

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра екології та природозахисних технологій

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

зі спеціальності 183 “Технології захисту навколишнього середовища”

Тема: Еколого-технологічні рішення декарбонізації транспортного сектору шляхом застосування біопалива

Завідувач кафедри

Пляцук Л.Д.

(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Керівник роботи

Аблєєва І. Ю.

(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультанти:

з охорони праці

Васькін Р.А.

(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

з економічної частини

Павленко О.О.

(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Виконавець

студент групи

ТС.м-91/1 ТЗНС

Гуслєва А.О.

(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Суми 2020

Сумський державний університет  
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій  
Кафедра екології та природоохоронних технологій  
Спеціальність 183 «Технології захисту навколишнього середовища»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою \_\_\_\_\_

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Гуслевої Анастасії Олександрівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Еколого–технологічні рішення декарбонізації транспортного сектору шляхом застосування біопалива

затверджена наказом по університету від “23” жовтня 2020 р. № 1647–III

2. Термін здачі студентом закінченого проекту (роботи) 21 грудня 2020 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) патентна база щодо способів модернізації біогазу до біометану; кількісний склад викидів при спалюванні різних видів палива; хімічний склад біометану.

4. Зміст розрахунково–пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

вплив викидів від спалювання різних видів палива на атмосферу;

аналіз використання біометану як відновлювального замітника природного газу;

аналіз методів модернізації біогазу до біометану, оцінка ефективності їх застосування;

робота з інформаційними базами даних для моделювання удосконаленої технології отримання

біометану зі встановленням додаткового блоку метанізації;

рекомендації щодо застосування додаткового блоку метанізації вуглекислого газу задля отримання метану.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

технологічні схеми основних методів модернізації біогазу до біометану;

викиди парникових газів при спалюванні різних видів палива; технологічна схема очищення

біогазу до біометану методом адсорбції з додатковим блоком метанізації; схема адсорбера для

модернізації біогазу із зазначенням параметрів; таблиці SWOT–аналізу; витрати при

використанні різних видів палива

6. Консультанти по проекту (роботі), із значенням розділів проекту, що стосуються їх

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці			
Економічна частина			

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Літературний огляд за досліджуваною проблематикою	Травень 2020 р.	
2	Робота над розділом «Об'єкт та методи дослідження»	Вересень 2020 р.	
3	Методика дослідження якості та екологічної безпеки біометану	Жовтень 2020 р.	
4	Удосконалена технологія виробництва біометану	Листопад 2020 р.	
5	Інженерна методика розрахунку адсорбера	Листопад 2020 р.	
6	Робота над розділом «Охорона праці та захист у надзвичайних ситуаціях»	28.11.20	
7	Робота над економічною частиною	06.12.20	
8	Оформлення роботи	14.12.20	

7. Дата видачі завдання 1.09.2020 року

Студент \_\_\_\_\_

Керівник проекту \_\_\_\_\_

## РЕФЕРАТ

*Структура та обсяг випускної кваліфікаційної роботи магістра.*

Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, який містить 69 найменувань. Загальний обсяг кваліфікаційної роботи магістра становить 87 с., у тому числі 1 таблиця, 18 рисунків, 7 додатків, список використаних джерел на 6 сторінках.

*Мета роботи* – підвищення рівня екологічної безпеки комплексу «автомобіль – навколишнє середовище» шляхом скорочення викидів парникових газів за допомогою використання удосконаленої технології модернізації біогазу до біометану. Для досягнення зазначеної мети було поставлено та вирішено наступні *завдання*: проаналізувати процес отримання біометану; розглянути наявні методи очищення біогазу до біометану; з'ясувати найбільш ефективний спосіб отримання біометану; провести інженерний розрахунок технології очищення біогазу до біометану; визначити еколого–економічний ефект від впровадження запропонованої технології; зробити висновки та надати рекомендації щодо підвищення ефективності застосування біометану як автомобільного палива.

*Об'єкт дослідження* – зниження техногенного навантаження на довкілля та декарбонізація транспортного сектору у разі використання біопалива.

*Предмет дослідження* – оцінка ефективності запропонованого еколого–технологічного рішення щодо виробництва біометану та використання як палива для транспортного сектору.

*Методи дослідження*: інформаційні, аналітичні, SWOT–аналіз.

Запропоновано удосконалити технологію модернізації біогазу до біометану адсорбцією при змінному тиску зі встановленням додаткового блоку метанізації.

Ключові слова: АДСОРБЦІЯ ПРИ ЗМІННОМУ ТИСКУ, БІОГАЗ, БІОМЕТАН, БІОПАЛИВО, ВИКИДИ, МЕТАНІЗАЦІЯ, МЕТОДИ МОДЕРНІЗАЦІЇ, ПАРНИКОВІ ГАЗИ.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ЗА ДОСЛІДЖУВАНОЮ ТЕМАТИКОЮ ...	8
1.1 Порівняльний аналіз техногенного навантаження на атмосферне повітря від різних видів традиційного палива.....	8
1.2 Міжнародні угоди та шляхи декарбонізації транспортного сектору .....	13
1.3 Ступінь небезпеки викидів від спалювання біометану .....	15
1.4 Критичний аналіз технологій очищення біогазу до біометану .....	17
1.5 Постановка завдань дослідження .....	27
РОЗДІЛ 2 ОБ’ЄКТ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	28
2.1 Хімічний та екологічний аналіз біометану .....	28
2.2 Методи виробництва біометану .....	31
2.3 Методика дослідження якості та екологічної безпеки біометану .....	35
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	39
3.1 Удосконалена технологія виробництва біометану .....	39
3.2 Розрахунок ступеня екологічної безпеки біометану методом оцінки життєвого циклу.....	40
3.3 Інженерна методика розрахунку адсорбера.....	46
РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА .....	54
4.1 Еколого–економічний ефект від впровадження технології.....	54
4.2 Період окупності проєкту .....	58
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ У НС .....	61
5.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів на біогазовій установці .....	61
5.2 Надзвичайні ситуації мирного і воєнного часів та їх вплив на життєдіяльність людей.....	66
ВИСНОВКИ .....	71
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	72
ДОДАТКИ .....	78

Підп. і дата	
Інв. №дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. №подл.	

<i>ТС 19510169</i>								
	<i>Вип</i>	<i>Арк</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дат</i>			
	<i>Розроб.</i>	<i>Гуслева</i>				<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
	<i>Перев.</i>	<i>Аблеєва</i>					4	87
	<i>Н.Конт</i>	<i>Васькін</i>				<i>СумДУ, ф–т ТеСЕТ</i>		
	<i>Затв.</i>	<i>Пляцук</i>				<i>гр. ТС.м–91</i>		
<i>Еколого–технологічні рішення декарбонізації транспортного сектору шляхом застосування</i>								















**Забруднення навколишнього середовища  
автотранспортом**



Рисунок 1.1 – Шкідливий вплив автомобільного транспорту на навколишнє середовище

Найбільш шкідливими є фактори першої групи, а серед них – викиди шкідливих речовин автомобільними двигунами. Щоб довести вагомість шкідливого впливу автомобільного транспорту, як штучного джерела забруднення навколишнього середовища, достатньо навести такі дані: згідно різних досліджень, світовим парком автомобілів щорічно викидається в навколишнє середовище 480–800 млн. т CO, що становить біля 19 % світових викидів як природними, так і штучними джерелами; 19–29 млн тонн метану (7 %), 32–48 млн тонн інших вуглеводнів (4 %), 17–21 млрд тонн діоксиду вуглецю (2 %), 36–76 млн тонн діоксиду азоту (20–50 %), 162–198 млн тонн діоксиду сірки (45 %) [6].

За розрахунками вчених за всю свою історію автотранспорт спожив 170 млрд м<sup>3</sup> кисню і викинув в атмосферу 250 млрд м<sup>3</sup> CO, що складає 60–70 % від діяльності людини за остання 100 років.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № годл.	

Викиди автотранспортних засобів складають біля 40 % усіх шкідливих речовин, що потрапляють в атмосферу. Для ряду міст України (Київ, Львів, Чернівці, Полтава та інші) ця величина перевищує 70 % [2, 7–9].

Незважаючи на значне зменшення шкідливих викидів, їх величина залишається значною і складає близько 40 кг на кожного жителя України.

Під час роботи автомобільних двигунів внутрішнього згоряння джерелами викидів шкідливих речовин є:

- а) відпрацьовані гази;
- б) картерні гази;
- в) випаровування з системи живлення [10].

Серед цих джерел основним є відпрацьовані гази, які мають складний хімічний склад. До складу відпрацьованих газів входить понад 1000 різних шкідливих речовин, які негативно впливають на людину і довкілля, 200 з них розпізнано. Основними є: оксид вуглецю (CO), вуглеводні (загальна формула  $C_mH_n$ ), оксиди азоту (загальна формула  $NO_x$ ), альдегіди (загальна формула RCHO), сполуки сірки (основна – двооксид сірки  $SO_2$ ), тверді частинки (сажа – C), канцерогенні речовини, до яких належать складні ароматичні вуглеводні поліциклічної будови (основний елемент, якого найбільше, бенз(а)пірен –  $C_{20}H_{12}$ ), сполуки свинцю ( $PbO_4$ ). [11].

Вміст основних шкідливих речовин у відпрацьованих газах бензинових двигунів і дизелів наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Вміст основних шкідливих речовин у відпрацьованих газах бензинових і дизельних двигунів, т/добу [12]

Назва речовини	Вміст у відпрацьованих газах		Шкідливість
	Бензинові	Дизельні	
1	2	3	4
Двоокис вуглецю (CO <sub>2</sub> ), %	5,0–12,0	1,0–16,0	Парниковий газ
Оксид вуглецю (CO), %	0,5–12,0	0,005–0,4	Токсичний

Підп. і дата  
 Інв. № дубл.  
 Взаєм. інв. №  
 Підп. і дата  
 Інв. № годл.

Кінець табл. 1.1

1	2	3	4
Вуглеводні (CmHn), %	0,2–3,0	0,005–0,3	Токсичний
Оксиди азоту (NOx), %	0,01–0,8	0,004–0,05	Токсичний
Альдегіди (RCHO), %	0–0,2	0,001–0,009	Токсичний
Сажа, г/м <sup>3</sup>	0–0,04	0,01–1,1	Токсичний
Канцерогенні речовини (бенз(а)пірен), мкг/м <sup>3</sup>	0–20	0,05–1	Канцероген

## 1.2 Міжнародні угоди та шляхи декарбонізації транспортного сектору

### 1.2.1 Міжнародна співпраця у боротьбі зі змінами клімату

Боротьба зі зміною клімату є глобальним викликом, який вимагає широкої міжнародної співпраці, консенсус щодо якої знайшов відображення у низці послідовно укладених міжнародних угод: РКЗК ООН, Кіотському протоколі, Паризькій угоді. Ураховуючи те, що за допомогою інструментів, передбачених першими двома угодами, суттєвого скорочення викидів ПГ досягти не вдалося, 195 країн світу, у тому числі основні потужні економіки, уклали Паризьку угоду, яка набрала чинності 4 листопада 2016 р [13].

Відповідно до мети, що полягає в утриманні приросту глобальної середньої температури повітря в межах менше 2 °С від доіндустріального рівня, сторони Паризької угоди повинні збалансувати джерела викидів та поглинання ПГ у другій половині цього століття або фактично досягти чистих нульових глобальних викидів ПГ до 2100 р [14].

Цілі СНВР України відповідають глобальним цілям Паризької угоди, а спільні міжнародні дії матимуть вирішальне значення для їх досягнення. Міжнародне співробітництво сприятиме суттєвому зниженню витрат на декарбонізацію та створенню економічних можливостей для людей і підприємств, при цьому зменшуючи ризики та наслідки зміни клімату [15].

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 19510169

Арк

13

## 1.2.2 Шляхи переходу транспортного сектору на відновлювані джерела енергії

Транспортний сектор також все ще працює над енергетичним переходом. У глобальному масштабі частка його відновлюваної енергії становила лише 3 % у 2016 році. У рамках справи IRENA REmap (Міжнародне агентство з відновлюваних джерел енергії, англ. International Renewable Energy Agency), цей сектор значно збільшить електрифікацію пасажирських перевезень, особливо з тої причини, що водень, отриманий з відновлюваних джерел енергії, вводиться як транспортне паливо. Біопаливо та поєднання електрифікації і так званого газу Power-to-X призведуть до майже 70-відсоткового падіння споживання нафти у цьому секторі до 2050 року порівняно з 2016 роком. Із 2015 по 2050 рік частка електроенергії у всьому транспортному секторі зросте з трохи вище 1 % до 43 %, з яких повністю 86 % буде відновлюваною. Крім того, у той же період біопаливо збільшить свою частку з трохи нижче 3 % приблизно до однієї третини. Аналогічно, справа IRENA REmap також передбачає 1 мільярд пасажирських електромобілів до 2050 року [16].

