сонячного тепlopостачання

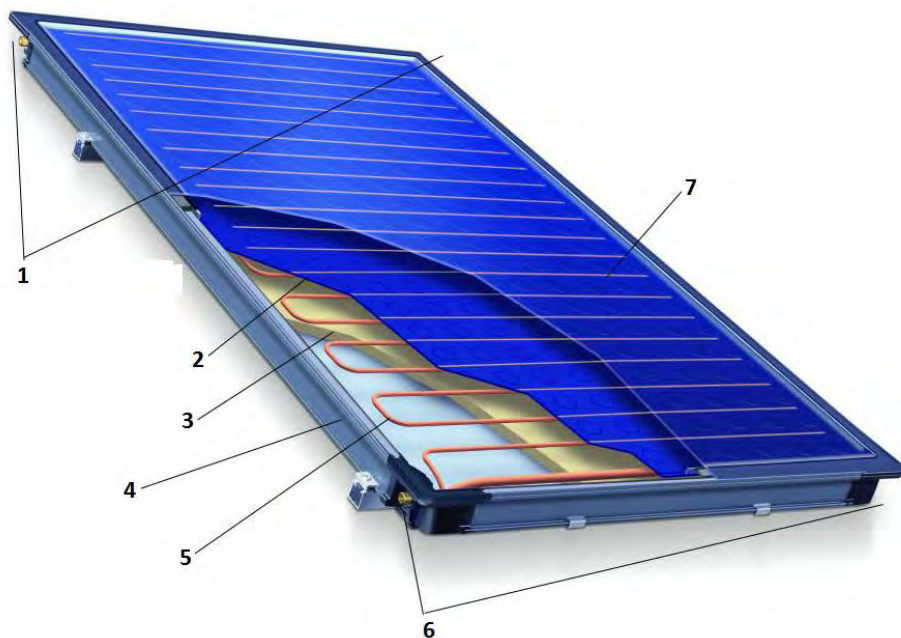
Плаский колектор являє собою конструкцію з елемента-абсорбера, який поглинає сонячне випромінювання, прозорого покриття (зазвичай

використовується загартоване скло зі зниженим вмістом металу) і термоізолюючого шару (рис. 10.11).

Особливе оптичне покриття плоского колектора не випромінює тепло, що значно підвищує його ефективність. Це покриття складається із міцного тонкого шару аморфного напівпровідника, нанесеного на металеву основу, і відрізняється високим поглинанням у видимій області спектра і низьким коефіцієнтом випромінювання в довгохвильовій інфрачервоній області. У якості абсорбера широко застосовується листова мідь.

Діапазон робочих температур системи від 20 до 80°C. Для підвищення робочих температур плоских колекторів до 120°C застосовують двошарове скляне покриття, що зменшує конвекційні втрати. Але при цьому зменшується оптична ефективність, що може компенсуватися використанням антирефлекторного покриття.

Плоский сонячний колектор оптимальний при необхідності використання енергії сонця у квітні-жовтні. За рахунок відносної дешевизни він може бути оптимальним для нагріву господарської води і басейнів. У холодну пору року при мінусових температурах плоский сонячний колектор не може служити джерелом тепла за рахунок великих втрат в навколишнє середовище.



1 – вихід нагрітого теплоносія, 2 – абсорбер, 3 – теплоізоляція, 4 – корпус, 5 – мідні трубки, 6 – вхід теплоносія, 7 – скло з покриттям.

Рис. 10.11. Будова плоского колектора

До недоліків цього типу колекторів слід віднести і досить невеликі температури нагріву циркулюючої рідини, що крім усього іншого призводить до ймовірності розмноження хвороботворних бактерій, якої немає в системах з вакуумними колекторами. У разі розбиття герметизуючого скла ефективність колектора значно зменшується, так як тепло витрачається на обігрів навколишнього середовища, а також відсутній парниковий ефект не дозволяє в

достатній мірі нагрівати теплоносії.

Сумарний тепловий потік, що надходить до теплоносія в плоскому геліоколекторі, визначається балансом:

$$Q = Q_{\text{погл}} - Q_{\text{втр}} \quad (10.1)$$

де $Q_{\text{погл}}$, $Q_{\text{втр}}$ – поглинутий потік і теплові втрати приймача відповідно, Вт.

