

Міністерство освіти і науки України
Одеський національний технологічний університет
Кафедра кріогенної техніки



ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

На тему: «Аналіз ефективності процесу зрідження природного газу з багатокomпонентним холодоагентом MR»

Здобувача Буніної Л.В.
2-го курсу КТ 262 групи
Керівник доц. Соколовська-Єфименко В.В.
Консультант:
проф. Морозюк Л.І.

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від _____ 2023 р., протокол № _____

Завідувач кафедри КТ _____ **Юрій Симоненко**

Одеса - 2023 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Низькотемпературної техніки та інженерної механіки
Кафедра Кріогенної техніки
Ступінь вищої освіти магістр
Спеціальність 142 «Енергетичне машинобудування»
Освітня програма «Кріогенні технології виробництва,
зрідження і транспортування природного газу»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КТ

д.т.н., проф. Симоненко Ю.М

«__» ____ 2023 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА**

Буніної Людмили Володимирівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз ефективності процесу зрідження природного газу
з багатокомпонентним холодоагентом MR

Керівник роботи к.т.н. Соколовська-Єфименко Вікторія Вікторівна
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ОНТУ від 30 листопада 2022 року № 897-03

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 20 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Процеси зрідження природного газу:
SMR-Linde, SMR-APCI, FMC-Linde. Характеристики сировинного газу та холодоагенту MR.

4. Перелік питань, які потрібно розробити:
Вступ. Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Вивчення технологічних
схем процесів MR. Моделювання процесів LNG з використанням циклу MR.

Енергетичний аналіз процесів. Традиційний ексергетичний аналіз.

Розширений ексергетичний аналіз. Загальні висновки. Охорона праці.

Економічні показники роботи.

5. Перелік графічного матеріалу:
Презентація Power Point (12 слайдів)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	проф. Морозюк Л.І.		

7. Дата видачі завдання _____ 02.02.2022 _____

Керівник _____ доц. Соколовська-Єфименко В.В.

Завдання прийняв до виконання _____ Буніна Л.В.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вивчення технічного завдання	5 днів	
2	Огляд і вивчення літератури	14 днів	
3	Розробка математичної моделі об'єкта	2 дні	
4	Вибір методу дослідження	20 днів	
5	Адаптація методів дослідження до практичного застосування	15 днів	
6	Розробка графічних моделей	2 дні	
7	Аналіз результатів досліджень	2 дні	
8	Оформлення пояснювальної записки	2 дні	
9	Обговорення та затвердження результатів роботи	2 дні	
10	Підготовка матеріалів роботи до захисту	2 дні	

Здобувач-дипломник _____
(підпис)

Людмила БУНІНА
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Вікторія СОКОЛОВСЬКА-
(прізвище та ініціали)

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчинності

Здобувач-дипломник _____
Буніна Л.В.
(ПІБ)

(підпис)

АНОТАЦІЯ

У роботі було досліджено три традиційні процеси зрідження природного газу: SMR-Linde, SMR-APCI, FMC-Linde.

Для оцінки енергетичної ефективності процесів, як термодинамічні інструменти були обрані: енергетичний, традиційний ексергетичний та розширений ексергетичний методи аналізу. Енергетичний аналіз процесів показав, що з усіх трьох процесів найбільший ступінь термодинамічної досконалості досягається у процесі FMC-Linde, за ним йде процес SMR-ARSI.

Результати традиційного ексергетичного аналізу показали, що у всіх трьох процесах висока деструкція ексергії спостерігається в компресорах та багатопотокових теплообмінниках. Для компонентів з високими значеннями деструкції ексергії були розраховані чотири частини незворотності (усувна/неминуха) та (ендогенна/екзогенна).

Результати розширеного ексергетичного аналізу показали, що більшість незворотних процесів усередині компонентів були ендогенними, а деструкція ексергії компресорів була вищою, ніж у інших компонентів. У компресорах більша частина деструкції ексергії відноситься до усунутій, тому вони мають високий потенціал поліпшення. Але в багатопотокових теплообмінниках та проміжних охолоджувачах переважає неминуха деструкція ексергії.

Ключові слова: *процеси зрідження NG, енергетичний аналіз, традиційний ексергетичний аналіз, розширений ексергетичний аналіз.*

ABSTRACT

Three conventional natural gas liquefaction processes have been studied in the presented research - the SMR-Linde process, the SMR-ARSI process, and the FMC-Linde process.

To assess the energy efficiency of processes, the following thermodynamic methods have been selected: energy analysis, conventional exergy analysis, and advanced exergy analysis.

The energy analysis of the considered processes showed that the highest degree of thermodynamic performance of all three processes is achieved in the FMC-Linde process, followed by the SMR-ARSI process.

The conventional exergy analysis results showed high exergy destruction in the considered processes was observed in compressors and multi-flow heat exchangers. Four parts of irreversibility (avoidable/unavoidable, endogenous/exogenous) have been calculated for components with high exergy destruction values.

The results of the advanced exergy analysis showed that most of the irreversible processes inside the components were endogenous, and the compressor exergy destruction was higher than that of other components. In compressors, most exergy destruction is avoidable, so they have a high potential for improvement. But in multi-flow heat exchangers and intercoolers, unavoidable exergy destruction prevails.

Key words: NG liquefaction processes, energy analysis, conventional exergy analysis, and advanced exergy analysis

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	13
1.1 Аналіз літературних даних і постановка проблеми	13
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА.	17
2.1 Вивчення технологічних схем процесів MR	16
2.2 Моделювання процесів LNG з використанням циклу MR	25
2.2.1 Енергетичний аналіз процесів	33
2.3 Традиційний ексергетичний аналіз	43
2.4 Розширений ексергетичний аналіз	53
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	60
ОХОРОНА ПРАЦІ	62
ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ РОБОТИ	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	74

					<i>КРМ.КТ.1.897-03.1.2</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Бучіна Л.В.</i>			ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Соколовська-</i>					6	77
<i>Реценз.</i>		<i>Єфименко В.В</i>				ФНТІМ, зр КТ-262		
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>								

ВСТУП

Актуальність теми

Природний газ є ключовим компонентом системи виробництва електроенергії в багатьох країнах, хоча існує можливість знизити залежність від викопуваного палива і перейти до низьковуглецевої енергетики.

У міру того, як глобальна енергетична криза поглиблюється, а країни намагаються забезпечити надійні джерела енергії, інвестиції в нову інфраструктуру зрідженого природного газу (LNG) зростають, досягаючи 42 мільярдів доларів на рік у 2024 році, як свідчить дослідження Rystad Energy [1]. Ці інвестиції у нові проекти у 20 разів перевищують суму у 2020 року, коли через пандемію, у розробки LNG було інвестовано лише 2 мільярди доларів. Нові проекти LNG зумовлені головним чином короткостроковим збільшенням попиту на природний газ у Європі та Азії через війну Росії в Україні та подальші санкції та обмеження, накладені на експорт російського газу.