Щоб досягти цього, більшість легкових автомобілів, що продаються приблизно з 2040 року, повинні бути електричними. У справі REmap, хоч близько половини пасажирських транспортних засобів до 2050 року буде електричним, близько 75 % функціонування легкових автомобілів (пасажирських кілометрів) забезпечуватимуть електромобілі.

Здійснення трансформації у справі IRENA REmap потребує майже 14 трильйонів доларів загального обсягу інвестицій у транспортний сектор до 2050 року. Близько 2 трильйонів доларів США знадобляться для розвитку галузі виробництва біопалива (переважно вдосконаленого біопалива) та 0,5 трильйона доларів США на водень [17].

Декарбонізація транспортного сектору є ключовою для декарбонізації енергетичного сектору. Це величезне завдання, яке вимагає кардинальних змін у характері та структурі загального транспортного сектору. Цей перехід вимагає

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат

ТС 19510169

Арк

14





Згідно з усіма трьома сценаріями викидів WTT, загальні викиди парникових газів від транспортних засобів на природному газі вищі, ніж для еквівалентних звичайних дизельних автомобілів. Для шарнірних вантажівок покарання за викиди є меншим, ніж для інших дизельних транспортних засобів, оскільки ці автомобілі мають подвійні паливні двигуни. Тільки бензинові легкові автомобілі демонструють стабільні переваги від переходу на природний газ. Однак навіть ці переваги можуть бути втрачені, якщо суттєво покращиться ефективність роботи бензинових двигунів (наприклад, ширше використання гібридних бензиново–електричних транспортних засобів, які вже мають значно менші викиди CO<sub>2</sub>, ніж звичайні бензинові автомобілі) [19].

Щодо біометану картина зовсім інша: для всіх типів транспортних засобів та за всіх трьох сценаріїв існують дуже великі переваги викидів WWT, пов'язані із переходом від бензину або дизеля до біометану.

Ця різниця повністю обумовлена біогенною природою викидів CO<sub>2</sub>, що виділяються при спалюванні біометану, отриманого з органічних відходів; біогенні викиди CO<sub>2</sub> з відновлюваних видів палива не сприяють зміні клімату і, отже, з точки зору бухгалтерського обліку вони вважаються нульовими. Зверніть увагу, що викиди CO<sub>2</sub> при спалюванні біометану, отриманого з енергетичних культур, також будуть нульовими, оскільки ці викиди є частиною короткострокового вуглецевого циклу, а отже, не вважаються внеском у зміну клімату. Однак використання енергетичних культур може призвести до збільшення непрямих змін землекористування. Питання викидів CO<sub>2</sub> при спалюванні біометану, отриманого з деревини, є менш чітким, оскільки ресурси лісового господарства не є частиною короткострокового вуглецевого циклу, а отже, ці викиди можуть бути чистим фактором, що призводить зміні клімату [20].

Отже, результати цього аналізу для сектору автомобільного транспорту вказують на те, що є дуже обмежені переваги викидів парникових газів WTW (Well-to-Wheels – від свердловини до коліс), пов'язані з використанням

Підп. і дата
Інв. № дубл.
Взаєм. інв. №
Підп. і дата
Інв. № подл.

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат

ТС 19510169

природного газу на основі викопних матеріалів у дорожніх транспортних засобах (тобто є лише переваги при заміні негібридного бензинового автомобіля на автомобіль, що працює на СПГ (стиснений природний газ)), але при використанні біометану пов'язані великі переваги викидів WWT.

#### 1.4 Критичний аналіз технологій очищення біогазу до біометану

Основним процесом, що бере участь у підвищенні якості біогазу до біометану, є поділ  $\text{CH}_4$  і  $\text{CO}_2$ . На ринку існує кілька технологій модернізації, які використовувалися і вдосконалювалися протягом багатьох років.

Традиційні методи модернізації біогазу можна класифікувати наступним чином [21]:



Мембранна сепарація;



Абсорбційні методи:

- Очищення водою під тиском;
- Фізичне очищення;
- Хімічне очищення;



Адсорбція при змінному тиску (АЗТ);



Кріогенне розділення.

Метою всіх модернізаційних технологій є досягнення високої чистоти метану і низьких втрат метану при низькому енергоспоживанні.

Найбільша частка систем модернізації – 41 % – припадає на очищення водою, яка використовується на 123 установках в Європі. Хімічне очищення використовується на 77 об'єктах і становить 25 %, за нею слід адсорбція при змінному тиску із часткою 18 % (використовується на 53 установках), мембранна сепарація (8 %) і фізичне очищення (7 %). Кріогенне розділення використовується тільки на декількох заводах в Європі. Загальний обсяг виробництва біометану в Європі в 2015 році склав 1,23 млрд  $\text{m}^3$ . Загальна

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат	ТС 19510169	Арк
						17

потужність модернізації сировинного газу в Німеччині до кінця 2016 року зросла до 201265 м<sup>3</sup> на годину, що відповідає приблизно 910 м<sup>3</sup> модернізованого біометану [22].

Кожен зі згаданих методів має свої переваги та недоліки. Найкращий вибір технології обробки завжди повинен ґрунтуватися на місцевих умовах.

Однак завжди слід брати до уваги той факт, що СН<sub>4</sub> має вплив на глобальне потепління приблизно в 25 разів вище, ніж СО<sub>2</sub>. Оскільки захист клімату є основною мотивацією для виробництва біометану, а біометан, як правило, залежить від державної або соціальної підтримки, викиди метану в навколишнє середовище повинні підтримуватися на мінімально можливому рівні. Наприклад, у Німеччині викиди метану, також відомі як «втрати метану», повинні становити менше 0,2 об. % від обсягу процесу модернізації біометану. Якщо вміст метану у відпрацьованих газах у процесі модернізації перевищує граничне значення, СН<sub>4</sub> необхідно перетворити на СО<sub>2</sub>, який має більш низький потенціал глобального потепління [23]. Для забезпечення відповідності цим правилам відпрацьовані гази можуть рециркулювати через модернізуючу систему або використовувати паливні пристрої з низьким рівнем газу, як при регенеративному тепловому окисненні (РТО).



Рисунок 1.2 – Поширення технологій модернізації біогазу в Європі (Статистичний звіт ЄБА, 2016 [24])

Підп. і дата	
Інв. №дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. №подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

#### 1.4.1 Мембранна сепарація

Методи мембранної сепарації засновані на принципі, що гази дифундують через мембрани з різною швидкістю. У якості мембран можуть бути використані різні полімери.

Хороша мембрана дуже проникна для менших молекул, таких як  $\text{CO}_2$ , і непроникна для більших молекул, таких як  $\text{CH}_4$ . Мета полягає в тому, щоб досягти максимально можливої проникності з високою селективністю. Для мембран, які зазвичай використовуються, проникність  $\text{CO}_2$  приблизно в двадцять разів вище, ніж  $\text{CH}_4$ .

Мембрани, як правило, формуються у полімери з порожнистими волокнами, які поєднуються в трубчастий пучок для забезпечення максимальної площі поверхні. Коли в трубку продувається необроблений біогаз, такі газові компоненти, як  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  та  $\text{H}_2\text{S}$ , які добре дифундують крізь стінку волокна, виводяться за межі порожнистого волокна.  $\text{CH}_4$  і  $\text{N}_2$  залишаються всередині. Мембрани дуже тонкі (близько 0,1–0,2 мкм) і, отже, нестійкі. Корпус трубки захищає мембрани, запобігає згинанню і таким чином забезпечує оптимальну форму [25].

Методи мембранної сепарації доступні в різноманітних конструкціях. Типовий робочий тиск становить від 7 до 20 бар. Для досягнення високої чистоти метану пучки труб часто з'єднують у двоступеневі або треступеневі каскади. Двоступеневий каскад означає, що біогаз відокремлюється в початковій колоні. Вихлопні гази здуваються. Потім збагачений метаном газоподібний продукт, який все ще містить  $\text{CO}_2$ , подається в другу колону, в якій  $\text{CO}_2$  додатково дифундує. Це призводить до більш високої концентрації  $\text{CH}_4$  в газоподібному продукті.  $\text{CH}_4$  також дифундує через мембрану, викликаючи втрати метану у вихлопних газах, які повинні бути перетворені в  $\text{CO}_2$  [26].

Процес мембранної сепарації значно покращився за останні 10 років. Початкові проблеми, такі як високі втрати тиску з надмірною потребою в енергії, великі втрати метану або обмежений термін служби мембрани, були в

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат

ТС 19510169

основному вирішені. Для захисту мембран проводять дрібну десульфурацію та сушку перед тим, як газ потрапляє в порожнисте волокно.

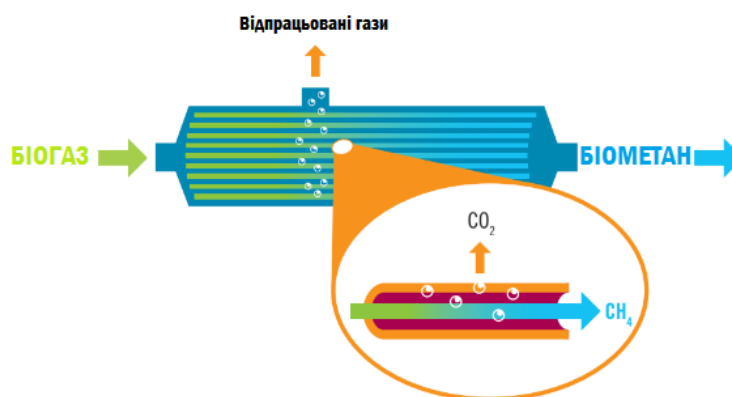


Рисунок 1.3 – Фізико–технічний принцип мембранної сепарації

#### 1.4.2 Абсорбційні методи

Абсорбція, базується на ефекті, завдяки якому компоненти газу в різній мірі розчиняються в різних рідинах. Наприклад,  $\text{CO}_2$  розчиняється у воді набагато краще, ніж  $\text{CH}_4$ .

Найважливіші впливові змінні в процесах очищення зумовлені властивостями розчинників, які використовуються, та розчинністю газових компонентів. Загалом, розчинність газу покращується зі збільшенням тиску або зниженням температури.

У цьому пункті принципи проектування, що беруть участь у процесі очищення, пояснюються загальними словами, на прикладі очищення води під тиском. Подальші пункти описують властивості інших розчинників.

Фізичні методи очищення засновані на фізичній розчинності газових компонентів у промивному розчині без хімічної реакції.

Вода використовується як розчинник у методі очищення водою під тиском. Оскільки у воді під тиском розчиняється набагато більше  $\text{CO}_2$ , очищення води зазвичай відбувається під тиском від 4 до 10 бар.

Використовується висока обтиральна колона, в яку зверху розпорощується вода, схожа на душ. Біогаз спрямований вгору від дна промивної колони.

Підп. і дата
Інв. № дубл.
Взаєм. інв. №
Підп. і дата
Інв. № подл.

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----





значно міцнішим, ніж у випадку фізичного чищення. Як миючий засіб зазвичай використовують суміші води з добавками моноетаноламін (МЕА), діетаноламін (ДЕА), метилдіетаноламін (МДЕА) та інші аміносполуки. Переваги полягають у вищому завантаженні розчину, вищій селективності розділення газу і, отже, у вищій чистоті одержуваного газу. Тому обробка збідненого газу не є необхідною, але перед деструкцією повинна проводитися тонка десульфуріяція.

Промивні колони можна експлуатувати практично при атмосферному тиску. Однак вища міцність зв'язування негативно впливає на процес регенерації амінного розчину. Для регенерації його потрібно нагріти до приблизно 110 – 160 °С, а потім охолодити до 40 °С, щоб мати можливість знову поглинати газу, перш ніж повернутися до промивної колони. Частина тепла може бути витягнута за допомогою теплообмінників і використана зовні, наприклад, для нагрівання котла [28].