Потік сонячного випромінювання, що поглинутий панеллю приймача, складає прямий потік і потік, відбитий і повернутий світлопрозорим покриттям:

$$Q_{\text{погл}} = \eta_0 \cdot S_n \cdot E \quad (10.2)$$

$$\eta_0 = \tau_{cm} (1 - \rho_n) (1 + (1 - \tau_{cm}) \rho_n) \quad (10.3)$$

де η_0 – оптичний ККД, що враховує втрати геліоколектора на відбиття сонячного випромінювання і його поглинання прозорим покриттям; S_n – площа освітленої поверхні, м²; E – густина сонячного потоку, Вт/м²; τ_{cm} – коефіцієнт пропускання світлопрозорого покриття; ρ_n – коефіцієнт відбиття світлопрозорого покриття.

У процесі поглинання температура поглинаючої поверхні підвищується. Перевищення температури поглинаючої поверхні над температурою навколишнього середовища призводить до втрати тепла:

$$Q_{\text{втр}} = k_{\text{втр}} (t_n - t_{oc}) S_n \quad (10.4)$$

$$k_{\text{втр}} = (1/\alpha_{\text{нов}} - \delta_{cm}/\lambda_{cm} + 1/\alpha_l \alpha_k)^{-1} \quad (10.5)$$

$$\alpha_{\text{нов}} = (0,145 - 0,001\beta) Gr^{0,281 + 0,0005\beta} \quad (10.6)$$

де t_n – температура поглинаючої поверхні, °С; t_{oc} – перевищення температури поглинаючої поверхні, °С; $k_{\text{втр}} = 1/R$ – коефіцієнт теплових втрат; R – термічний опір поверхні приймача, м² °С/Вт; α_l , α_k – коефіцієнти тепловіддачі від теплоприймача навколишньому середовищу випромінюванням і конвекцією; $\alpha_{\text{нов}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від поглинаючої поверхні до світлопрозорої; δ_{cm} , λ_{cm} – товщина і теплопровідність світлопрозорої поверхні; β – кут нахилу геліоприймача до горизонту; Gr – число Грасгофа, яке визначається за виразом:

$$Gr = \frac{1/(273 + t_{\text{нов}}) g \Delta t h^3}{\nu_{\text{нов}}^2} \quad (10.7)$$

де Δt – перепад температур між поглинаючою та світлопрозорою поверхнями, °С; $t_{\text{нов}}$ – середня температура повітря між поглинаючою та світлопрозорою поверхнями, °С; h – відстань між поглинаючою та світлопрозорою поверхнями, м.

Коефіцієнт тепловіддачі для вимушеної конвекції від світлопрозорої поверхні до навколишнього середовища:

$$\alpha_l = 11,6 + 7\sqrt{\nu_{\text{нов}}} \quad (10.8)$$

де $\nu_{\text{нов}}$ – швидкість зовнішнього повітря, що обдуває колектор, м/с.

Коефіцієнт тепловіддачі для вільної конвекції від світлопрозорої поверхні до навколишнього середовища:

$$\alpha_{\kappa} = (2,26 - 0,0067\beta)(t_{cm} - t_{nos})^{0,33} \quad (10.9)$$

де t_{cm} – температура світлопрозорої поверхні, °С.

Корисний тепловий потік, що надходить до теплоносія, визначається через рівняння теплопередачі:

$$Q = k(t_n - t_p)S_n' \quad (10.10)$$

де $k = (\delta_n/\lambda_n + 1/\delta_n)^{-1}$ – коефіцієнт теплопередачі від зовнішньої поверхні поглинаючої панелі до енергоносія; δ_n – товщина поглинаючої панелі, м; λ_n , α_n – коефіцієнт теплопровідності та коефіцієнт тепловіддачі від поглинаючої панелі до теплоносія; $t_p = (t_{p1} + t_{p2})/2$ – середня температура теплоносія, °С; t_{p1} , t_{p2} – температура рідини на вході та виході, °С; S_n' – площа внутрішньої поверхні поглинаючої панелі, м².