Проекти, які були схвалені або в даний час розробляються, дозволять отримати близько 300 трильйонів кубічних футів LNG, на чолі зі США приблизно 97 трильйонів кубічних футів, потім Катар - близько 52 трильйонів кубічних футів і Росія - 50 трильйонів кубічних футів. Ці три провідні країни володіють близько 70% загальної кількості санкціонованих, але ще не вироблених світових ресурсів LNG.

Природний газ є екологічно чистим видом палива, оскільки за його використання в атмосферу викидається 35-40% вуглекислого газу порівняно з іншими видами палива. При цьому енергоємність природного газу така ж висока, як і інших джерел викопного палива. Завдяки своєму складу газ, що викидається, не містить сполук сірки, а також легше згорає, ніж нафта і вугілля.

Таким чином LNG є надзвичайно перспективним енергоносієм у сучасному світі завдяки своїм фізико-хімічним властивостям та екологічності.

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		7

У зв'язку з бурхливим розвитком індустрії LNG у світі, технології та обладнання зрідження також постійно розвиваються та вдосконалюються. Тому вивчення процесу зрідження природного газу та обладнання має велике значення для підвищення ефективності установки зі зрідження газу та подальшого сприяння її популяризації та застосуванню. Технологія зрідження природного газу включає попереднє очищення, поділ газу та рідини, вилучення NGL (натуральний газовий конденсат), криогенний процес та теплообмінне обладнання. Суть зрідження газу полягає в тому, що природний газ в теплообміннику може отримати достатню охолоджувальну здатність, знижуючи його температуру до 112K при нормальному тиску, отже, процес зрідження є основним змістом процесу зрідження природного газу.

Процеси зрідження газу будуть економічними, коли споживання енергії не перевищує заданого значення. Щоб знизити інвестиційні та експлуатаційні витрати на завод зі зрідження природного газу та підвищити продуктивність LNG, необхідно впровадити відповідний процес зрідження. Відповідно до різних методів охолодження процес зрідження природного газу можна розділити на каскадний цикл зрідження [2], детандерний цикл [3] і цикл зі змішаним холодоагентом [4]. Зрідження природного газу здійснюється в широкому діапазоні температур: від температури навколишнього середовища нижче -161°C . При виборі технології охолодження і зрідження зазвичай керуються термодинамічним принципом – втрати тепла в циклі повинні бути мінімальні. Криві охолодження природного газу (холодний композит) та холодоагенту (гарячий композит) повинні мати якнайменшу різницю температур на теплопередачу. Чим менша ця різниця, тим менше витрат енергії на одиницю LNG.

При використанні чистих холодоагентів як холодоносіїв для охолодження і зрідження NG різниця температур між гарячими та холодними композитами стає більшою через постійну температуру під час фазового переходу. Це робить

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
						8
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		

процеси в теплообмінних апаратах необоротними. Що призводить до більших енергетичних витрат у процесі.

Характеристики циклу змішаного холодоагенту (MR) полягають у тому, що як холодоагент використовується багатокомпонентна суміш, що складається з вуглеводнів від C1 (метан) до C5 (пентан) і азоту. А метод охолодження - це дроселювання охолодженої рідини [5, 6]. Основна особливість MR полягає в тому, що температура кипіння кожного компонента холодоагенту різна, тому його можна поступово конденсувати та випаровувати у різних теплообмінниках, щоб забезпечити холодопродуктивність на різних температурних рівнях, що дозволяє охолоджувати природний газ до зрідження. Навіть в тому самому теплообміннику, оскільки склад холодоагенту постійно змінюється при забезпеченні холодопродуктивності, його температура охолодження відповідно постійно змінюється, що робить складову криву гарячого-холодного композиту в теплообміннику ближчою і знижує незворотні втрати в процесі теплообміну.

Ще однією перевагою процесу MR є те, що при зміні умов виробництва, таких як склад природного газу, температура навколишнього середовища та виробничі вимоги, склад змішаного холодоагенту можна коригувати, щоб адаптуватися до цих змін, так що процес може продовжувати працювати за низького питомого енергоспоживання [7]. Навіть у деяких випадках, автоматично змінюючи склад змішаного холодоагенту, процес можна автоматизувати при зміні умов роботи.

Процеси зрідження природного газу є енергоємними, а процеси зі змішаним холодоагентом мають найменше енергоспоживання серед трьох типів процесів зрідження природного газу.

Було запропоновано кілька добре відомих процесів зрідження природного газу в циклах із змішаним холодоагентом [8–13]. В патентах представлено безліч конфігурацій виробництва LNG та пов'язаних з ним холодильних циклів, наприклад, процес зрідження з попереднім охолодженням пропаном (C3MR)

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		9

[11], процес з подвійним змішаним холодоагентом (DMR) [12] та каскадний цикл зі змішаним рідким хладагентом (MFC) [13].

Кількість пристроїв та необхідна потужність у циклах охолодження є двома найбільш важливими факторами, які враховувалися при проектуванні конфігурацій. А також споживання енергії у всіх виробничих процесах має важливе значення.

Першим кроком до зниження енергоспоживання процесів зрідження є визначення того, де і якою мірою енергія втрачається через незворотність процесу. Таке завдання вирішує термодинамічний аналіз конкретного процесу. За допомогою термодинамічного аналізу можна встановити місця основних неефективностей і, отже, частини обладнання чи етапи процесу, які можуть бути усунені або змінені для підвищення енергетичної ефективності [14].

Енергетичний аналіз широко використовується з метою оцінки термодинамічних систем. Однак цей метод не може показати, як і де в системі чи процесі виникає незворотність.

Для визначення незворотності процесів застосовують метод ексергетичного аналізу. Ексергетичний аналіз зазвичай визначає максимальну продуктивність системи та виявляє місця ексергетичного руйнування. Деструкція ексергії чи незворотності забезпечує загальнозастосовувану кількісну міру неефективності проців.

Таким чином, щоб підвищити енергетичну ефективність процесів LNG проводять ексергетичний аналіз. Результати аналізу вкажуть шляхи мінімізації енергоспоживання процесу, або за рахунок зміни вже встановлених процесів або розробки нових процесів.

Як зазначалося вище зниження енергоспоживання та збільшення потужності та ефективності зрідження є основними цілями процесу зрідження природного газу. Завдяки детальному аналізу втрат енергії у різному устаткуванні в усьому процесі зрідження, а також за рахунок покращення процесу зрідження та

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		10

коригування експлуатаційних параметрів все ще є можливості для прогресу в оптимізації конструкції процесу зрідження.

У роботі пропонується проаналізувати 3 найтрадиційніші процеси LNG та порівняти їх переваги та недоліки за енергетичними та ексергетичними методами аналізу. Це: цикл із одним змішаним холодоагентом SMR – Linde [13], цикл SMR - Air Products and Chemicals Inc (APCI) [15], та MFC – Linde [13].

Вибрані процеси LNG мають від одного до трьох окремих циклів, а робочою речовиною в циклах є багатокомпонентний хладагент (MR). Результати цих аналізів можуть стати підходящою основою для структурної оптимізації процесів.