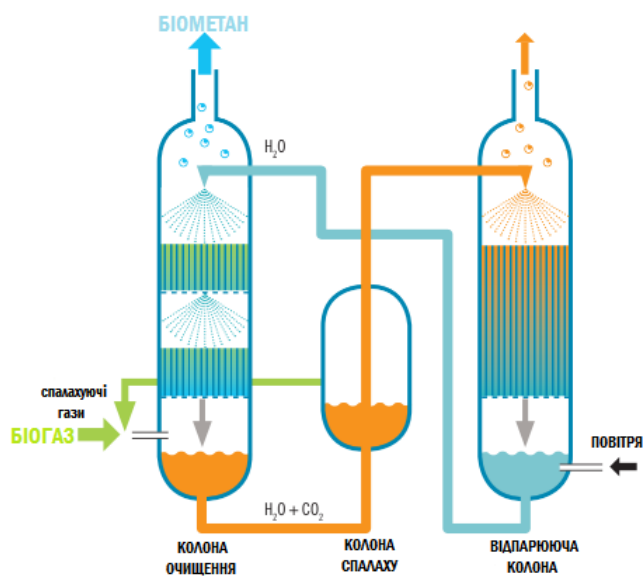


Рисунок 1.4 – Технічна схема технологій абсорбування

### 1.4.3 Адсорбція при змінному тиску (АЗТ)

Адсорбційні методи засновані на принципі, згідно з яким різні газові компоненти по-різному притягуються до конкретних поверхонь (адсорбуються) або різною мірою проникають у пори матеріалу.

Підп. і дата
Інв. №дубл.
Взаєм. інв. №
Підп. і дата
Інв. №подл.

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат	ТС 19510169	Арк
						23





газів у газовому пальнику та використання тепла, наприклад для нагрівання варильного котла.

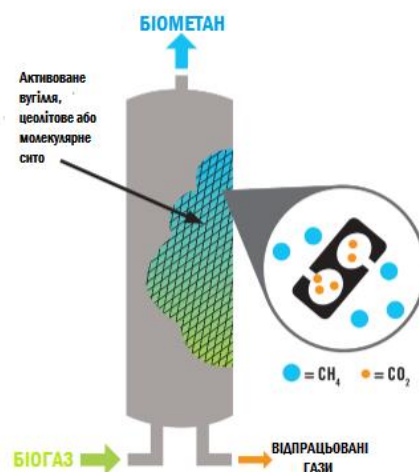


Рисунок 1.5 – Фізико–технічний принцип адсорбції при змінному тиску (АЗТ)

#### 1.4.4 Кріогенне розділення

На додаток до добре усталених та перевірених технологій обробки, описаних вище, є і новітні розробки, готовність яких до ринку ще не повністю встановлена. Цікавим варіантом є кріогенне розділення.

Його принцип роботи коротко описаний нижче. Оскільки існують різні кріогенні методи та мало перевіряються фактичні дані, докладний опис процесу і найменування конкретних робочих параметрів (таких як енергоспоживання) тут опущені, але наступний текст пояснює кілька основних принципів, пов'язаних з цим.

Кріогенна обробка заснована на тому, що при низьких температурах або високому тиску газу конденсуються (стають рідкими) або повторно сублімуються (стають твердими). Температури або тиски, при яких це відбувається, можна знайти на фазовій діаграмі. Наприклад,  $\text{CO}_2$  повторно сублімується при  $-78,5^\circ\text{C}$  при 1 барі, тоді як  $\text{CH}_4$  залишається газоподібним. Газові компоненти біогазу можна розділити в різних станах речовини [31].

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № годл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат	ТС 19510169	Арк
						25

Діаграма фаз показує, що існує безліч варіантів регулювання температури та тиску для проведення поділу. Отже, існують різні процедурні підходи для криогенного розділення. Криогенне розділення також можна поєднувати з іншими методами обробки. Критична точка позначає термодинамічну кінцеву точку кривої температурного тиску, за якою немає різниці між рідкою та газовою фазами.

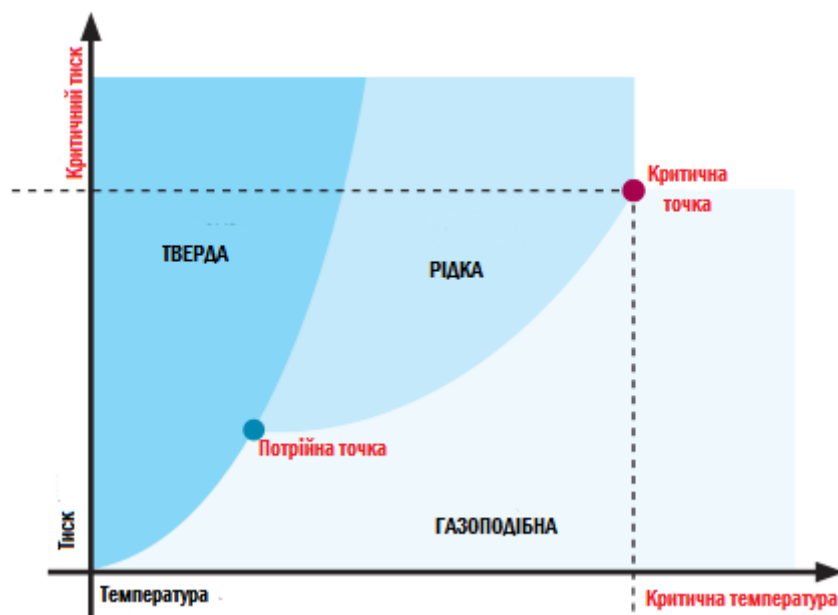


Рисунок 1.6 – Діаграма фаз, що стосується криогенного розділення

Фактичне розділення відбувається за допомогою ректифікації (протиструмова дистиляція). Дуже чистий  $\text{CH}_4$  (до 99,9 об %) можна видалити з верхньої частини колони, тоді як  $\text{CO}_2$  з чистотою приблизно 98 об. % можна взяти з піддону колони [32].

#### 1.4.5 Аналіз наведених технологій очищення біогазу

Щоб порівняти представлені вище технології та виділити найбільш ефективну, було проведено SWOT-аналіз, який дає змогу виявити ті сильні і слабкі сторони, можливості та загрози, які потребують найбільшої уваги і зусиль [33].

Таблиці проведення даного аналізу наведено у Додатках Б-Д.

Інв.№подл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата	Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат	ТС 19510169	Арк
											26









виробництво та використання палива, але й викиди автомобіля під час виробничого процесу та під час переробки після закінчення терміну експлуатації, в Європі чи за кордоном, що дає найбільш точний вплив з точки зору викидів CO<sub>2</sub>. Крім того, вимірювання LCA дозволяють застосовувати інші категорії впливу на навколишнє середовище [42].

## 2.2 Методи виробництва біометану

Адсорбція з коливанням тиску (АЗТ) – це добре налагоджена техніка поділу газу при поділі повітря, сушінні газу та очищенні водню. Не так давно технологію АЗТ почали застосовувати в інших областях, таких як очищення метану від природного газу та біогазу, і має величезний потенціал для розширення її використання. Відомо, що адсорбуючий матеріал, що використовується в процесі АЗТ, надзвичайно важливий для визначення його властивостей, але також було продемонстровано, що технологія самого процесу може значно покращити експлуатаційні властивості АЗТ [43].

В установці АЗТ для модернізації біогазу адсорбуючий матеріал піддається змінам тиску для вибіркової адсорбції та десорбції CO<sub>2</sub>. Адсорбція – це екзотермічний спонтанний процес. Завантаження CO<sub>2</sub> в адсорбенті залежить конкретно від властивостей використовуваного матеріалу (площі поверхні та складу, розміру пор тощо). Як тільки матеріал точно визначений, слід здійснити його регенерацію. Оскільки матеріал постійно використовується та регенерується, настає момент, коли процес досягає “циклічного стаціонарного стану” (ЦСС). Найбільша частина проектування процесу АЗТ покладається на розробку протоколу регенерації для адсорбенту, здатного витратити невелику кількість енергії (зменшити енергетичний штраф) і робити це якнайшвидшим способом (збільшити продуктивність).

Принцип роботи процесу АЗТ можна спостерігати на малюнку 2.1, де показано дві загальні ізотерми CO<sub>2</sub> (що представляють два різних матеріали). У обох матеріалах адсорбент може приймати CO<sub>2</sub> до завантаження, встановленого

Інв.№подл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата						Арк
										31
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	ТС 19510169					



його парціальним тиском на етапі подачі ( $P_{\text{под}}$ ), який є  $q_{\text{под}1}$  та  $q_{\text{под}2}$  для адсорбентів 1 та 2, відповідно. Після насичення адсорбенту його регенерують до нижчого тиску,  $P_{\text{рег}}$ , де навантаження  $\text{CO}_2$  зменшується до  $q_{\text{рег}1}$  і  $q_{\text{рег}2}$ . Матеріал 1 має вищу ємність  $\text{CO}_2$ , ніж матеріал 2, для всього діапазону тиску. Однак різниця в навантаженні між  $q_{\text{под}}$  та  $q_{\text{рег}}$  ( $\Delta q$ ) вища для матеріалу 2, що вказує на те, що «циклічна ємність» буде кращою для цього матеріалу. Насправді висновок із цього зображення полягає в тому, що важливо знати форму ізотерми, щоб розробити процес АЗТ. Крім того, в ідеалі для застосувань АЗТ лінійні або помірні нелінійні ізотерми кращі, ніж дуже круті ізотерми з великим навантаженням. Крім того, коли ізотерми круті, регенерувати адсорбент важче, оскільки енергія, необхідна для десорбції  $\text{CO}_2$ , вища. Із рис.2.1 видно, що вибір тиску регенерації також має важливий ефект у циклічній роботі процесу АЗТ [44].

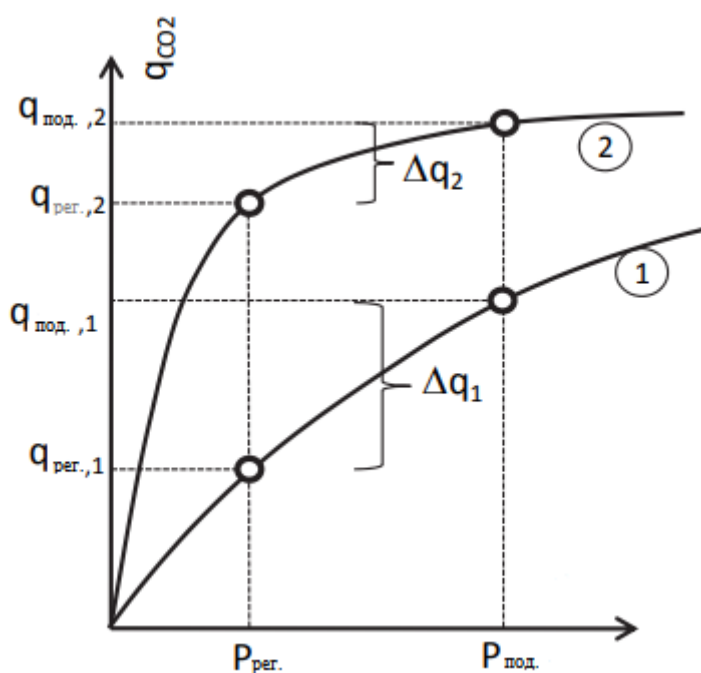


Рисунок 2.1 – ізотерми  $\text{CO}_2$  для двох різних матеріалів (1) та (2), що вказують на парціальний тиск  $\text{CO}_2$  на етапі подачі та при тиску регенерації (низький)

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----



металами. У цьому матеріалі діаметр пір може регулюватися з різними температурами нагрівання, що призводить до ефекту «молекулярних воріт», що фактично називає процес комерціалізований компанією Guild Associates Inc. (США) [45].