Найвищого коефіцієнта енерговіддачі сонячної установки за рік можна домогтися при її розташуванні в південному напрямку з нахилом від 30 до 35 градусів до горизонталі (табл. 10.2). Але навіть при значному відхиленні від цих умов (від південного заходу до південного сходу з нахилом від 25 до 55 градусів) доцільний монтаж теплової сонячної установки. Навіть за орієнтації сонячної установки в східному або західному напрямку можна розраховувати на суттєву тепловіддачу, якщо скат даху становить від 25 до 45 градусів. Взимку крутіший кут був би ефективніше, але дві третини енерговіддачі сонячна установка дає в літній період. Кута атаки менше 20 градусів, навпаки, слід уникати, так як в цьому випадку збільшується ступінь забруднення колектора. Якщо площа колектора повинна розподілятися за різними площами даху, то в цьому випадку слід дотримуватися вимог гідравлічного з'єднання колекторних площ. Кожна панель повинна бути оснащена датчиком температури колектора і мати окремий насосний вузол.

Табл. 10.2. Відносні значення теплової потужності у залежності від орієнтації та кута нахилу геліоколектора

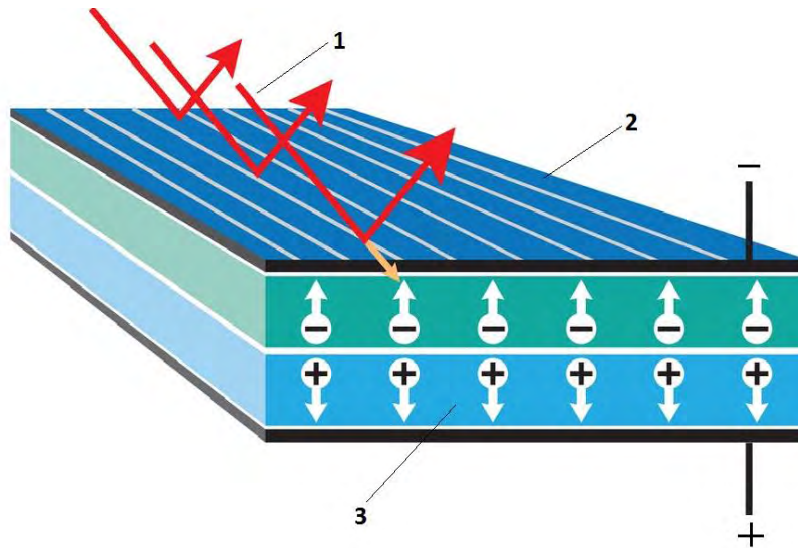
Орієнтація (0 – південь, 15-90 – схід, захід)	Кут нахилу до горизонталі						
	0	15	30	45	60	75	90
0	0,89	0,97	1,00	0,99	0,93	0,83	0,69
15	0,89	0,96	1,00	0,98	0,93	0,83	0,69
30	0,89	0,96	0,99	0,97	0,92	0,82	0,70
45	0,89	0,94	0,97	0,95	0,90	0,81	0,70
60	0,89	0,93	0,94	0,92	0,87	0,79	0,69
75	0,89	0,91	0,91	0,88	0,83	0,76	0,66
90	0,89	0,88	0,87	0,83	0,78	0,71	0,62

10.3. Фотовольтаїка

Для отримання електрики у результаті прямого перетворення сонячної енергії використовують спеціальні панелі, виготовлені на основі моно- чи полікристалічного кремнію або із застосуванням тонкоплівкових технологій.

Принцип дії сонячних панелей ґрунтується на застосуванні напівпровідникових *p-n* переходів і полягає в отриманні додаткової

електрорушійної сили у результаті дії на $p-n$ перехід світла (рис. 10.12). При поглинанні фотона в області, яка прилягає до $p-n$ переходу, утворюється пара носіїв заряду (електрон і дірка). Одна із цих часток є неосновним зарядом і з великою ймовірністю проникає крізь перехід. У результаті з боку напівпровідника типу p накопичуються дірки, з боку напівпровідника типу n накопичуються електрони. У разі підключення зовнішнього споживача в колі під дією електрорушійної сили протікатиме струм.