Метою роботи є термодинамічний аналіз процесів зрідження природного газу з багатокомпонентним холодоагентом MR

Результати роботи поповнять базу досліджень про передові та застосовні процеси зрідження, що допоможе у вдосконаленні та оптимізації таких процесів з точки зору енергозбереження.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

- провести аналіз технологічних схем трьох процесів LNG з багатокомпонентним холодоагентом MR.
- дослідити термодинамічні процеси, що відбуваються в елементах технологічних схем;
- провести енергетичний аналіз ефективності процесів LNG з багатокомпонентним холодоагентом MR;
- розробити методику ексергетичного аналізу процесів LNG з багатокомпонентним холодоагентом MR;
- проаналізувати отримані результати аналізу.
- **Об'єктом дослідження** є технологічна схема процесу LNG з багатокомпонентним холодоагентом MR

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		11

Предметом дослідження є термодинамічні процеси, що здійснюються в елементах технологічної схеми.

Методи дослідження – термодинамічний аналіз та числове моделювання термодинамічних процесів в елементах технологічної схеми.

Наукова новизна одержаних результатів

У роботі вперше здобуто такі наукові результати:

– отримав подальший розвиток метод розширеного ексергетичного аналізу, якій базується на методах сучасної прикладної термодинаміки у схемно-циклових рішеннях зрідження LNG.

Обґрунтованість і достовірність результатів досліджень.

Обґрунтування отриманих результатів здійснено на основі загальноприйнятого підходу щодо моделювання процесів, що базуються на основних положеннях термодинаміки. Отримані результати не суперечать висновкам відомих теорій.

Практичне значення отриманих результатів.

Методика визначення величин незворотностей ексергетичним методом є підставою для удосконалення процесів зрідження LNG

Фактологічною основою є підручники, навчальні посібники, а, матеріали фірм-виробників, які містяться на відповідних інтернет-сайтах, періодичних технічних виданнях та ін.

Структура роботи

Магістерська робота складається з вступу, двох глав, загальних висновків, охорони праці, економічних показників, списку використаних джерел. Зміст роботи викладено на 77 сторінках, включаючи 10 рисунків, 16 таблиц, список інформаційних джерел 37 найменувань.

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		12

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Багато дослідників продовжують спроби покращити або оптимізувати процес зрідження природного газу з багатокомпонентним холодоагентом MR для підвищення ефективності, оскільки навіть збільшення ефективності на 1% означає величезну економію енергії.

Процес з одним змішаним холодоагентом MR використовувався на трьох виробничих лініях алжирської установки зі зрідження газу Skikda і вперше введено в експлуатацію в 1981 році. Зараз цей процес використовується більш ніж на 20 заводах з виробництва LNG у всьому світі [16]. Процес SMR може ефективно знизити початкові інвестиції завдяки перевагам компактною конструкції, легкої ваги та меншої кількості технологічного обладнання. Річний обсяг виробництва LNG зазвичай знаходиться в межах 2 млн тонн на рік [17], що стосується малотоннажних заводів з виробництва LNG. Оскільки він має модульну природу, легко розширюється і зручний для монтажу обладнання на рамі, що робить SMR дуже доцільним для морського застосування, оскільки його енергоспоживання більш ніж на 30% нижче, ніж при циклах розширення [18].

У роботі [19] вивчалось поліпшення процесу зрідження природного газу з використанням однієї суміші холодоагентів (SMR). Було досліджено вплив основних параметрів, таких як склад змішаного холодоагенту (MR) та робочий тиск, на потребу в енергії стиснення. Результати показали, що запропонована методологія оптимізації проста і ефективна щодо оптимальних умов експлуатації і дозволяє заощадити до 30,6% навантаження компресора порівняно з базовим варіантом. Також було розглянуто вплив температури на виході інтеркулера на енергозбереження. У роботі [20] для оптимізації процесу зрідження природного газу з одним змішаним холодоагентом використовується Парадигма рою частинок. Оптимізація успішно підвищила ефективність за рахунок зниження

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		13

потреби в енергії стиснення приблизно на 100%. 10% порівняно з базовим сценарієм. У дослідженні [21] обговорюються процес теплообміну і втрати ексергії в рекуперативному теплообміннику процесу зрідження LNG SMR. Пропонується новий метод регулювання змішаного холодоагенту для досягнення високої ефективності системи SMR. Автори роботи [22] оптимізували процес SMR за допомогою нелінійного програмування та аналізу ексергетичної ефективності. Ефективність процесу була підвищена за рахунок використання складу та витрати холодоагенту, тиску всмоктування та випаровування, а також випаровування холодоагенту як розрахункові змінні.

Традиційний процес SMR зазвичай є процесом одноступінчастого стиснення і одноступінчастого дроселювання, це призводить до того, що процес стиснення в компресорі буде неізотермічний. Використання багатоступеневого стиснення та багатоступінчастого охолодження може ефективно знизити температуру на виході компресора та зменшити різницю температури на теплопередачу до охолоджувача [23, 24, 25]. Багато вчених перетворили цей процес у процес триступеневого стиснення та триступеневого дроселювання, щоб підвищити адіабатичний ККД процесу стиснення [26]. Однак, автори роботи [27] виявили, що додавання насосів може знизити менше енергоспоживання більш ефективно, ніж додавання компресорів.

У 2006 році процес змішаного каскаду рідини (MFC), розроблений Linde та Statoil, був успішно реалізований на проєкті Snohvit LNG в Норвегії [28]. Процес MFC має більш високий COP, ніж інші процеси з термодинамічної точки зору [29], проте далеко не досягає максимально досяжної енергоефективності через складну і сильно нелінійну термодинамічну взаємодію між розрахунковими змінними, умовами обмежень (близькими до температури в багатопоточному теплообміннику) і енергоефективність [30]. Каскадний процес зрідження із трьома циклами змішаних холодоагентів має великий потенціал для великомасштабного виробництва LNG, але також споживає багато енергії. Хоча кількість циклів охолодження може підвищити термічний ККД процесу, воно

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
						14
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		

збільшує як кількість, так і вартість компонентів. Тому для вирішення цієї проблеми пропонується процес комплексного проектування, що поєднує процес MFC із видобутком природного газового конденсату [31].

Усі розглянуті роботи є цінним внеском у формуванні методів аналізу та оптимізації технологічного процесу MR, що відповідає енергетичним, економічним та екологічним вимогам сучасного світу.

Огляд літератури показав, що цикли зрідження вимагають великої кількості енергії, і, відповідно, методи аналізу, пов'язані з енергетикою, є найкращим інструментом, який можна використовувати для їх оцінки.

У роботі пропонується провести розширений енергетичний аналіз трьох найбільш традиційних процесів отримання LNG. Такий аналіз допоможе виявити найбільш неефективні компоненти у процесах зрідження та визначити частини цих неефективностей, яких можна уникнути, для визначення шляхів удосконалення технологій зрідження.

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		15

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

2.1. Вивчення технологічних схем процесів MR

У роботі розглянуто три процеси зрідження природного газу з змішаним холодоагентом.

Процес SMR– Linde

Одноступінчасті процеси зрідження складаються з одного циклу змішаного холодоагенту, тому кількість обладнання та постійні витрати менше ніж в інших процесах зрідження. Більше того, зменшення кількості компонентів процесу знижує складність процесів.