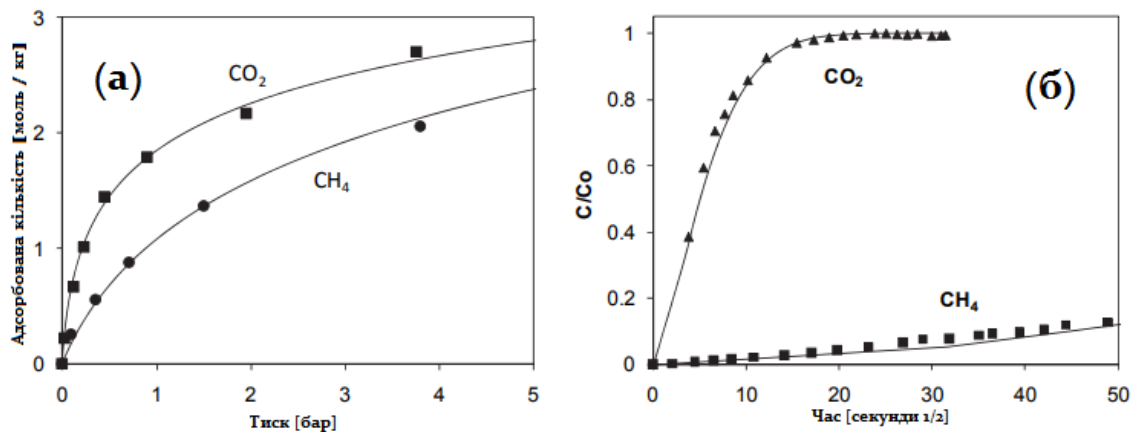


Рисунок 2.2 – Адсорбція CO<sub>2</sub> та CH<sub>4</sub> у молекулярному ситі вуглецю CMS–3К при 25 ° С: (а) адсорбційна рівновага; (б) криві швидкості поглинання

Інші зазвичай використовувані адсорбенти – це активоване вугілля та цеоліти. У цих матеріалах дифузія обох газів може бути дуже швидкою, і власне те, що використовується, це різниця між навантаженнями CO<sub>2</sub> і CH<sub>4</sub>. Приклад цих рівноважних матеріалів наведено на рис. 2.3, де показано адсорбційну рівновагу CO<sub>2</sub> та CH<sub>4</sub> на цеоліті 13X. Варто звернути увагу, що навантаження CO<sub>2</sub> набагато вище, ніж навантаження CH<sub>4</sub> за певних умов P, T. Більше того, переглядаючи висновки, зроблені з рис. 2.1, циклічна ємність CO<sub>2</sub> при нижчих температурах менша, ніж при більш. високих температурах, а це означає, що якщо цеоліт 13X використовувати при 50 ° С, його буде легше регенерувати, ніж при 25 ° С [46].

Іншою темою, яка є важливою для вибору матеріалів для процесу АЗТ для модернізації біогазу, є наявність забруднень. Окрім CH<sub>4</sub> і CO<sub>2</sub>, іншими газами, присутніми в біогазі, є H<sub>2</sub>S та H<sub>2</sub>O. Практично у всіх адсорбентах H<sub>2</sub>S незворотно адсорбується, тому його доводиться видаляти перед процесом АЗТ. При використанні вуглецевих матеріалів можна видаляти H<sub>2</sub>O в тій же посудині,

Підп. і дата	
Інв. №дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. №подл.	

що і  $\text{CO}_2$ . Однак це неможливо за допомогою цеолітів, оскільки адсорбція води також дуже стрімка, що призводить до дуже складної десорбції.

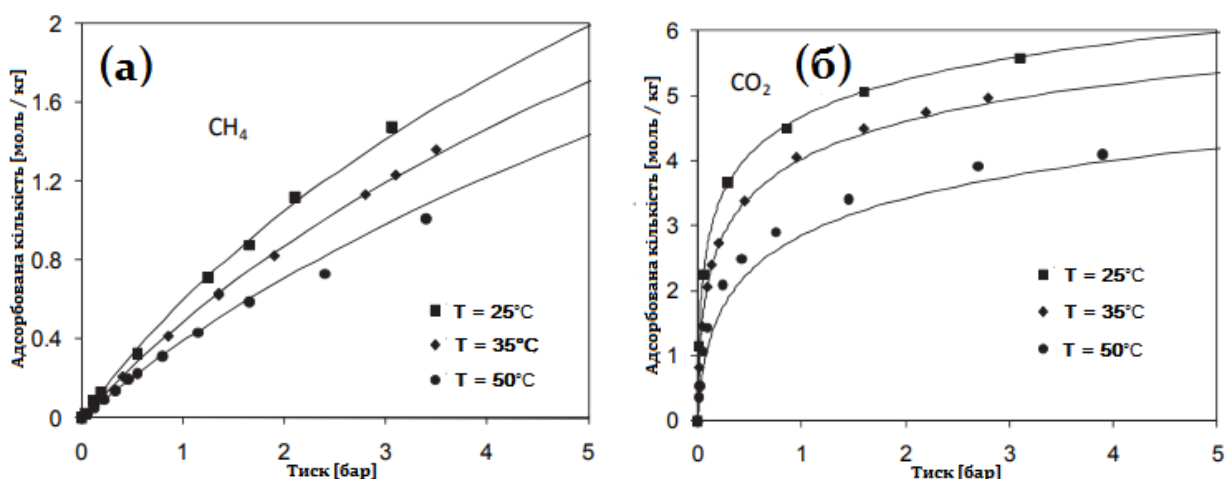


Рисунок 2.3 – Адсорбційна рівновага  $\text{CO}_2$  (а) та  $\text{CH}_4$  (б) на цеоліті 13X при  $25^\circ\text{C}$ ,  $35^\circ\text{C}$  та  $50^\circ\text{C}$ .

## 2.3 Методика дослідження якості та екологічної безпеки біометану

### 2.3.1 Оцінка життєвого циклу

Дослідження якості та екологічної безпеки біометану, як і будь-якого іншого палива, краще всього проводити за допомогою оцінки життєвого циклу.

Оцінка життєвого циклу (Life Cycle Assessment (LCA)) – це стандартизована аналітична методологія, яка досліджує та оцінює вплив продукту чи процесу на навколишнє середовище протягом усього його життєвого циклу. Оцінка базується на надійності та прозорості у визначенні мети та обсягу LCA, зборі даних (аналіз запасів), оцінці потенційних впливів (оцінка впливу) та інтерпретації, що є чотирма основними етапами LCA (рис. 2.4) [47]. Стандарти для різних етапів LCA надані Міжнародною організацією зі стандартизації (ISO) у ISO 14040 (2006) та 14044 (2006). Загальний підхід у LCA полягає у розгляді ширших наслідків для навколишнього середовища продукту чи процесу, прагнучи врахувати використані ресурси та викиди від усього життєвого циклу, щоб отримати більш

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

повну оцінку загальних наслідків або порівняти різні вплив на довкілля різних систем, продуктів та послуг.

Чотири основні етапи LCA (визначення мети та сфери застосування, аналіз інвентаризації, оцінка впливу, інтерпретація) застосовуються в ітераційному процесі, що означає, що всі чотири залежать і піддаються впливу кожного кроку. Першим кроком LCA є визначення мети та сфери застосування. На етапі інвентаризації будується модель життєвого циклу та проводяться розрахунки вироблених викидів та споживаних ресурсів. Дані, зібрані на етапі інвентаризації, пов'язані з різними впливами на навколишнє середовище на етапі оцінки впливу. Протягом усього процесу робляться інтерпретації, і нарешті можна виявити потенційні наслідки [48].

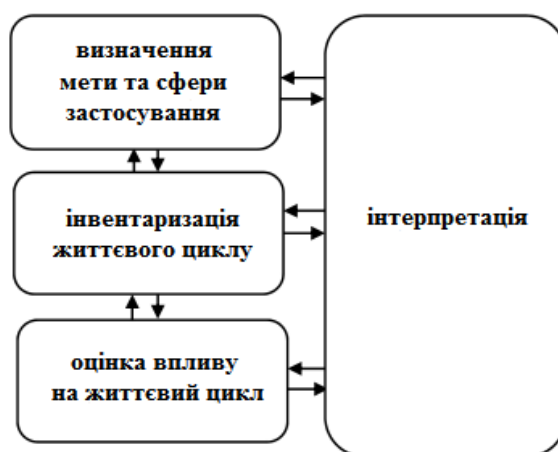


Рисунок 2.4 – Чотири етапи оцінки життєвого циклу (LCA) на основі стандартів ISO 14040 та ISO 14044.

Для порівняння різних впливів на навколишнє середовище у дослідженні LCA створено функціональну одиницю, до якої пов'язані всі ресурси та викиди. Продукти та процеси у досліджуваній системі повинні відповідати обраній функціональній одиниці, щоб вважатися еквівалентними.

Багато процесів сприяють більш ніж одному товару, як багатофункціональні процеси або взаємопов'язані системи продуктів. Більше того, відходи або побічні продукти товарної системи можуть виступати

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----





## РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 3.1 Удосконалена технологія виробництва біометану

Задля отримання чистого біометану, необхідно провести модернізацію біогазу тим методом, який обраний у Розділі 1, а саме адсорбція при змінному тиску. При використанні даного методу отримання біометану утворюється достатня кількість побічного продукту  $\text{CO}_2$  (15–50 % від вхідної маси). Саме тому пропонується встановлення додаткового блоку метанізації  $\text{CO}_2$  за допомогою водню (рис. 3.1). Цей процес дозволяє отримувати додаткову кількість метану  $\text{CH}_4$  для подальшого використання.

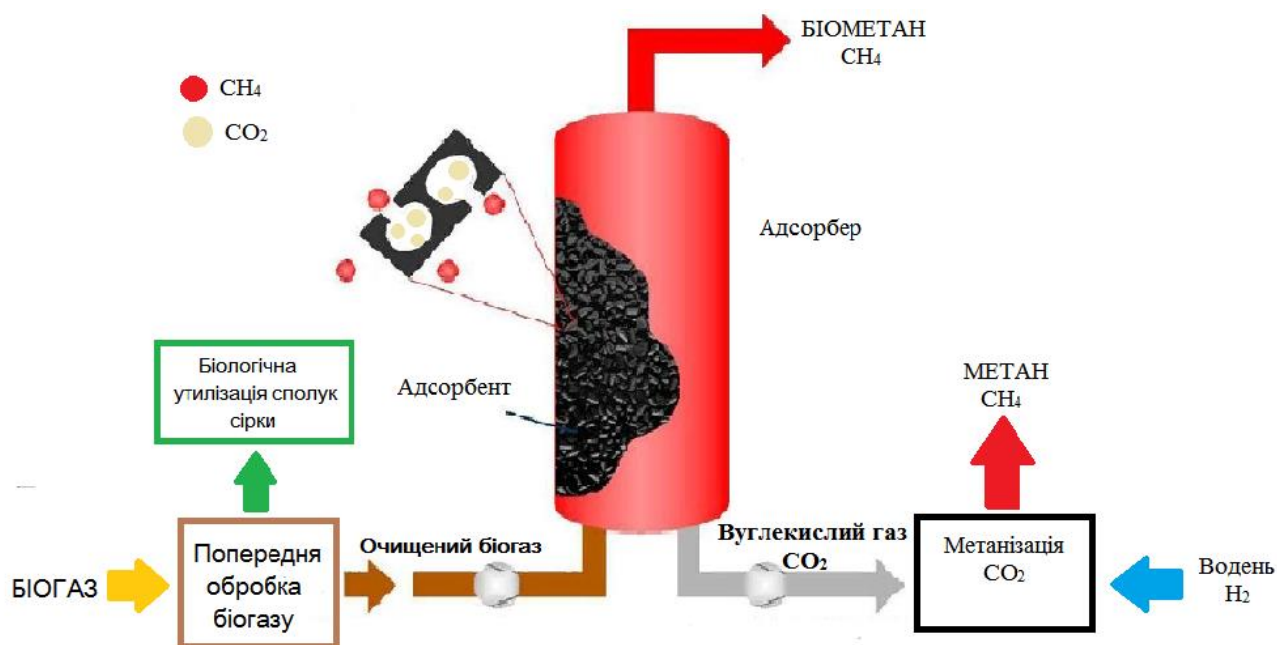


Рисунок 3.1 – Технологічна схема очищення біогазу до біометану методом адсорбції з додатковим блоком метанізації

Суть застосування технології адсорбції при змінному тиску з додатковим блоком – метанізацією  $\text{CO}_2$  за допомогою водню: комплексні роботи по очистці та модернізації біогазу, які складаються із 3-х складових, а саме:

Підп. і дата
Інв. № дубл.
Взаєм. інв. №
Підп. і дата
Інв. № подл.