1 – сонячне світло, 2 – напівпровідник типу n , 3 – напівпровідник типу p
Рис. 10.12. До принципу дії сонячної батареї

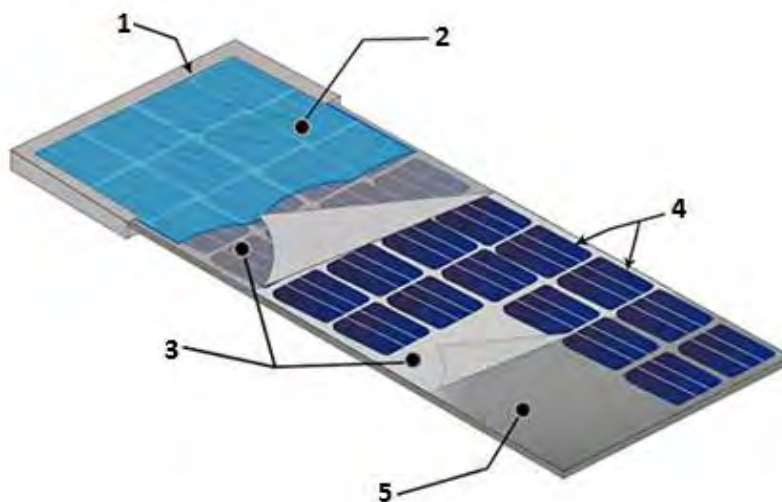
Найбільш популярними на ринку сонячних панелей є монокристалічні сонячні батареї. Цей тип батарей складається з великої кількості монокристалічних елементів, які виконують функцію перетворення електричної енергії з сонячних променів, що потрапляють на їх поверхню.

У монокристалічних елементів кути округлені і поверхня однорідна. Закруглені кути пов'язані з тим, що при виробництві монокристалічного кремнію застосовують циліндричні заготовки. Однорідність кольору і структури монокристалічних елементів вказує на те, що це один вирощений кристал кремнію, а кристалічна структура є однорідною.

Найбільш оптимальною кількістю сегментів у монокристалічних батареях вважається 36. Це дозволяє ефективно використовувати сонячну енергію. Ефективність монокристалічних батарей сягає 22 %. Монокристалічні батареї досить легкі й компактні, здатні трохи згинатися. Завдяки цій властивості, вони легко монтуються на нерівних поверхнях, де складно домогтися правильного кута нахилу. Батареї з монокристалів мають надійний і міцний склопластиковий корпус. Завдяки цьому всередину установки не проникає волога, тому дані установки можна використовувати в складних природних умовах.

Типову структуру монокристалічної батареї наведено на рис.10.13. У даного виду сонячних батарей максимальна потужність досягається за умов,

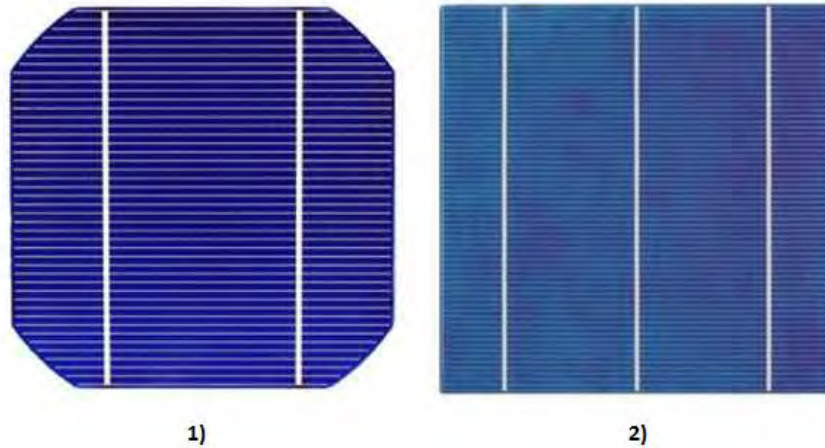
якщо небо буде ясным, температура повітря від +15 до +25°C, панелі будуть направлені до сонця. Значно знизити потужність установки може навіть невелика хмарність (близько 70 %), а в разі сильної хмарності можна вважати, що робота сонячної батареї блокована, так як потужність знижується на 90 %. Для того щоб не змінювати положення панелей у залежності від сезону, їх рекомендується встановлювати у напрямку до екватора, відхилення має дорівнювати широті місцевості.



1 – алюмінієвий анодований профіль, 2 – загартоване скло, 3 – полімерна плівка, 4 – монокристалічні елементи, 10 – основа панелі
Рис. 10.13. Типова структура монокристалічної батареї

Полікристалічні сонячні батареї вважаються альтернативним варіантом монокристалічним батареям. Квадратна форма полікристалічних елементів є наслідком використання прямокутних заготовок під час виготовлення. Неоднорідність кольору і структури елементів викликана великою кількістю різнорідних кристалів кремнію та незначною кількістю домішок. Серійні зразки полікристалічних елементів мають ефективність до 18 %, що є наслідком використання вторинної сировини (перероблених сонячних панелей або кремнієвих відходів металургійної промисловості). Це призводить до виникнення різних дефектів в полікристалічних елементах, таких як кордону кристалів, мікродефекти, домішки вуглецю і кисню. Зображення елементів сонячних панелей наведено на рис.10.14.