Технологічна схема процесів зрідження природного газу SMR компанії Linde AG [13] представлена на рис.2.1

Процес складається з двох частин: циклу змішаного холодоагенту (SMR) та циклу природного газу (NG).

Опис SMR – Linde

Основними компонентами циклу SMR є: три відцентрових компресора (KM1, KM2, KM3), три проміжних охолоджувача, які охолоджуються зовнішнім повітрям (ПО1, ПО2, ПО3), три паро-рідинних сепаратора (С1, С2, С3), змішувачі (З1, З2, З3), чотири дросельних вентиля (ДВ1, ДВ2, ДВ3, ДВ4), та чотирьох багатопотокових теплообмінників (ТО1), (ТО2), (ТО3), (ТО4), які є загальними для циклів SMR та природного NG.

Основними компонентами циклу NG є: дросельний вентиль ДВ5, чотири багатопотокових теплообмінника (ТО1), (ТО2), (ТО3), (ТО4), які є загальними для циклів SMR та природного NG та паро-рідинний сепаратор NG (С4).

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		16

Робочі процеси в контурі SMR

Пари хлорогену MR мольною концентрацією X надходять в секцію стиснення де послідовно стискаються в КМ1 і КМ2 з охолодженням пари між ступенями в ПО1 і ПО2 (точка 36, 1, 2, 3) відповідно. На виході з ПО2 температура хлорогену становить 35 і тиск 25,5 бар

У такому стані (точка 3) пара MR заходить у С1, де розділяється на важкі фракції з мольною концентрацією X2 (точка 5) та легі фракції з мольною концентрацією X1 (точка 4). Потік X2 охолоджується в ТО1 (точка 10), дроселюється в ДВ1 (точка 35) і приходить в 31. Потік X1 стискається в КМ2/2 (точка 6), охолоджується в ПО3 (точка 7) і поділяється в сепараторі С2 на потік з мольною концентрацією X4 (точка 8) і потік з мольною концентрацією X3 (точка 9). Потік X4 направляється в ТО1 охолоджується (точка 13) і направляється в С3 де поділяється на два потоки: потік з мольною концентрацією X6 (точка 17) і потік з мольною концентрацією X5 (точка 16). Потік X5 послідовно охолоджується в ТО2 (точка 20), ТО3 (точка 26) і ТО4 (точка 31), дроселюється в ДВ4 (точка 29) і направляється в ТО4, де кипить (точка 32), пар з концентрацією X5 надходить у 31. Потік рідини X6 охолоджується в ТО2 (точка 21) і в ТО3 (точка 27), дроселюється в ДВ3 (точка 33) і надходить у 31, де зустрічається з потоком X5, в результаті чого утворюється потік X4 (точка 24), Після 31 потік X4 (точка 24) нагрівається ТО3 (точка 28) і приходить в 32. Потік X3 після С2 (точка 9) послідовно охолоджується в ТО1 (точка 14), і в ТО2 (точка 22), заходить в 32 де зустрічається з потоком X4 і обрізається потік X1 (точка 18), який нагрівається в ТО2 і заходить в 33, де зустрічається з потоком X2, в результаті змішування утворюється потік з початковою концентрацією X (точка 11), який перегрівається в ТО1 (точка 15) і цикл замикається.

Робочі процеси в контурі NG

Сировинний природний газ надходить у ТО1 при температурі 13°C точка (NG) охолоджується до -3°C (точка 12). Далі охолоджується в ТО2 і ТО3 до температури -67°C (точка 19) и -93°C (точка 25) відповідно. Потім у ТО4

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		17

природний газ переохолоджується до 161°C (точка 30), в ДВ5 знижується його тиск до 1. Волога пара заходить до С4 (точка 37). Нарешті, рідина виходить із С4, залишає процес як продукт LNG.

Процес SMR – Air Products and Chemicals Inc

Air Products and Chemicals Inc в одному зі своїх патентів [15] представила простий і новий одностадійний процес змішування холодоагентів, для якого потрібно менше обладнання, ніж для Лінде.

Технологічна схема процесу представлена на рис 2. 2.

Як видно з рис.2.2 у процесі використано лише два теплообмінники ТО1 та ТО2 за рахунок чого зменшуються капітальні та експлуатаційні витрати спрощується детальне проектування процесу.

Опис SMR – Air Products and Chemicals Inc

Основними компонентами циклу SMR є: три відцентрових компресора (КМ1, КМ2, КМ3), три проміжних охолоджувача, які охолоджуються зовнішнім повітрям (ПО1, ПО2, ПО3), два паро-рідинних сепаратора (С1, С2,), змішувачі (31, 32), два дросельних вентиля (ДВ1, ДВ2), та два багатопотокових теплообмінників (ТО1), (ТО2) які є загальними для циклів SMR та природного NG.

Основними компонентами циклу NG є: дросельний вентиль (ДВ3) два багатопотокових теплообмінника (ТО1), (ТО2), які є загальними для циклів SMR та природного NG та паро-рідинний сепаратор NG (С3).

Робочі процеси в контурі SMR

Пари хлорогену MR мольною концентрацією $X1^1$ надходять в секцію стиснення (точка 20¹) де стискаються в КМ1(точка 1¹) з охолодженням пари між ступенями в ПО1 (точка1¹) у такому стані пара MR заходить у 31, туди ж приходить потік перегрітої пари з мольною концентрацією $X2^1$ (точка16¹). Після змішування двох потоків $X1^1$ і $X2^1$ утворюється основний потік з мольною концентрацією X^1 (точка 3¹). Цей потік стискається в КМ2 (точка 12¹), охолоджується в ПО2 (точка 4¹), заходить в С1 де відбувається поділ потоку на дві фракції важку $X5^1$ і легку

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		18

X4¹. Легка фракція (точка 5¹) стискається в КМЗ і заходить в 32(точка7¹), а важка фракція стискається насосом до тиску рівному тиску нагнітання КМЗ (точка 8¹) і також подається в 32, після змішування знову утворюється потік з мольною концентрацією X¹ (точка 9¹), який охолоджується в ПОЗ(точка13¹) і у С2 ділиться на два потоки. Потік рідини (точка 13^{1/}) з концентрацією X2¹ прямує в ТО1, де охолоджується (точка 14¹), дроселюється в ДВ1 (точка 15¹) і випаровується в ТО1 (точка 16), далі прямує в 31 де змішується с потіком X1 (точка 2¹). Потік пари з концентрацією X1¹ прямує в ТО1(точка 13^{1//}), охолоджується в ТО1 (точка 17¹), конденсується в ТО2 (точка 18¹) і дроселюється в ДВ2 (точка19¹), після чого волога пара випаровується в ТО2 точка (20¹), пар, що утворився прямує в КМ1, на цьому цикл замикається.

Робочі процеси в контурі NG

Сировинний природний газ надходить у ТО1 при температурі 30°C точка (NG¹) охолоджується до -72,62°C (NG1). Далі охолоджується в ТО2 до температури -153,8°C (NG2) в ДВ3 знижується його тиск до 1,01 бар. Волога пара заходить до С3 (NG3). Нарешті, рідина виходить із С3, залишає процес як продукт LNG.