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 19510169

Арк

39





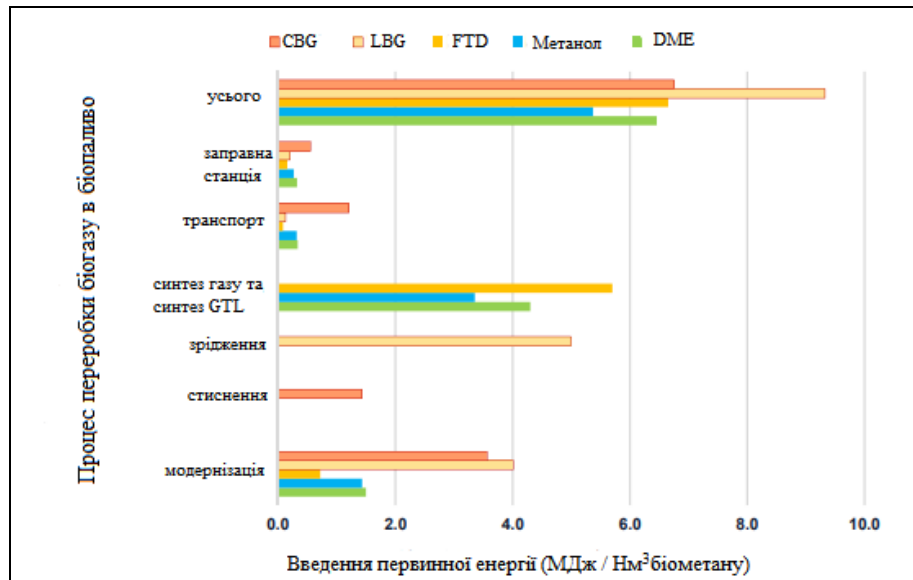


Рисунок 3.2 – Вхід первинної енергії (біометан МДж / Нм<sup>3</sup>) для процесів переробки біогазу до біопалива (CBG – стислий біометан, LBG – зріджений біометан, FTD – дизель Фішера–Тропша, DME – диметиловий ефір, GTL – газ–рідина)

Виробництво тепла під час синтезу палива GTL рециркулюють і використовують для модернізації біогазу за допомогою амінного абсорбера. Амінний абсорбер вимагає менших витрат електроенергії (0,4–1,0 МДж / Нм<sup>3</sup> біогазу) на стадії модернізації палива GTL порівняно з очищувачами води у сценаріях CBG та LBG. Абсорбери для води працюють під високим рівнем тиску, що вимагає високої електроенергії введення (0,9–1,0 МДж / Нм<sup>3</sup> біогазу) порівняно з аміними абсорберами.

Найвищі витрати енергії серед досліджуваного біопалива пов'язані з виробництвом LBG. У сценарії LBG модернізацію газу проводиться водяним абсорбером, а також додатковою стадією полірування CO<sub>2</sub> та зрідженням, що призведе до найбільших витрат енергії серед різних досліджуваних систем. У сценарії CBG модернізація та стиснення представляли найбільшу частку споживання первинної енергії. Транспорт та заправка транспортних засобів роблять невеликий внесок у розвиток загального споживання первинної енергії в різних сценаріях. Споживання енергії на транспорт CBG є найвищим серед усіх

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

досліджуваних біопалив в результаті низької щільності газу та високої частки сталі порівняно з кількістю газу, що транспортується. Заправні станції для CBG та LBG є енергоємними, оскільки передбачається, що вони розподіляють біометан під високим тиском (> 250 бар) (рис. 3.2) [53].

Газо-рідке паливо має відносно менший загальний вплив на клімат у порівнянні з іншими біопаливами, які були розглянутими (рис. 3.3). Це відбувається головним чином завдяки використанню амінного абсорбера як технології модернізації. Рівні втрат метану в амінному абсорбері (0,1 %) відповідають 0,2 г CH<sub>4</sub> / кВт · год біометану у сценаріях GTL, тоді як втрати метану у водному абсорбері (1 %) відповідають 1,2 г CH<sub>4</sub> / кВт · год біометану у сценаріях CBG та LBG.

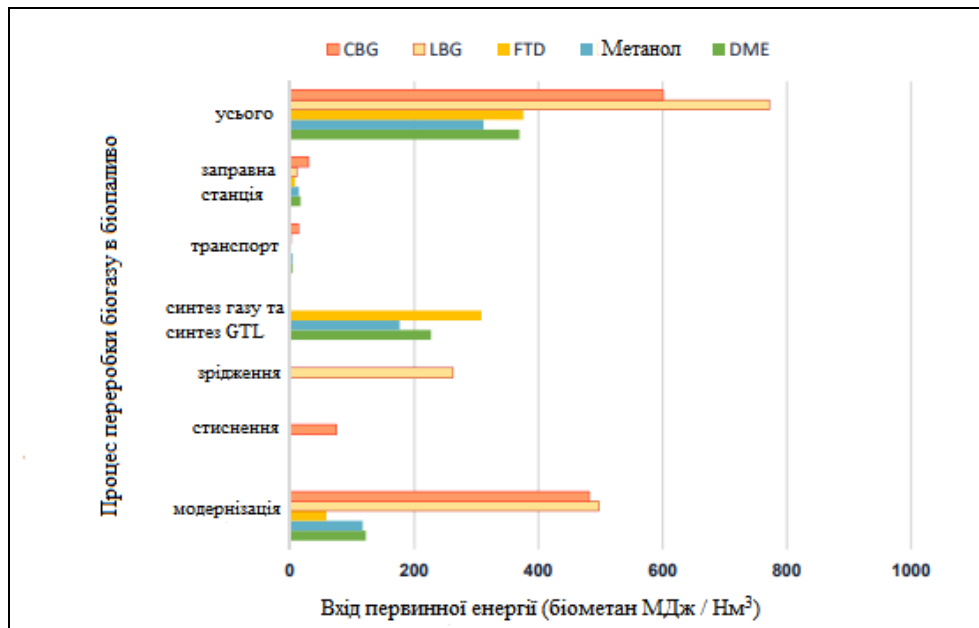


Рисунок 3.3 – Вплив на клімат (г CO<sub>2</sub>-екв. / Нм<sup>3</sup> біометану) від біогазу до процесів установки біопалива (CBG – стислий біометан, LBG – зріджений біометан, FTD – дизель Фішера–Тропша, DME – диметилловий ефір, GTL – газ-рідина)

Однак енергія та викиди, пов'язані із етапом синтезу синтетичного газу та палива, у сценаріях GTL, особливо для FTD, є відносно високими. Немає

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----



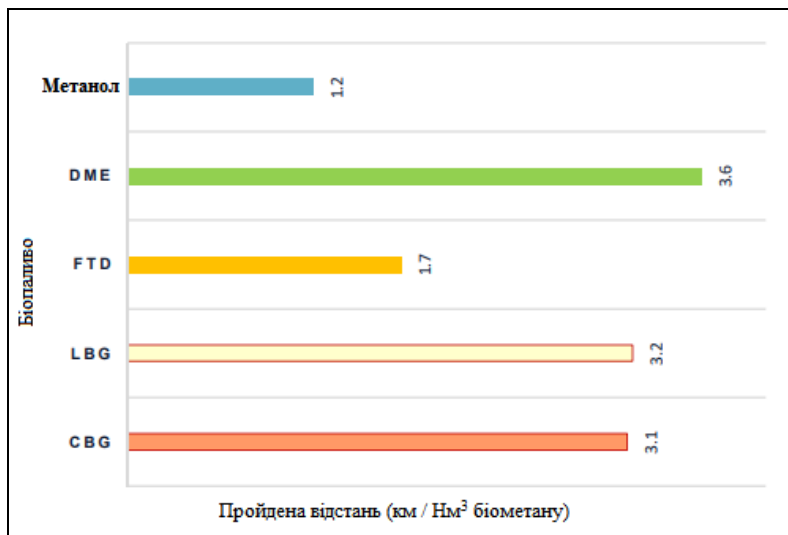


Рисунок 3.4 – Пройдена відстань (км / Nm<sup>3</sup> біогазу) досліджуваним біопаливом, отриманим з біогазу (CBG – стислий біометан, LBG – зріджений біометан, FTD – дизель Фішера–Тропша, DME – диметилловий ефір, GTL – газ–рідина)

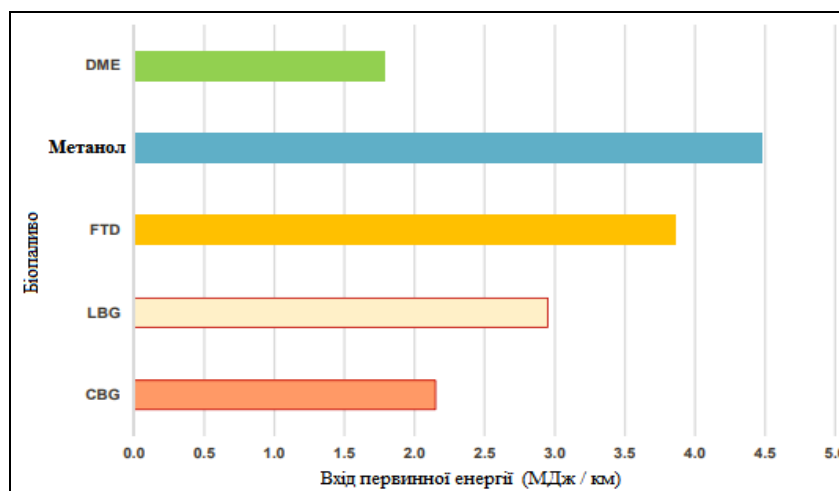


Рисунок 3.5 – Вхід первинної енергії (ПЕ) (МДж) на одиницю відстані (км), пройдений різними досліджуваними біопаливами (CBG – стислий біометан, LBG – зріджений біометан, FTD – дизель Фішера–Тропша, DME – диметилловий ефір, GTL – газ–рідина)

На рисунку 3.6 показано вплив клімату на пройдену відстань (г CO<sub>2</sub>-екв / км) різних видів палива, згаданих вище, включаючи викиди парникових газів, пов'язані з виробничим процесом. Викиди парникових газів від фази

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № роздл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

згоряння палива вважаються нейтральними до клімату, оскільки вони мають біогенне походження. Як видно з рис. 3.6, DME має найкращі показники з точки зору впливу клімату на пройдену відстань у км, включаючи викиди парникових газів завдяки виробництву біопалива та викиди, пов'язані із згорянням двигуна. Метанол має найвищі викиди парникових газів на пройдену відстань через низьку щільність енергії. Дизель Fischer Tropesch – це паливо з високою щільністю енергії, але через низький вихід палива на стадії виробництва кінцевий вплив на клімат є вищим [56]. Загалом, беручи до уваги енергетичну ефективність та вплив клімату на перетворення вхідного біометану на біопаливо та ефективність використання біопалива, DME показав найкращі результати серед різних досліджених сценаріїв перетворення палива.

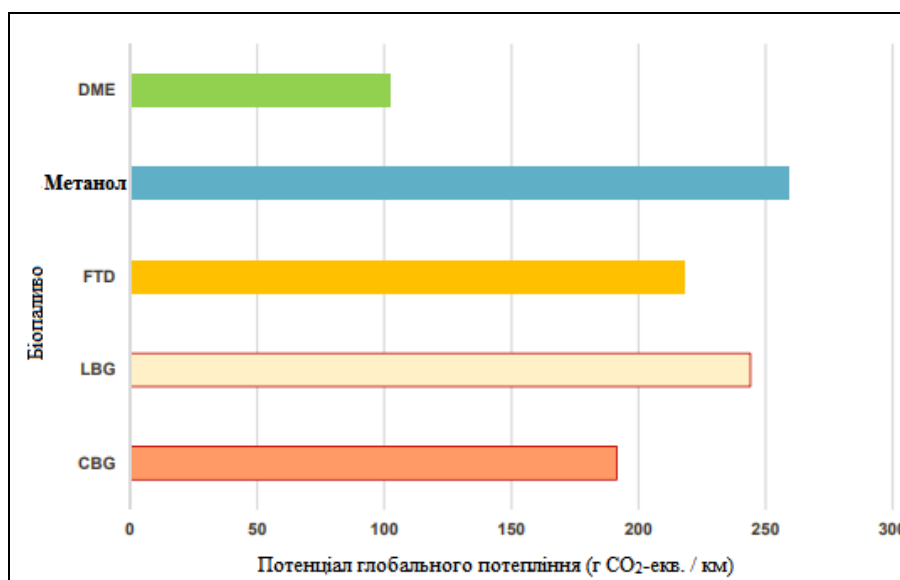


Рисунок 3.6 – Вплив на клімат (потенціал глобального потепління (ГВП), г CO<sub>2</sub>-екв.) на відстань (км), пройдену досліджуваним біопаливом (CBG – стислий біометан, LBG – зріджений біометан, FTD – дизель Фішера–Тропша, DME – диметилловий ефір, GTL – газ–рідина)

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № годл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

### 3.3 Інженерна методика розрахунку адсорбера

При розрахунку адсорбційних апаратів різного призначення враховуються статичні, кінетичні і динамічні характеристики процесів адсорбції. Основними характеристиками процесів адсорбції є кількість поглиненої домішки і швидкість поглинання молекул. У зв'язку з цим при вивченні будь-якої конкретної системи адсорбент – адсорбат треба враховувати такі фактори [57]:

- природу адсорбційних сил – енергію і особливості взаємодії адсорбату і адсорбенту;
- природу поверхні адсорбенту – хімію поверхні, хімічну будову поверхні (кристалохімічну структуру), первинну структуру для цеолітів;
- величину питомої поверхні;
- пористу структуру адсорбенту – обсяг пор в твердому тілі, розмір пор, форму пор, взаємозв'язок пор один з одним і з зовнішнім середовищем, розподіл обсягу пор по ефективним радіусам;
- фізичні та хімічні властивості адсорбованих молекул.