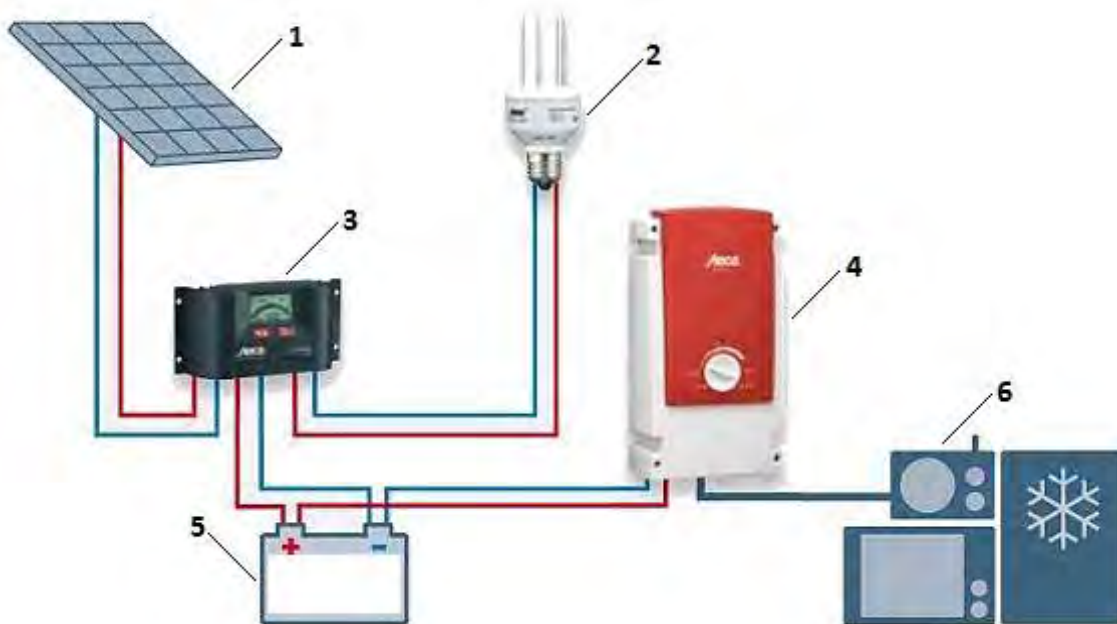
Вартість батареї з полікристалічних елементів нижча в розрахунку на одиницю потужності порівняно з монокристалічною технологією. Це пов'язано з більш дорогим процесом виробництва і застосуванням кремнію високого ступеня очищення під час виготовлення монокристалічних елементів. Головні параметри – напруга і потужність сонячної панелі не залежать від типу елементів, тому на ринку представлені панелі обох типів однакової потужності. Тобто можна придбати полікристалічні панелі тієї ж потужності більших розмірів, але за меншою ціною.



1 – монокристалічний елемент; 2 – полікристалічний елемент
Рис. 10.14. Порівняння елементів сонячних панелей

Сфера застосування моно- та полікристалічних сонячних батарей досить широка, це може бути і зарядка акумуляторів, електроживлення для садових насосів, забезпечення живлення бортового обладнання корабля, освітлення садових і присадибних ділянок, живлення сигналізації і засобів зв'язку тощо.

Схема типової системи сонячного електропостачання зображена на рисунку 10.15.



1 – сонячна панель, 2 – навантаження 12 В, 3 – контролер зарядження, 4 – інвертор, 5 – акумуляторна батарея, 6 – навантаження 220 В

Рис. 10.15. Схема сонячного електропостачання приватного будинку

Тонкоплівкові сонячні панелі вважаються найбільш дешевим варіантом з

усіх існуючих видів батарей. На відміну від монокристалічних батарей, тонкоплівковим сонячним батареям не потрібні прямі промені сонця. Такі батареї менш залежні від рівня хмарності, за похмурої погоди вони втрачають потужність всього на величину від 10 до 15 %. Найбільший недолік для даного виду сонячних батарей є більша площа, яка в 2,5 рази перевищує інші зразки за однакової потужності. Застосовуються вони в основному для систем електропостачання великих об'єктів.