MFC – Linde

Як зазначалося в огляді літературі число циклів охолодження одна із найважливіших чинників у процесах зрідження. Збільшення кількості циклів підвищує ефективність процесу та продуктивність та знижує експлуатаційні витрати. Тим не менш, цей момент збільшує кількість компонентів та фіксовані витрати. Таким чином, можна сказати, що оптимальна конструкція процесу зрідження дуже важлива і істотно впливає на капітальні витрати.

З економічної точки зору найкраща ситуація виникає, коли потужність процесу збільшується за рахунок застосування критеріїв проектування процесу без збільшення кількості циклів та компонентів. Розроблений компанією Linde AG і Stat Oil процес LNG, що має три холодильні цикли і високу продуктивність, називається MFC [13]

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		19

Енергоефективність цього процесу висока завдяки використанню трьох різних змішаних холодоагентів (різного мольного складу) у кожному циклі. Технологічна схема процесу MFC-Linde представлена на рис 2.3.

Процес складається з чотирьох частин: циклу попереднього охолодження MR1, циклу зрідження MR2, циклу переохолодження MR3, та циклу природного газу (NG).

Основними компонентами циклу MR1 є: компресори (KM 1/1, KM 1/2), змішувач (31), проміжний повітряний охолоджувач (ПО1), багатопотоковий теплообмінник (ТО1), який є загальним для циклів MR1, MR2, MR3 та NG, багатопотоковий теплообмінник (ТО2), який є загальним для циклів MR1, MR2, MR3 та NG, роздільник (P), дросельні вентиля (ДВ1, ДВ2).

Основними компонентами циклу MR2 є: компресори (KM2/2, KM 2/1), повітряні проміжні охолоджувачі (ПО2, ПО3), дросельний вентиль (ДВ3), та багатопотокові теплообмінники (ТО1, ТО2, ТО3).

Основними компонентами циклу MR3 є: компресори (KM3/2, KM 3/1), повітряні проміжні охолоджувачі (ПО4, ПО5), дросельний вентиль (ДВ4), та багатопотокові теплообмінники (ТО1, ТО2, ТО3, ТО4).

Основними компонентами циклу NG є: дросельний вентиль (ДВ5) багатопотокові теплообмінники (ТО1), (ТО2), (ТО3), (ТО4) та паро-рідинний сепаратор NG (С1). Багатопотокові теплообмінники (ТО1), (ТО2) використовуються для попереднього охолодження сировинного газу, а (ТО3), (ТО4) - у другому та третьому циклах - для зрідження та переохолодження.

Робочі процеси в контурі MR1

Пари холодоагенту MR1 (точка 28*) стискаються в KM1/2 (точка 29*), охолоджуються в ПО1 (точка 3*) конденсуються в ТО1 (точка 7*) і попадають в роздільник, де поділяються на два потоки. Перший потік (точка 8*) дроселюється в ДВ1 (точка 10*), кипить в ТО1 (точка 11*) і прямує до 31. Другий потік (точка 9*) переохолоджується в ТО2 (точка 15*), дроселюється в ДВ2 (точка 16*), випаровується в ТО2 (точка 17*) і всмоктується в KM1/1, де відбувається

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		20

стиснення (точка 27*), далі потік потрапляє у 31, де зустрічається з першим потоком (точка 11*), утворюється основний потік MR1 (точка 28*) та цикл замикається.

Робочі процеси в контурі MR2

Пари холодоагенту MR2 (точка 22*) послідовно стискаються в компресорах КМ2/1 (точка 30*) і КМ2/2 (точка 32*), з охолодженням пари між ступенями в ПО2 (точка 31*) і ПО3 (точка 2*), направляються в багатопотокові теплообмінники ТО1, ТО2, ТО3, де послідовно охолоджуються і конденсуються (точки: 6*, 14*, 20*), далі потік дроселюється в ДВ3 (точка 21*), випаровується в ТО3 (точка 22*) цикл замикається.

Робочі процеси в контурі MR3

Пари холодоагенту MR3 послідовно стискаються в КМ3/1 (точка 33*), КМ3/2 (точка 35*) з проміжним охолодженням пари між ступенями в ПО4 та ПО5 (точки: 34*, 1*) і послідовно охолоджуються, конденсуються і переохолоджуються в багатопотокових теплообмінниках ТО1, ТО2, ТО3, ТО4 (точка 5 *, 13 *, 19 *, 24 *), переохолоджена рідина дроселюється в ДВ4 (точка 25*), кипить в ТО4 (точка 26 *) і прямує в КМ1, цикл замикається.

Робочі процеси в контурі NG

Сировинний природний газ надходить у ТО1 при температурі 13°C и тиску 60 бар точка (NG) охолоджується до 3°C (точка4*). Далі охолоджується в ТО2 до температури -27°C (точка 12*), охолоджується в ТО3(точка18*), зріджується в ТО4 (точка 23*) в ДВ5 знижується його тиск до 1,01 бар. Волога пара заходить до С1 (точка 36*). Нарешті, рідина виходить із С1, залишає процес як продукт LNG.