При цьому слід мати на увазі, що гази адсорбуються тим більше, чим краще вони конденсуються, тому пари адсорбуються краще, ніж гази. Чим вище температура кипіння адсорбата, тим краще його адсорбція [58].

Однією з основних завдань при конструкторському розрахунку адсорбера є визначення адсорбційної здатності для конкретних умов протікання процесів. У якості такої характеристики виступає динамічна ємність шару адсорбенту  $a_{\text{дин}}$ , яка залежить від довжини зони масообміну, від проскочної концентрації домішок та інших параметрів процесу. При конструкторських розрахунках адсорберів при відсутності експериментальних даних динамічну ємність слід обчислювати через статичну рівноважну ємність  $a$  з урахуванням безлічі коефіцієнтів запасу [58, 59]:

$$a_{\text{дин}} = \eta a,$$

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----









де  $\rho$  – щільність речовини гранично адсорбованої домішки при температурі  $T_{ад}$ , кг/м<sup>3</sup>;

$\rho'_{кр}$  – щільність речовини в адсорбованому стані при критичній температурі, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{кип}$  – те ж при температурі кипіння, кг/м<sup>3</sup>.

$$v^* = \frac{44}{1,977 - \frac{284 - 194,67}{304,19 - 194,67} (793 - 691)} = 0,059 \text{ м}^3/\text{кмоль}$$

Парціальний тиск домішок  $p_{пр}$  обчислюють із урахуванням тиску адсорбції, МПа

$$p_{пр} = p_{ад} c_0$$

$$p_{пр} = 0,1027 \cdot 0,28 = 0,0287$$

$$\lg a = \lg \frac{0,000255}{0,059} - 0,434 \cdot 6,55 \cdot 10^{-6} \frac{284^2}{2,31^2} \left( \lg \frac{103400}{28700} \right)^2 = -3,478$$

Об'єм адсорбенту в одному адсорбері, м<sup>3</sup>

$$V_{ад} = \frac{G_{ад}}{\rho_{ад}}$$

$$V_{ад} = \frac{40,49}{750} = 0,054 \text{ м}^3$$

де  $\rho_{ад}$  – насипна щільність адсорбенту (750 кг/м).

Геометричні розміри адсорбера розраховуються, задаючи швидкість газового потоку за умов адсорбції, віднесену до повного перетину адсорбера. Межі зміни швидкості згідно з літературними даними складають  $w = 0,1 - 0,3$  л / (хв·см<sup>2</sup>) або 1–3 /хв. Рекомендовані межі зміни швидкості в літературних

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат	ТС 19510169	Арк
						50



Внутрішній діаметр адсорбера, м

$$D_{\text{вн}} = 2 \sqrt{\frac{F}{\pi}}$$

$$D_{\text{вн}} = 2 \sqrt{\frac{17,81}{3,14}} = 4,76 \text{ м}$$

Зовнішній діаметр труби (балона) при заданій товщині стінки  $\delta_{\text{ст}}$ , м

$$D_{\text{зовн}} = D_{\text{вн}} + 2\delta_{\text{ст}}$$

$$\delta_{\text{ст}} = 15 \text{ мм} = 0,015 \text{ м}$$

$$D_{\text{зовн}} = 4,76 + 2 \cdot 0,015 = 4,79 \text{ м}$$

Зовнішній діаметр адсорбера підбирається в залежності від ряду типорозмірів для виготовлення труб або готових балонів з урахуванням обчислених  $D_{\text{зовн}}$ .

Потрібна висота шару адсорбенту, м

$$H = \frac{V_{\text{ад}}}{0,785 D_{\text{вн}}^2}$$

$$H = \frac{0,54}{0,785 \cdot 4,76^2} = 0,03 \text{ м}$$

Із отриманого значення  $H$  можна отримати кількість послідовно розташованих адсорберів, якщо задати обмеження одного адсорбера по висоті  $H_{\text{ад}}$ , або кількість паралельно розташованих адсорберів, якщо допустити зменшення швидкості потоку при розподілі його по паралельно розташованим адсорберам.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат

ТС 19510169

Арк

52

Отримані дані щодо конструкторських параметрів адсорбера можна використати для його побудови. Адсорбер, який розраховувався, є потужним. За 1 годину можна очистити близько 1250 м<sup>3</sup> біогазу, отримуючи при цьому достатні об'єми біометану та діючого вуглецю для подальшого використання останнього у запропонованій технології – блоці метанізації CO<sub>2</sub>.

Інв.№роздл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата						Арк
										53
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат	ТС 19510169					

## РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

### 4.1 Еколого–економічний ефект від впровадження технології

Запропонована технологія отримання біометану методом адсорбції при змінному тиску з додатковим блоком – метанізацією CO<sub>2</sub> за допомогою водню розроблена задля реалізації природоохоронного заходу, який спрямований на дотримання принципів раціонального природокористування, замінюючи природні ресурси вторинною сировинною базою.

Еколого–економічний ефект від проведення природоохоронних заходів (E) розраховується за формулою:

$$E = E_{\text{п}} + E_{\text{з}},$$

де E<sub>п</sub> – еколого–економічний ефект за рахунок економії на сплаті економічного податку в результаті зменшення викидів в навколишнє середовище після проведення природоохоронних заходів;

E<sub>з</sub> – еколого–економічний ефект за рахунок зменшення еколого–економічного збитку.

- 1) Розрахунок еколого–економічного ефекту, одержаного за рахунок економії на сплаті економічного податку.

$$E_{\text{п}} = E_{\text{п1}} - E_{\text{п2}}.$$

Сума податку, який справляється за викиди в атмосферне повітря забруднюючих речовин стаціонарними джерелами забруднення (E<sub>п1</sub>), обчислюються, виходячи з фактичних обсягів викидів та ставок податку, за формулою:

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат

ТС 19510169

Арк

54

$$E_{п1} = \sum (M_{i1} \times H_{пi1}),$$

де  $M_i$  – фактичний обсяг викиду  $i$ -тої забруднюючої речовини в тоннах (т);

$H_{пi}$  – ставки податку в поточному році за тону  $i$ -тої забруднюючої речовини, у гривнях з копійками.

$$M_i = 0,375 \text{ т CO}_2 / \text{т біогазу.}$$

$$H_{пi} = 10 \text{ гривень.}$$

$$E_{п1} = 0,375 \cdot 10 = 3,75 \text{ грн.}$$

При цьому,  $E_{п2} = 0$ , оскільки викиди  $\text{CO}_2$  після введення додаткового блоку метанізації відсутні.

$$E_{п} = 3,75 - 0 = 3,75 \text{ грн.}$$

Таким чином, за результатами розрахунку технології отримання біометану методом адсорбції при змінному тиску з додатковим блоком – метанізацією  $\text{CO}_2$  за допомогою водню, еколого–економічний ефект, одержаний завдяки невеликій економії на сплаті економічного податку в результаті зменшення впливу на навколишнє середовище при впровадженні розробленої технології, становить **3,75 грн** за 1 тону модернізованого біогазу.

2) Еколого–економічний збиток від забруднення навколишнього середовища ( $E_z$ ) доцільно розрахувати ДО та ПІСЛЯ проведення природоохоронних заходів (додатковий блок метанізації при модернізації біогазу):

$$E_z = E_{z1} - E_{z2},$$

де  $E_{z1}$  – еколого–економічний збиток до проведення природоохоронних заходів;

$E_{z2}$  – еколого–економічний збиток до проведення природоохоронних заходів.

Еколого–економічний збиток від забруднення навколишнього середовища ( $E_z$ ) розраховується як сума збитків :

Підп. і дата
Інв. № дубл.
Взаєм. інв. №
Підп. і дата
Інв. № подл.

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат	ТС 19510169	Арк
						55



- Атмосфері (Ез<sub>а</sub>)
- Водним ресурсам (Ез<sub>в</sub>)
- Земельним ресурсам (Ез<sub>з</sub>)

Тобто  $E = E_{з_а} + E_{з_в} + E_{з_з}$ .

Розмір відшкодування збитків за наднормативний викид однієї тонни забруднюючої речовини в атмосферне повітря розраховується на основі розміру мінімальної заробітної плати, установлені на час виявлення порушення, помноженої на коефіцієнт 1,1, з урахуванням регулювальних коефіцієнтів і показника відносної небезпечності кожної забруднюючої речовини.

Розмір збитків розраховується за формулою:

$$E_{з_а} = m_i \cdot 1,1П \cdot A_i \cdot K_T \cdot K_{з_і},$$

де  $E_{з_а}$  – розмір збитків, грн;

$m_i$  – маса і-тої забруднюючої речовини, що викинута в атмосферне повітря наднормативно, т;

$1,1П$  – розмір мінімальної заробітної плати (П) на момент виявлення порушення за одну тону умовної забруднюючої речовини, помноженої на коефіцієнт (1,1), грн/т;

$A_i$  – безрозмірний показник відносної небезпечності і-тої забруднюючої речовини;

$K_T$  – коефіцієнт, що враховує територіальні соціально-екологічні особливості;

$K_{з_і}$  – коефіцієнт, що залежить від рівня забруднення атмосферного повітря населеного пункту і-тою забруднюючою речовиною.

На основі даних про склад отриманого біогазу слід поррахувати розміри збитків по  $CO_2$ :

$$1) m_1 = 0,036 \text{ т } CO_2 / \text{ т біогазу}$$

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат	ТС 19510169	Арк
						56

$$P=5000 \text{ грн/т}$$

$$A_{i1}=500$$

$$K_{T1}=K_{\text{нас}} \cdot K_{\phi} = 1,20 \cdot 1,25 = 1,50$$

$$K_{z1} = 1$$

$$E_{z_{a1}} = 0,016 \cdot 1,1 \cdot 5000 \cdot 500 \cdot 1,50 \cdot 1 = 66000 \text{ грн.}$$

Оскільки від застосування даної технології маємо вплив лише на атмосферне повітря, то  $E_{z1}=E_{z_{a1}}+E_{z_{a1}}$ , що становить **66000 тис. грн** з 1 тонни модернізованого біогазу.

Збиток після введення додаткового блоку метанізації  $E_{z2}=0$ , оскільки викиди відсутні.

$$E_z = 66000 - 0 = 66000 \text{ грн.}$$

Еколого–економічний ефект:

$$E = 3,75 + 66000 = 69000 \text{ грн.}$$

Еколого–економічний ефект від впровадження запропонованої технології складає близько 66 тис. грн з 1 тонни біогазу.

Річний еколого–економічного ефект від проведення природоохоронних заходів складає  $66000 \text{ грн} \cdot 7650 \text{ т/рік біогазу} = 504,9 \text{ млн. грн.}$

Також доцільно звернути увагу на економію при використанні біометану як автомобільного палива. Для цього порівняємо витрати на 100 км при використанні звичних видів палива та біометану. Для розрахунку обрано середні витрати кожного виду палива, що використовує легковий автомобіль. Дані по вартості палива взято для Сумської області [61] (Додаток Е).

1) Бензин:

- витрати на 100 км = 10 л
- вартість бензину = 24,70 грн/л

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат

ТС 19510169

Арк

57

Витрати на 100 км =  $24,7 \cdot 10 = 247$  грн.

2) Дизель:

- витрати на 100 км = 8,3 л
- вартість дизелю = 23,55 грн/л

Витрати на 100 км =  $23,55 \cdot 8,3 = 195,5$  грн.

3) Газ:

- витрати на 100 км = 12 л
- вартість газу = 12,34 грн/л

Витрати на 100 км = 148,1 грн.

4) Біометан:

- витрати на 100 км = 12 л
- вартість біометану = 1,4 грн/л [62]

Витрати на 100 км = 16,8 грн.

За розрахунками чітко прослідковується, що використання біометану як автомобільного палива є економічно доцільним. Крім того, йде економія викопних видів палива, зменшується вплив на навколишнє середовище, зменшується кількість утворених відходів різного виду та інші позитивні екологічні складові.