До першого покоління окрім кремнієвих фотоелектричних елементів відносять технології вирощування тонкостінних заготовок: EFG (Edgedefinedfilm – fedcrystalgrowthtechnique), S-web (Siemens), тонкошаровий полікремній (Apex).

Серед тонкоплівкових технологій, які належать до другого покоління фотоелементів, розрізняють:

- кремнієві: аморфні, мікротристалічні, нанокристалічні, CSG (crystallinesilicononglass);

- на основі телуриду кадмію (CdTe);

- на основі селеніду міді-індію-(галію) (CIGS).

Загалом величину сонячної радіації, яка потрапляє на похилу площину, можна визначити за формулою:

$$Q_{\Pi} = Q_{\Pi P} + Q_p + Q_v \quad (10.11)$$

де $Q_{\Pi P}$ – пряме сонячне випромінювання, яке потрапляє на похилу площину, Вт/м²; Q_p – розсіяне сонячне випромінювання, яке потрапляє на похилу площину, Вт/м²; Q_v – випромінювання, відбите від поверхні землі, Вт/м².

Значення прямого сонячного випромінювання знаходять за виразом:

$$Q_{\Pi P} = Q_{\text{орт}} \cos \theta \quad (10.12)$$

де $Q_{\text{орт}}$ – пряме сонячне випромінювання, яке падає на ортогональну площину, відносно променів, Вт/м²; θ – кут прямого сонячного випромінювання, який характеризує кут між напрямом випромінювання на будь-яку поверхню і нормаллю до цієї поверхні, рад.

Згідно формули Кастрова:

$$Q_{\text{орт}} = \frac{Q_0 \sin \alpha}{\sin \alpha + c} \quad (10.13)$$

де Q_0 – сонячна стала ($Q_0=1370$ Вт/м²); c – безрозмірна величина, яка характеризує ступінь прозорості атмосфери. Для середньої прозорості $c=0,81$.

Значення нахилу Сонця можна знайти за наближеною формулою Купера:

$$\delta = 0,41 \sin \left(\frac{360(284 + N)}{365} \right) \quad (10.14)$$

де N – порядковий номер дня в році, який бере відлік від першого січня.

Висоту сонця можна визначити із виразу (рис. 10.16):

$$\sin \alpha = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (10.15)$$

де φ – географічна широта місця, рад; ω – часовий кут, який визначає кутовий зсув Сонця на протязі доби.

Азимут сонця визначається згідно виразу:

$$\cos \beta = \frac{\sin \alpha \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \varphi} \operatorname{sign}(\varphi) \quad (10.16)$$

Значення розсіяного сонячного випромінювання:

$$Q_P = Q_{PG} [0,55 + 0,434 \cos \theta + 0,313 (\cos \theta)^2] \quad (10.17)$$

де Q_{PG} – потік сонячної енергії, яка падає на горизонтальну поверхню, Вт/м².

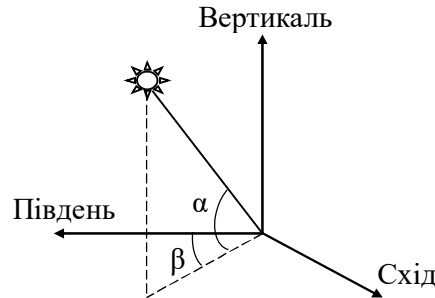


Рис. 10.16. Координати Сонця відносно географічно орієнтованої системи координат

Згідно формули Берлаге:

$$Q_{PG} = \frac{1}{3} (Q_0 - Q_{OPT}) \sin \alpha \quad (10.18)$$

Випромінювання, відбите від поверхні землі, має дуже невелике значення і їм можна знехтувати.

Таким чином, величина сонячної радіації, яка потрапляє на похилу площину:

$$Q_{\Pi}(\varphi, \omega, \gamma, s, N) = Q_{\Pi P}(\varphi, \omega, \gamma, s, N) + Q_P(\varphi, \omega, s, N) \quad (10.19)$$

де γ – азимутний кут площини, який характеризує відхилення нормалі до площини від місцевого меридіану, рад; s – кут нахилу площини, що досліджується, до горизонту, рад.