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		21

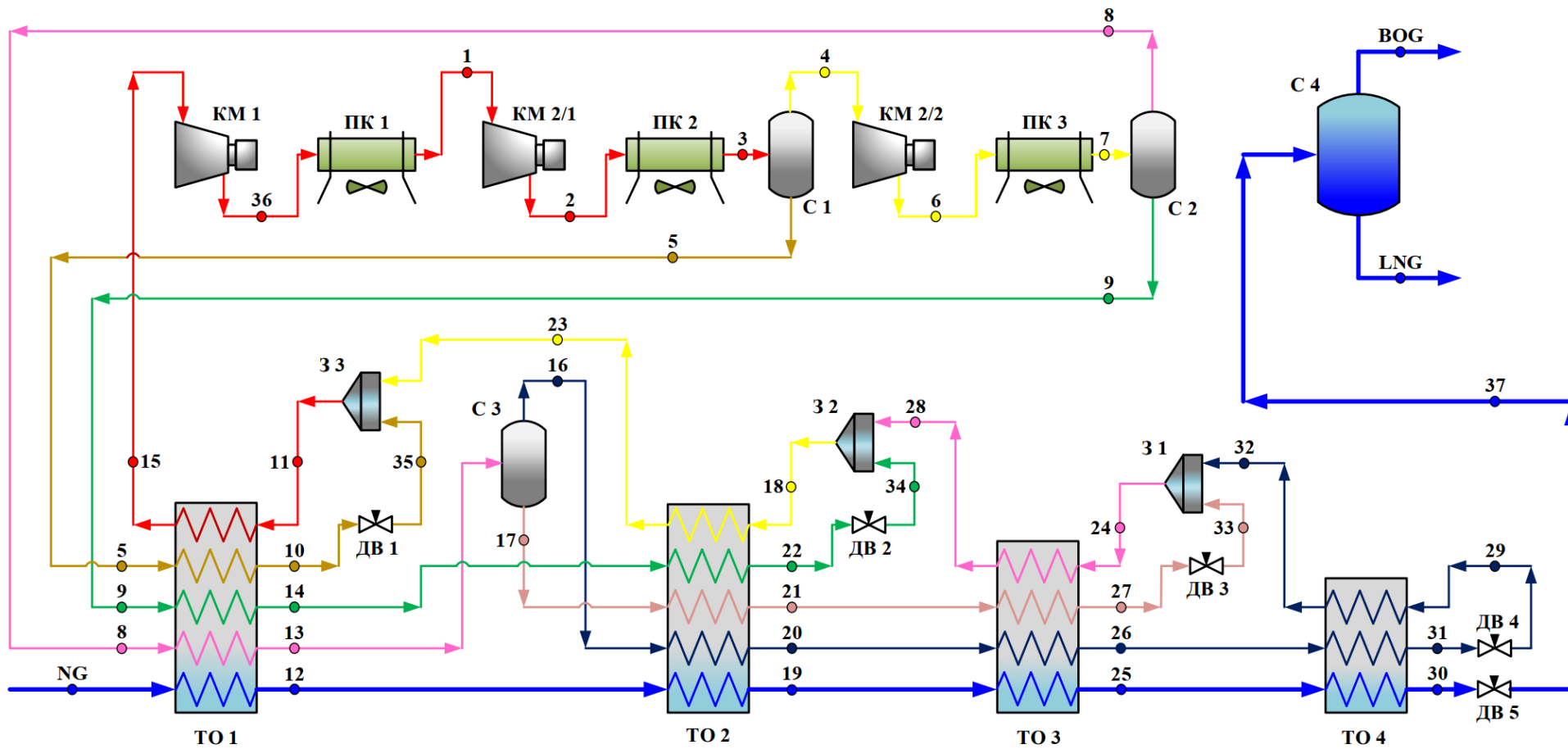


Рисунок.2.1 – Технологічна схема процесу зрідження природного газу SMR-Linde

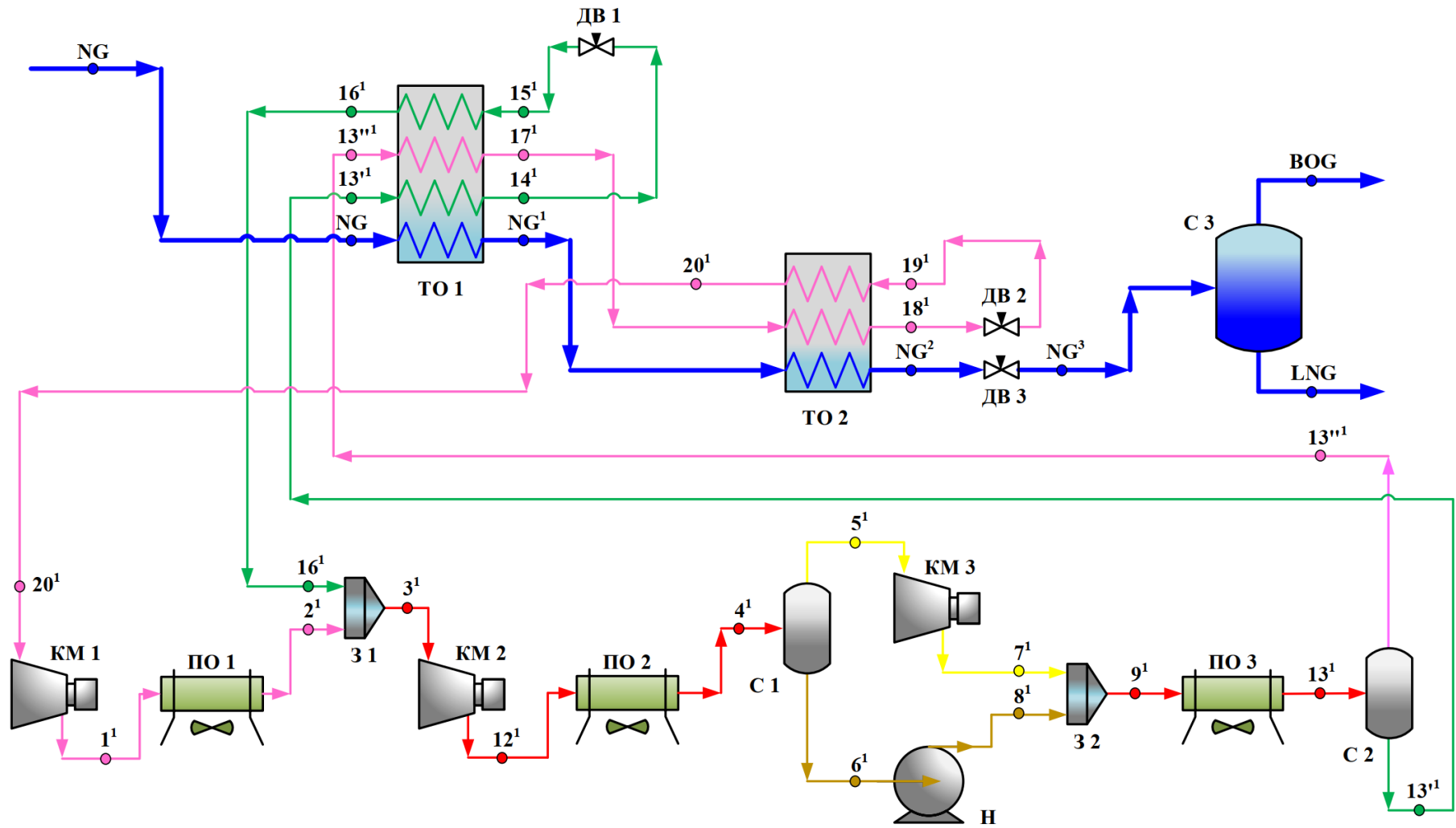


Рисунок.2.2 – Технологічна схема процесу зрідження природного газу SMR – Air Products and Chemicals Inc