#### 4.2 Період окупності проєкту

Оцінки терміну окупності витрат на проведення природоохоронного заходу

$$T=V/E,$$

де V - оцінка вартості витрат на проведення природоохоронних заходів;

E - оцінка річного еколого-економічного ефекту від проведення природоохоронних заходів.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № роздл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат

ТС 19510169

Витрати на проведення природоохоронних заходів (В) розраховуються за формулою:

$$B=K+C,$$

де К – капітальні витрати на проведення природоохоронного заходу (вартість робіт по модернізації існуючого на підприємстві обладнання), грн;

С – поточні річні витрати на проведення природоохоронних заходів, які включають в себе:

– витрати на оплату праці робітників, що будуть працювати на встановленому природоохоронному обладнанні, грн;

– нарахування на фонд заробітної плати цих робітників (єдиний внесок) 22% від фонду заробітної плати, грн;

– вартість расходних матеріалів, що забезпечують роботу встановленого природоохоронного обладнання (вартість фільтрів, реактивів та інших матеріалів, що забезпечують роботу встановленого природоохоронного обладнання), грн;

– вартість електроенергії або інших видів енергії, що забезпечують роботу встановленого природоохоронного обладнання, грн;

– інші річні витрати.

Орієнтовна вартість (капітальні витрати, К) запропонованого проекту складає 36475 тис. грн.

Поточні річні витрати на процес метанізації вуглекислого газу (С) становлять 954, 405 тис. грн:

– витрати на виплати заробітної плати (242 тис.грн);

– нарахування до фонду заробітної плати (Єдиний внесок) (53,418 тис.грн);

– сировинні ресурси (78,544 тис.грн);

– енергетичні ресурси (202,301 тис.грн);

– амортизаційні витрати (380,142 тис.грн).

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат
-----	-----	----------	-------	-----

ТС 19510169

Арк

59







Типові небезпеки включають:

- ризик задушення та / або отруєння ферментаційними газами / біогазом у зонах прийому сировини;
- викид високотоксичних газів, таких як сірководень, в зону прийому, особливо під час перемішування, в результаті реакцій між сировиною;
- небезпеки, пов'язані з використанням добавок та допоміжних матеріалів з небезпечними властивостями (наприклад, канцерогенні та репротоксичні суміші мікроелементів).

### 3) Біологічні агенти

За даними Міжнародної організації праці біологічними агентами є будь-який мікроорганізм, культура клітин або ендопаразит людини, які можуть спричинити інфекцію, алергію, токсичність або іншим чином створити небезпеку для здоров'я людини[64]. У біогазових установках ці біологічні агенти можуть траплятися у вихідній сировині, шламах та конденсатах біогазу.

Прийом біологічних речовин через дихальні шляхи, контакт із ротом у рот, контакт зі шкірою / слизовою оболонкою, порізи та ножові пошкодження є важливим для оцінки потенційних небезпек.

Нижче наведено приклади небезпеки, які можуть виникати від біологічних агентів під час виробництва біогазу:

- вдихання пилу або аерозолів, що містять цвіль, бактерії або ендотоксини, наприклад, із силосу або сухого екскременту птиці, який став вологим;
- якщо діяльність проводиться з помітно запліснявілими відходами, неможливо виключити гострий токсичний ефект від вдихання мікотоксинів або інших мікробіологічних продуктів метаболізму.

Додаткові небезпеки, які можуть виникнути у рослин, де поряд із енергетичними культурами, рідким гноєм та твердим гноєм використовуються інші субстрати: біологічні агенти в косубстратах (наприклад, патогени); ручний контакт під час сортування.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат

ТС 19510169

Арк

63



Різні ризиковані агенти та матеріали також можуть виникати в процесі переробки відходів. Сюди можуть входити домішки (речовини, що заважають), труп тварин або відходи з лікарень, лікарень або домогосподарств із хворими або потребуєчими допомоги людьми (наприклад, використані шприци та канюлі). Біологічні агенти також можуть вносити гризуни, птахи чи інші тварини та їх екскременти.

#### 4) Небезпеки від електричного обладнання

На біогазових установках використовується різноманітне електричне обладнання (контрольне обладнання, ТЕЦ, насоси, мішалки, вимірювальні прилади тощо). За певних обставин це обладнання може негативно впливати на здоров'я внаслідок електричної небезпеки від присутності електричної енергії.

– Небезпека ураження електричним струмом або дуги, спричинених ураженням електричним струмом через тіло людини або спалахом дуги. Приклад: пошкоджені силові кабелі на мішалці.

– Небезпека від електричних або магнітних полів від подразнюючого впливу на організм людини, що створюється циркуляцією індукційних струмів, спричинених електричними полями, індукованими струмами або магнітними полями.

Ці ефекти виникають у частотному діапазоні до 30 кГц (низькочастотний діапазон). Приклад: електромагнітне, електричне та магнітне випромінювання від генератора ТЕЦ (небезпека для людей із кардіостимуляторами).

– Небезпека від статичної електрики, спричинена ураженням електричним струмом через розряд статичної електрики.

#### 5) Механічні небезпеки

Механічні небезпеки, як правило, не характерні для технології біогазу. Однак найпоширеніші типи аварій на біогазових установках пояснюються механічними небезпеками: падінням, ударом, дробленням, різанням.

Чорні місця аварій у зв'язку з цим включають роботу на силосі чи інших робочих місцях на висоті, роботи в районі обертових частин (наприклад,

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат	ТС 19510169	Арк
						64









Наслідками викиду БНР можуть бути поодинокі випадки особливо небезпечних інфекційних захворювань або епідемії. Зараження в осередку людей і тварин відбувається через повітря, воду, ґрунт, продукти і різні предмети досить тривалий час після аварії.

До аварій техногенного характеру відносяться вибухи і пожежі на підприємствах оборонної, нафтовидобувної, газової, текстильної, хлібопродуктової промисловості, а також на складах із небезпечними горючими речовинами й матеріалами.

Вторинними наслідками вибухів є ураження уламками конструкцій будівель і споруд людей, поховання їх під уламками, отруєння чадним газом та витоком АОХР із ураженого обладнання [69].

У останні роки відзначається також зростання аварійності на транспорті.

Зростає і тяжкість наслідків аварій, на які припадає понад 60 % від загального числа жертв техногенних подій. До транспортних аварій відносяться: аварії товарних і пасажирських поїздів, метрополітену, вантажних і пасажирських суден, автомобільні аварії і авіаційні катастрофи.

Мають місце аварії на електростанціях, очисних спорудах, каналізаційних системах і системах водопостачання, комунальних газопроводах.

Стихійні лиха викликаються такими природними явищами, як землетруси, повені, пожежі, рясні снігопади, снігові замети, обмерзання, бурі та урагани, посухи та ін. Як правило, вони виникають на великих територіях і супроводжуються великими руйнуваннями населених пунктів і людськими жертвами.

Найбільш грізним і руйнівним лихом, а, отже, і небезпечним для населення, є землетрус. Землетруси перетворюють на руїни цілі міста і забирають тисячі життів.

Катастрофічні повені виникають при зливових дощах, рясних повенях великих річок, при швидкому таненні снігу, руйнуванні гідротехнічних споруд.

Підп. і дата
Інв. № дубл.
Взаєм. інв. №
Підп. і дата
Інв. № подл.

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат

ТС 19510169



## ВИСНОВКИ

У цій роботі був розглянутий такий метод модернізації біогазу як адсорбція при змінному тиску зі встановленням додаткового блоку метанізації, що дає змогу використовувати побічний продукт процесу – CO<sub>2</sub> – для отримання додаткової кількості метану.

Також було досліджено роль, яку біометан може відігравати як паливо у транспортному секторі. Було проаналізовано вплив цього виду палива на викиди від використання його автомобілем.

Аналіз показує, що існує значний потенціал для збільшення рівня виробництва біогазу та біометану в наступні роки, і будь-яке збільшення рівня виробництва допоможе поліпшити енергетичну безпеку країни, зменшивши залежність регіону від імпорту природного газу та вплинути на ситуацію зі зміною клімату.

На підставі проведених досліджень одержано такі результати:

1. Так як актуальною проблемою забруднення атмосфери є викиди парникових газів, від автомобілів в тому числі, вирішено проводити пошук методів отримання найбільш чистого біометану як палива.

2. На основі опрацьованої інформації, зроблено аналіз існуючих технологій отримання біопалива: мембранна сепарація, абсорбційні методи; адсорбція при змінному тиску (АЗТ) та криогенне розділення.

3. У результаті використання методу SWOT-аналізу визначено адсорбцію при змінному тиску як найбільш ефективний метод модернізації біогазу. Проведено інженерний розрахунок адсорбера.

4. Запропоновано встановлення додаткового блоку метанізації для використання діоксиду вуглецю, який є побічним продуктом при модернізації біогазу, та отримання додаткової кількості метану.

5. Визначено еколого-економічний ефект від впровадження запропонованої технології.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дат

ТС 19510169

Арк

71







23. Köppel W., Schreck H., Lubenau U., Erler R. Monitoring Biogas II: Abschlussbericht. Final report, 2014.
24. Статистичний звіт ЄБА, 2016.
25. Evonik. SEPURAN Green Membrane technology for upgrading biogas efficiently” Prospect.
26. Wilken D., Strippel F., Hofmann F. Biogas to Biomethane, 2017.
27. Štambaský J., Prządka A., Kovács E., Pflüger S., de la Vega N., Peón B. Biomethane and Biogas Report. European Biogas Association, Brussels, 2015.
28. Dolan W.B., Mitariten M.J. CO<sub>2</sub> Rejection from Natural Gas. United States Patent US 2003/0047071, 2003.
29. Boutin A., Coudert F-X., Springuel-Huet M-A., Neimark A.V., Ferey G., Fuchs A.H. The Behavior of Flexible MIL-53 (Al) upon CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> Adsorption. *J. Phys Chem.* 2010. Vol. 114, No. 50, pp. 22237-22244.
30. Air Liquide. Biogas Recovery System, 2011:  
<http://www.dta.airliquide.com/en/our-offer/decentralized-energies/biogas.html>
31. Biogas upgrading. Technical review report, 2016. 275 p.
32. Bauer F. Biogas upgrading – Review of commercial technologies. SGC Rapport, 2013. p. 270.
33. Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats in Energy Research. EUROPEAN COMMISSION, 2015.
34. Nizami A.-S., Korres N. E. and Murphy J. D. Review of the Integrated Process for the Production of Grass Biomethane, 2009.
35. Korres N.E., Singh A., Nizami A.-S. Is grass biomethane a sustainable transport biofuel?, 2019.
36. Кириллов Н.Г. Газета "Энергетика и промышленность России" № 4 (32) - Альтернативное моторное топливо из местного сырья, 2003.
37. GasHighway. Promoting the Uptake of Gaseous Vehicle Fuels. Biogas and Natural Gas in Europe, 2009.
38. Biogasmax 2006/2010 the synthesis, 2018.

Підп. і дата	
Інв.№дубл.	
Взаєм.інв.№	
Підп. і дата	
Інв.№подл.	



52. Hijazi O., Munro S., Zerhusen B., Effenberger M. Review of life cycle assessment for biogas production in Europe. *Renew Sust*, 2016. pp. 1291–1300.
53. Pre Consultants. *SimaPro 8 LCA Software: The Powerful Life Cycle Solution*, 2017.
54. ISO (International Organization for Standardization). *Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines; Standard ISO 14044*; ISO: Geneva, Switzerland, 2006.
55. Pertl A., Mostbauer P., Obersteiner G. Climate balance of biogas upgrading systems. *Waste Manage*, 2010. pp. 92–99.
56. Faaij P.C., Turkenburg W.C. Fischer. *Tropsch diesel production in a well-to-wheel perspective: A carbon, energy flow and cost analysis*, 2009.
57. Борзенко Е.И., Зайцев А.В. Автоматизированное проектирование блока адсорбции: Учеб.-метод. пособие. СПб., 2014. 57 с.
58. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. – М., Химия, 1984. 592 с.
59. Игнатов В.Я., Головкин Г.А. Очистка криогенных газов: Учеб. пособие. – Л., 1979. 75 с.
60. Блазнин Ю.П., Максимова Л.В., Файнштейн В.И.. Оценка адсорбционных свойств цеолитов, предназначенных для блоков комплексной очистки воздуха. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.18198/j.ind.gases.2004.0147>.
61. Ціни на пальне по Сумській області [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://vseazs.com/>
62. *Biofas for road vehicles. Technology briff*. IRENA, 2018.
63. Bontempo G., Maciejczyk M., Wagner L. and Hofmann F. *Guidelines for the safe use of biogas technology*, 2016.
64. Hurst P., Kirby P. *Health, Safety and Environment. A Series of Trade Union Educational Manuals for Agricultural Workers*. Geneve: International Labour Organisation, 2004

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № годл.	



ДОДАТКИ

Додаток А

Сертифікати про апробацію результатів роботи



Рисунок А.1 – Сертифікат Про апробацію результатів роботи





Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет  
імені В. Н. Каразіна  
Навчально-науковий інститут екології



# Сертифікат

Про апробацію результатів наукових досліджень на  
VIII Міжнародній конференції молодих вчених  
«Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та  
збалансоване природокористування»

Гуслєва А. О.