Для того, щоб врахувати зменшення потоку випромінювання за рахунок хмарності, можна використати коефіцієнти a, b, n .

де a – коефіцієнт який залежить від середовища (суша чи море) та від широти місця; b – сталий коефіцієнт ($b=0,38$); n – хмарність в долях одиниці ($n=0$ за безхмарного неба, $n=1$ у разі суцільної хмарності).

Тоді вираз для розрахунку сонячної радіації, яка падає на довільний майданчик в у умовах хмарності, матиме вигляд:

$$Q_{\Pi}(\varphi, \omega, \gamma, s, N) = [Q_{\Pi P}(\varphi, \omega, \gamma, s, N) + Q_P(\varphi, \omega, s, N)] \cdot [1 - (a + bn)n] \quad (10.20)$$

Таким чином, якщо задавати кути орієнтації майданчика γ і s , можна визначити величину сонячної радіації для будь-якого дня року та моменту часу. Для визначення питомої добової енергії, яка надходить до похиленого майданчика необхідно провести інтегрування відповідно до виразу:

$$Q_{\text{ДОБ}}(N) = \frac{12}{\pi} \int_{\omega_k}^{\omega_n} Q_{\text{П}}(\varphi, \omega, \gamma, s, N) d\omega \quad (10.21)$$

де ω_n , ω_k – часові кути, які відповідають моментам часу початку і закінчення процесу опромінювання поверхні.

За даною методикою можна визначити оптимальне значення кута нахилу майданчика (сонячної панелі) для заданого інтервалу часу (місяця, сезону, року).

Запитання для самоконтролю:

1. Назвіть складові енергії Сонця.
2. Дайте визначення сонячній енергетиці.
3. Які напрямки входять до галузі сонячної енергетики?
4. Назвіть переваги використання енергії Сонця.
5. Які недоліки характерні для сонячної енергетики?
6. Яка середньорічна кількість сумарної сонячної радіації надходить на територію України?
7. В яких межах перебуває ККД сонячних елементів?
8. Що ви знаєте про програми сонячної енергетики в країнах світу.
9. Назвіть фактори, які визначають перспективність розвитку сонячної енергетики в Україні.
10. Перечисліть пріоритетні напрямки розвитку сонячної енергетики України.
11. Поясніть будову сонячного вакуумного колектора з термотрубкою.
12. Поясніть принцип дії теплової трубки.
13. Поясніть призначення приймача вакуумного колектора.
14. Для чого у вакуумній трубці застосовують бар'євий газопоглинач.
15. Чи буде працювати вакуумний колектор при пошкодженні однієї із трубок?
16. Поясніть особливості вакуумних колекторів з прямою теплопередачею воді.
17. Поясніть особливості вакуумних колекторів з прямою теплопередачею і вбудованим теплообмінником
18. Для чого застосовують параболоциліндричні відбивачі?
19. У чому полягає явище стагнації геліосистем?
20. Назвіть складові елементи системи сонячного теплопостачання.
21. Як зменшити негативний вплив наслідків стагнації на геліосистему?
22. Поясніть будову плоских колекторів.
23. Розкрийте особливості оптичного покриття плоского колектора.
24. Назвіть недоліки плоских колекторів.
25. Від чого залежить значення сумарного теплового потоку, що надходить до теплоносія в плоскому геліоколекторі?
26. Які складові має потік сонячного випромінювання, що поглинутий панеллю приймача?

27. Як визначити оптимальну орієнтацію геліоколектора?
28. Які значення кутів орієнтації та нахилу геліоколектора дозволяють досягти найбільшої енерговіддачі?
29. Поясніть особливості колекторів-концентраторів.
30. Як впливає пора року на структуру геліосистеми?
31. Які технології застосовують для отримання електрики у результаті перетворення сонячної енергії?
32. Поясніть принцип дії сонячних панелей.
33. Поясніть будову монокристалічних сонячних батарей.
34. Чим викликана неоднорідність кольору і структури елементів полікристалічних панелей?
35. Які особливості застосування тонкоплівкових сонячних панелей?
36. Порівняйте недоліки і переваги моно- та полікристалічних сонячних батарей.
37. Назвіть складові елементи типової системи сонячного електропостачання.
38. Від чого залежить величина сонячної радіації, яка потрапляє на похилу площину?
39. Охарактеризуйте кут прямого сонячного випромінювання.