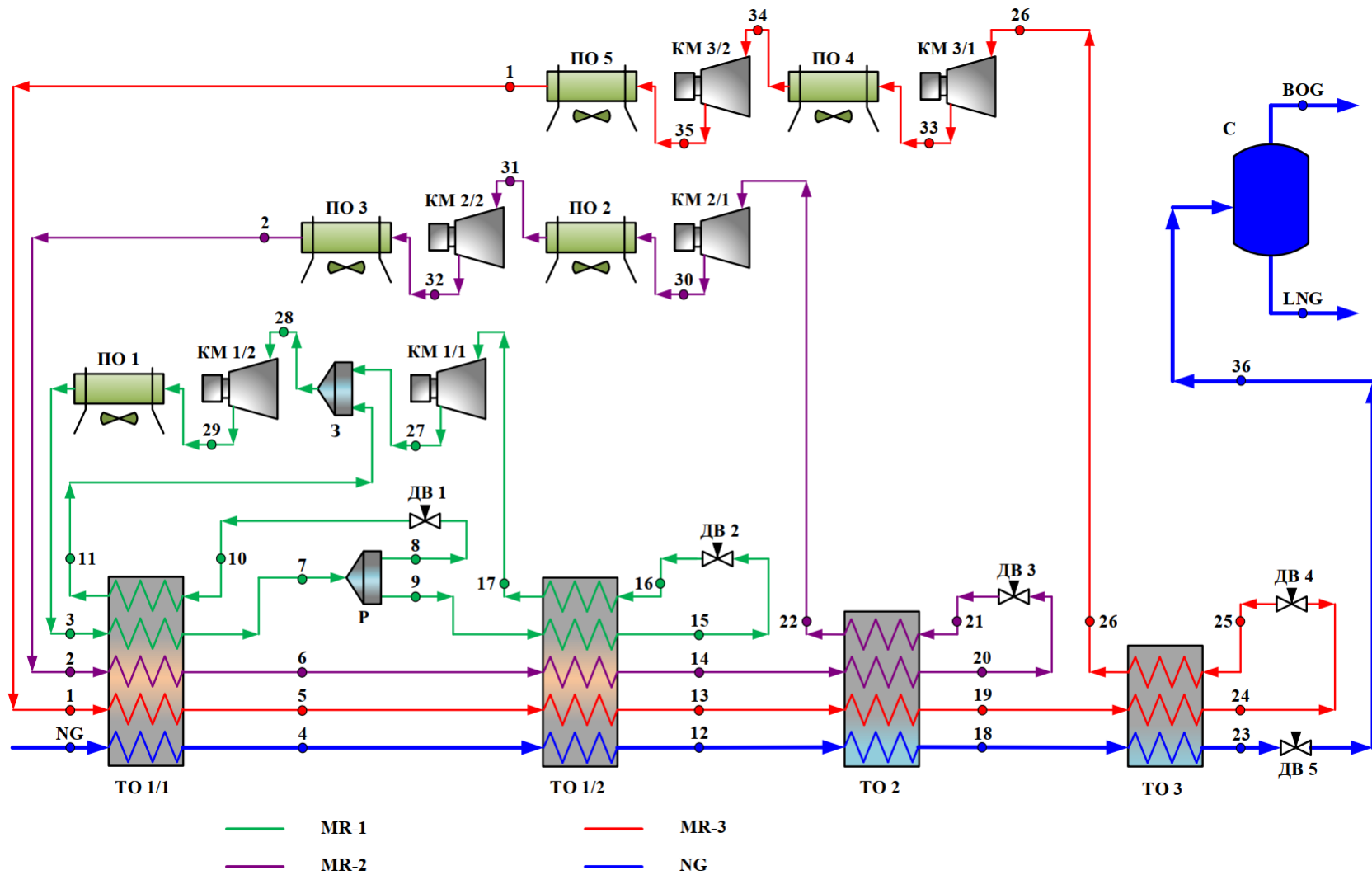


Рисунок.2.3 – Технологічна схема процесу зрідження природного газу MFC-Linde

2.2 Моделювання процесів LNG з використанням циклу MR

У роботі процеси були змодельовані за допомогою програмного забезпечення Aspen HYSYS з термодинамічною моделлю PRSV. Пакет властивостей REFPROP у системі фізичних властивостей Aspen, вибраний для визначення термодинамічних властивостей робочих речовин.

У роботі [13] подано умови експлуатації сировинного газу для трьох процесів компанії Linde AG.

У цьому дослідженні основні термодинамічні дані, включаючи робочі умови та значення ексергії потоків, були розраховані за допомогою симулятора хімічного процесу та Програмного забезпечення Matlab.

Було вивчено три найбільш традиційні та класичні процеси ЗПГ.

Вони моделювалися за даними про витрати (тиск, температура, склад та молярна витрата технологічних потоків)

При моделюванні використовувалися такі припущення:

- температура навколишнього середовища 25°C , атмосферний тиск 1,013бар;
- мінімальна різниця температур у середині многопотоківих теплообмінників $0,5^{\circ}\text{C}$;
- адіабатний КПД компресорів і насосів встановлюється 0,9% і 75% відповідно.
- всі процеси працюють у встановленому режимі; крім того, вплив потенційної та кінетичної енергії незначний;
- падіння тиску в теплообмінниках та трубопроводах незначне;
- теплообмінники та трубопроводи не мають теплових втрат;
- потоки через дросельні вентилялі ізоентальпні.

Компоненти процесів моделювалися з урахуванням масового, і енергетичного балансу.

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		25

У таблицях 2.1–2.8 та на рис. 2.4–2.6 представлені необхідні дані про аналізовані процеси.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики сировинного газу і хладагента процесу SMR-Linde

Назва потоку	NG	LNG	SMR
Мольна витрата (кмоль/год)	25120,00	24065,97	61800,00
Температура (°C)	13,00	-164	35
Тиск (бар)	60	1,01	9,0
Компоненти (моль%)			
CH ₄	89	89,659	27,4
C ₂ H ₆	5,5	5,7514	33,4
C ₃ H ₈	2,5	2,6144	25,8
i-C ₄ H ₁₀	1	1,0458	7,7
N ₂	2	0,92937	5,7

Таблиця 2.2 – Склад потоків MR в деяких точках процесу SMR-Linde

Мольний склад, моль	Компонент				
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	i- C ₄ H ₁₀	N ₂
X	0,274	0,334	0,258	0,077	0,057
X1	0,274	0,334	0,258	0,077	0,057
X2	0,053453	0,23898	0,44531	0,25749	0,0047602
X3	0,11872	0,32632	0,39246	0,14969	0,012804
X4	0,34510	0,33752	0,19643	0,043715	0,077237
X5	0,51690	0,26058	0,071658	0,0082168	0,142650
X6	0,19565	0,40445	0,30497	0,074596	0,020335

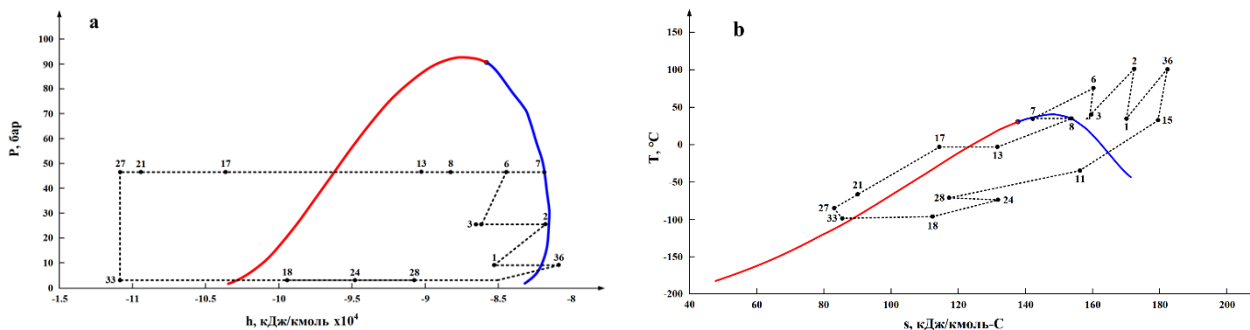


Рисунок.2.4 – $P-h(a)$ і $T-s(b)$ діаграми процесу SMR-Linde

Таблиця 2.3 – Термодинамічні параметри та молярна витрата в узлових точках SMR-Linde