Директор  
Навчально-наукового  
інституту екології,  
к.геогр.н., доц.



Г. В. Тітенко

26-27.11.2020. м. Харків, Україна

Рисунок А.2 – Сертифікат Про апробацію результатів роботи



## Додаток Б

### Щорічні викиди парникових газів для вибраних типів дорожніх транспортних засобів за різних сценаріїв

Таблиця Б.1 – Щорічні викиди парникових газів для вибраних типів дорожніх транспортних засобів (сценарій з низьким рівнем викидів парникових газів WTT)

Тип транспортного засобу	Щорічні викиди CO <sub>2</sub> на колесах (тонн на рік)			Процентна зміна викидів WTW	
	Бензин / дизель	Природний газ	Біометан	Природний газ проти бензину / дизеля	Біометан проти бензину / дизеля
Легковий автомобіль (бензин)	1,70	1,39	0,20	-18%	-88%
Легковий автомобіль (дизель)	1,31	1,39	0,20	+6%	-85%
Малотонажний вантажний автомобіль (до 3,5 т) (дизель)	3,98	4,28	0,82	+8%	-79%
Малий вантажний автомобіль (дизель)	18,07	20,43	4,91	+13%	-73%
Великий вантажний автомобіль (26 т) (дизель)	48,21	55,94	10,61	+16%	-78%
Шарнірно-зчленований вантажний автомобіль (>32 т)(дизель)	135,38	136,23	82,00	+1%	-39%
Автобус (дизель)	57,53	60,96	10,10	+6%	-82%
Туристичний автобус (дизель)	46,14	53,12	9,60	+15%	-79%

Таблиця Б.2 – Щорічні викиди парникових газів для вибраних типів дорожніх транспортних засобів (центральний сценарій викидів парникових газів, що надходить до WTT)

Тип транспортного засобу	Щорічні викиди CO <sub>2</sub> на колесах (тонн на рік)			Процентна зміна викидів WTW	
	Бензин / дизель	Природний газ	Біометан	Природний газ проти бензину / дизеля	Біометан проти бензину / дизеля
Легковий автомобіль (бензин)	1,74	1,42	0,31	-18%	-82%
Легковий автомобіль (дизель)	1,34	1,42	0,31	+6%	-77%
Малотонажний вантажний автомобіль (до 3,5 т) (дизель)	4,05	4,36	1,12	+8%	-72%
Малий вантажний автомобіль (дизель)	18,39	20,76	6,25	+13%	-66%
Великий вантажний автомобіль (26 т) (дизель)	49,06	56,36	14,20	+15%	-71%
Шарнірно-зчленований вантажний автомобіль (>32 т)(дизель)	137,76	140,63	86,22	+2%	-37%
Автобус (дизель)	58,54	62,05	14,49	+6%	-75%
Туристичний автобус (дизель)	46,95	53,53	13,03	+14%	-72%

Таблиця Б.3 – Щорічні викиди парникових газів для вибраних типів дорожніх транспортних засобів (сценарій з високими викидами парникових газів, що надходить до WTT)

Тип транспортного засобу	Щорічні викиди CO <sub>2</sub> на колесах (тонн на рік)			Процентна зміна викидів WTW	
	Бензин / дизель	Природний газ	Біометан	Природний газ проти бензину / дизеля	Біометан проти бензину / дизеля
Легковий автомобіль (бензин)	1,83	1,55	0,41	-15%	-78%
Легковий автомобіль (дизель)	1,37	1,55	0,41	+13%	-70%
Малотонажний вантажний автомобіль (до 3,5 т) (дизель)	4,14	4,73	1,42	+14%	-66%
Малий вантажний автомобіль (дизель)	18,81	22,43	7,58	+19%	-60%
Великий вантажний автомобіль (26 т) (дизель)	50,19	60,17	17,78	+20%	-65%
Шарнірно-зчленований вантажний автомобіль (>32 т)(дизель)	140,94	147,47	91,08	+5%	-35%
Автобус (дизель)	59,90	67,51	18,87	+13%	-68%
Туристичний автобус (дизель)	48,04	57,18	16,47	+19%	-66%

## Додаток В

### SWOT–аналіз методу мембранна сепарація

Таблиця В.1 – Матриця SWOT–аналізу (мембранна сепарація)

	Можливості	Загрози
Сильні сторони	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Розширення варіантів конструкцій.</li> <li>2. Пошук найбільш доцільного полімеру в якості мембрани.</li> <li>3. Удосконалення конструкцій, адаптованих для невеликих об'ємів.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Напрацювання способів очищення відпрацьованих мембран.</li> <li>2. Удосконалення технології з невисокою потребою в енергії.</li> <li>3. Розробка плану використання утилізованих речовин.</li> </ol>
Слабкі сторони	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Збільшення наукового потенціалу.</li> <li>2. Удосконалення технології, при якій буде значне зменшення втрат метану.</li> <li>3. Застосування в технологіях економічного газового пальника, який вимагається на державному рівні.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Використання найбільш ефективних, але дешевших мембран.</li> <li>2. Застосування закордонного досвіду для задоволення державних вимог щодо застосування технології.</li> </ol>

Таблиця В.2 – Перелік стратегічних проблем технології (мембранна сепарація)

Поле матриці SWOT	Стратегічні проблеми, сформульовані на основі виявлення парних комбінацій сильних і слабких сторін технологій з можливостями та загрозами в зовнішньому середовищі	Оцінка факторів, у балах
СіМ	1. Удосконалення конструкцій, адаптованих для невеликих об'ємів.	3
	2. Пошук найбільш доцільного матеріалу в якості мембрани.	2
СіЗ	1. Удосконалення технології з невисокою потребою в енергії.	2
	2. Розробка плану використання утилізованих речовин.	2
СлМ	1. Впровадження інновацій в технології виробництва.	2
	2. Застосування в технологіях економічного газового пальника, який вимагається на державному рівні.	3
СлЗ	1. Використання найбільш ефективних, але дешевших мембран.	2
	2. Застосування закордонного досвіду для задоволення державних вимог щодо застосування технології.	3
Усього балів		19

## Додаток Г

## SWOT–аналіз абсорбційних методів

Таблиця Г.1 – Матриця SWOT–аналізу (абсорбційні методи)

	Можливості	Загрози
Сильні сторони	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Широкий вибір розчинників.</li> <li>2. Можливість повного завантаження рідини.</li> <li>3. Заощадження коштів за рахунок відсутності необхідності у великих конструкціях.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Удосконалення процесів регенерації відпрацьованого розчинника.</li> <li>2. Розробка процесу технології зі зменшенням енергозалежності.</li> </ol>
Слабкі сторони	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Використання розчинника, який має найменший шкідливий вплив на навколишнє середовище.</li> <li>2. Можливість використовувати надлишкове тепло.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Удосконалення частини процесу, при якому буде неможливий вихід розчинника в довкілля.</li> <li>2. Використання економічного газового пальника.</li> </ol>

Таблиця Г.2 – Перелік стратегічних проблем технології (абсорбційні методи)

Поле матриці SWOT	Стратегічні проблеми, сформульовані на основі виявлення парних комбінацій сильних і слабких сторін технологій з можливостями та загрозами в зовнішньому середовищі	Оцінка факторів, у балах
СіМ	1. Можливість використання повного завантаження рідини.	2
	2. Заощадження коштів за рахунок відсутності необхідності у великих конструкціях.	3
СіЗ	1. Удосконалення процесів регенерації відпрацьованого розчинника.	3
	2. Розробка процесу технології зі зменшенням енергозалежності.	3
СлМ	1. Використання розчинника, який має найменший шкідливий вплив на навколишнє середовище.	3
	2. Можливість використання надлишкового тепла.	3
СлЗ	1. Удосконалення частини процесу, при якому буде неможливий вихід розчинника в довкілля.	2
	2. Використання економічного газового пальника.	2
Усього балів		21

Додаток Д

## SWOT–аналіз адсорбції при змінному тиску (АЗТ)

Таблиця Д.1 – Матриця SWOT–аналізу (адсорбція при змінному тиску (АЗТ))

	Можливості	Загрози
Сильні сторони	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Відносно дешева технологія.</li> <li>2. Просування на ринок еталонних установок.</li> <li>3. Використання багаторічного досвіду задля покращення процесу.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Адсорбційний матеріал найбільш дешевий.</li> <li>2. Напрацювання у плані зменшення енергозалежності.</li> </ol>
Слабкі сторони	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Удосконалення технології для меншої втрати метану.</li> <li>2. Використання еталонних установок, в яких втрати метану найменші.</li> <li>3. Збільшення наукового потенціалу.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Забезпечення процесу пальником з низьким рівнем струму.</li> <li>2. Покращення технології щодо механічних навантажень на обладнання.</li> </ol>

Таблиця Д.2 – Перелік стратегічних проблем технології (адсорбція при змінному тиску (АЗТ))

Поле матриці SWOT	Стратегічні проблеми, сформульовані на основі виявлення парних комбінацій сильних і слабких сторін технологій з можливостями та загрозами в зовнішньому середовищі	Оцінка факторів, у балах
СіМ	1. Просування на ринок еталонних установок.	2
	2. Використання багаторічного досвіду задля покращення процесу.	2
СіЗ	1. Використання найбільш дешевого, але найефективнішого адсорбційного матеріалу.	1
	2. Напрацювання у плані зменшення енергозалежності.	3
СлМ	1. Удосконалення технології щодо меншої втрати метану.	3
	2. Використання еталонних установок, в яких втрати метану найменші.	2
СлЗ	1. Забезпечення процесу пальником з низьким рівнем струму.	3
	2. Покращення технології щодо механічних навантажень на обладнання.	1
Усього балів		17

Додаток Е

## SWOT–аналіз кріогенного розділення

Таблиця Е.1 – Матриця SWOT–аналізу (кріогенне розділення)

	Можливості	Загрози
Сильні сторони	<ol style="list-style-type: none"> <li>Отримання кінцевого продукту з високою чистотою.</li> <li>Поєднання з іншими методами обробки задля отримання більш чистого метану.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Вихід на ринок із відносно новою технологією з низькою втратою продукту.</li> </ol>
Слабкі сторони	<ol style="list-style-type: none"> <li>Додатковий дохід від продажів побічного продукту – CO<sub>2</sub> (сухий лід).</li> <li>Удосконалення методу кріогенної обробки з найменшою потребою в енергії.</li> <li>Розроблення технології кріогенної обробки, для якої вхідна речовина не повинна бути дуже точно очищена.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Розробка покращеного процесу технології, при якому буде максимальний збір CO<sub>2</sub>.</li> <li>Щільне вивчення технології.</li> </ol>

Таблиця Е.2 – Перелік стратегічних проблем технології (кріогенне розділення)

Поле матриці SWOT	Стратегічні проблеми, сформульовані на основі виявлення парних комбінацій сильних і слабких сторін технологій з можливостями та загрозами в зовнішньому середовищі	Оцінка факторів, у балах
СiМ	1. Отримання кінцевого продукту з високою чистотою.	2
	2. Поєднання з іншими методами обробки задля отримання більш чистого метану.	3
СiЗ	1. Вихід на ринок із відносно новою технологією з низькою втратою продукту.	2
	2. Удосконалення методу кріогенної обробки з найменшою потребою в енергії.	2
СлМ	1. Отримання додаткового доходу від продажів побічного продукту – CO <sub>2</sub> (сухий лід).	2
	2. Розроблення технології кріогенної обробки, для якої вхідна речовина не повинна бути дуже точно очищена.	2
СлЗ	1. Розробка покращеного процесу технології, при якому буде максимальний збір CO <sub>2</sub> .	2
	2. Щільне вивчення технології.	3
Усього балів		18

Додаток Ж

## Вартість різних видів палива у Сумській області

← Я ↻ vseazs.com "Все АЗС" - ціни на пальне в Україні

02.12.2020 ▾

Сумська ▾

Средняя цена ▾

A-98	28.20		
A-95+	25.65		
A-95	24.70		
A-92	23.75	19.90	UPG
A-80	17.99	20.00	Укрнафта
ДП	23.55	20.60	Marshal
ДП+	24.94	20.70	SUN OIL <span style="float: right; color: red;">-1.70 грн/л</span>
Газ	12.34	21.18	Мотто <span style="float: right; color: red;">-1.10 грн/л</span>
		21.95	Авиас

Рисунок Ж.1 – Середня вартість пального в Сумській області на  
2.12.2020 р. [61]