Література

14. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних і нетрадиційних джерел енергії України. НАН України, Інститут відновлюваної енергетики, Держ. ком. України з енергозбереження. Київ: 2005. 45 с.
15. Рей Д. Тепловые насосы. Москва: Энергоиздат, 1982. 224 с.
16. Кравчук В.І., Дубровін В.О. Технології та обладнання для використання поновлюваних джерел енергії в сільськогосподарському виробництві. Дослідницьке: УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого, 2010. 184 с.
17. Кудря С.О., Головка В.М. Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії. Київ: 2009. 201 с.
18. Драганов Б.Х., Бесараб О.С., Долінський А.А. Теплотехніка: підручник. Київ: фірма «Інкос», 2005. 400 с.
19. Драганов Б.Х., Іщенко В.В., Шеліманова О.В. Експлуатація теплоенергетичних установок і систем: підручник. Київ: Аграрна освіта, 2009. 230 с.
20. Лукутин Б.В., Муравлев О.В., Плотников И.А. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями. Томск: Издат. ТПУ, 2015. 128 с.
21. Городов Р.В., Губин В.Е., Матвеев А.С. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебное пособие. Томск: Издат. ТПУ, 2009. 294 с.
22. Дудюк Д.Л., Мазепа С.С., Гнатишин Я.М. Нетрадиційна енергетика – основи теорії та задачі: навчальний посібник. Львів: «Магнолія 2006», 2008. 188 с.

23. Дудюк Д.Л., Мазепа С.С. Нетрадиційні (відновні) джерела енергії: навчальний посібник. Львів: РВВ УкрДЛТУ, 2004. 68 с.
24. Ковальов О.І., Ратушний О.В. Альтернативні джерела енергії України: навчальний посібник. Суми: Вид-во СумДУ, 2015. 201 с.
25. Щербина О.М. Енергія для всіх: технічний довідник. Ужгород, 2000. 80 с.
26. Носенко Ю.М. Сучасні сонячні технології. Газета «Агробізнес сьогодні». 2012. № 18. С. 25–29.
27. Пинчук А.С. Использование солнечных коллекторов. Подбор и расчет. Журнал «Термометр». 2008. – № 1. С. 29–37.
28. Схемы солнечных установок. Журнал «Термометр». 2010. – № 6. С. 34–46.
29. Енергія довкілля. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження. URL: <http://saee.gov.ua/uk/ae/termo-energy>.
30. Photovoltaic Geographical Information System. Sunbird. URL: <http://sunbird.jrc.it/pvgis/>.
31. Типы солнечных коллекторов. Атмосфера. URL: <http://www.atmosfera.ua/geliosistemy/tipy-solnechnyx-kollektorov/>.
32. Сравнение монокристаллических и поликристаллических солнечных батарей. Солнечные батареи. URL: <http://www.solnechnye.ru/batareya/monokristallicheskie-polikristallicheskie-panely.htm>.
33. Home Systems. SMA Solar Technology AG and Danfoss. URL: <http://www.sma.de/en.html>.
34. Сонячні фотомодулі. НВПІ-"ЕКО СТ". URL: <http://ecost.lviv.ua/>.
35. Установка солнечных батарей. По теплу. URL: <http://1poteply.ru/radiator/ustanovki/skolko-nuzhno-solnechnyx-batarej-dlya-doma.html>.
36. Сонячні батареї та особливості використання. PrelProm. URL: <http://prel.prom.ua/a156550-sonyachn-batareyi-printsip.html>.
37. Инструкция по самостоятельной сборке солнечной батареи. Электросоветы. URL: <http://electroadvice.ru/montage/kak-sobrat-solnechnuyu-batareyu-iz-kitajskix-panelej/>.
38. Альтернативные источники энергии. Солнечная энергетика. URL: <http://www.energya.by/obzoryi/solnechnaya-energetika/>.
39. How Do Solar Panels Work And Other Important Solar Information. SunnectSolar. URL: <https://www.sunnectsolar.com/blog/>.
40. Verduurzaming stroomvoorziening. De Groene Energie Maatschappij. URL: <http://www.dgem.nl/nl/nieuws/2014/04/verduurzaming-stroomvoorziening-vs-zet-door>.