№	P, бар	t, °C	h, кДж/кмоль	s, кДж/кмоль К	Ni, кмоль/с	X, моль
NG	60	13	13543	74,486	6,977	X ^{NG}
1	9	35	21160	112,56	17,166	X
2	28,426	101,6	24575	113,82	17,166	X
3	28,426	35	19740	99,597	17,166	X
4	28,426	35	19740	99,597	16,942	X1
5	28,426	35	132620	68,927	0,224	X2
6	46,5	76,51	21732	102,5	16,942	X1
7	46,5	35	15944	84,620	16,942	X1
8	46,5	35	17375	92,413	11,5079	X4
9	46,5	35	12820	67,601	5,4345	X3
10	28,426	-1	9104,6	54,601	0,224	X2
11	3	-34,89	16144	102,02	17,166	X
12	60	-3	12746	71,619	6,977	X ^{NG}
13	46,5	-3	10726	69,486	11,5079	X4
14	46,5	-3	8588,3	52,981	5,4345	X3
15	3	32,69	21393	122,11	17,166	X
16	46,5	-3	13329	88,666	5,7427	X5
17	46,5	-3	8462,3	52,801	5,7652	X6
18	3	-70,9	6709	59,440	16,942	X1
19	60	-67	6250	43,021	6,977	X ^{NG}
20	46,5	-67	5506,10	55,743	5,7427	X5
21	46,5	-67	2815	29,058	5,7652	X6
22	46,5	-50	4160	35,009	5,4345	X3
23	3	-34,94	13775	111,07	16,942	X5
24	3	-95,71	4255,2	50,195	11,5079	X4
25	60	-93,0	3861	30,726	6,977	X ^{NG}
26	46,5	-93	2610,3	40,719	5,7427	X5
27	46,5	-85	1389,5	21,825	5,7652	X6
28	3	-73,38	7882,6	69,364	11,5079	X4
29	3	-162,8	-1340,6	16,140	5,7427	X5
30	60	-161	-285,7	2,0659	6,977	X ^{NG}
31	46,5	-156	-1379,7	13,624	5,7427	X5
32	3	-95,52	7552	79,689	5,7427	X5
33	3	-98,34	1348,4	24,167	5,7652	X6
34	3	-66,22	4092,5	37,346	5,4345	X3
35	3,5	-25,3	19146	61,686	0,224	X2
36	9	100,2	25289	124,70	17,16	X
37	1,01	-164	-297,35	4,1112	6,977	X ^{NG}
38	1,01	-164	6823,40	99,879	0,2927	X ^{BOG}
LNG	1,01	-164	-623,15	-0,27060	6,68499	X ^{LNG}

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики сировинного газу і хладагента процесу SMR-APCI

Назва потоку	NG	LNG	SMR
Мольна витрата (кмоль/год)	27054,37	25011,22	67900,00
Температура (°C)	30,00	-162,10	32
Тиск (бар)	60,51	1,01	60
Компоненти (моль%)			
CH ₄	94,46	94,73	27,4
C ₂ H ₆	2,61	2,82	33,4
C ₃ H ₈	0,65	0,70	25,8
i-C ₄ H ₁₀	0,65	0,70	7,7
N ₂	0,98	0,33	5,7

Таблиця 2.5 – Склад потоків MR в деяких точках процесу SMR-APCI

Мольний склад, моль	Компонент				
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	i- C ₄ H ₁₀	N ₂
X ¹	0,274	0,334	0,258	0,077	0,057
X1 ¹	0,38916	0,31618	0,16323	0,034304	0,097116
X2 ¹	0,17786	0,34887	0,33712	0,11264	0,023509
X4 ¹	0,27894	0,33611	0,25376	0,073028	0,058168
X5 ¹	0,051924	0,23939	0,44866	0,25551	0,0045129

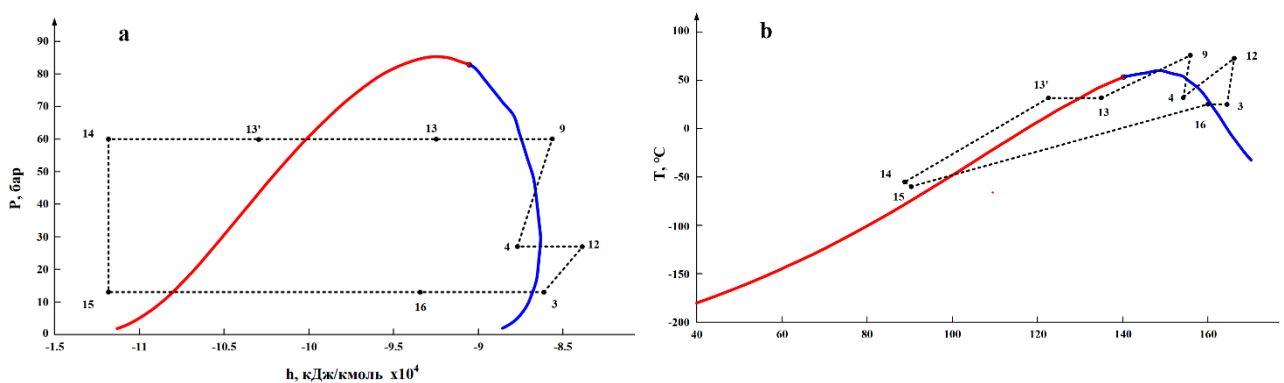


Рисунок.2.5 – $P-h(a)$ і $T-s(b)$ діаграми процесу SMR-APCI

Таблиця 2.6 – Термодинамічні параметри та молярна витрата в узлових точках SMR-APCI

№	P, бар	t, °C	<i>h</i> , кДж/кмоль	<i>s</i> , кДж/кмоль К	<i>N_i</i> , кмоль/с	<i>X</i> , моль
20 ¹	1,99	-22,80	16319	115,54	8,44306	X ¹
1 ¹	13,0	102,2	22349	119,7	8,44306	X ¹
2 ¹	13,0	32	18463	108,60	8,44306	X ¹
3 ¹	13,0	25,7	20325	107,00	18,8611	X ¹
12 ¹	27,10	72,62	22579	108,60	18,8611	X ¹
4 ¹	27,10	32,31	19415	98,844	18,8611	X ¹
5 ¹	27,10	32,31	19559	99,536	17,3055	X ¹⁴
6 ¹	27,10	32,31	12920	67,768	1,5555	X ¹⁵
7 ¹	60,0	88,57	21869	101,43	17,3055	X ¹⁴
8 ¹	60,0	36,37	13359	68,214	1,5555	X ¹⁵
9 ¹	60,0	76,27	20832	98,269	18,8611	X ¹
13 ¹	60,0	32,0	14004	72,285	18,8611	X ¹
13 ¹	60,0	32,0	12431	67,373	10,41	X ²
13 ^{//1}	60,0	32,0	15222	87,128	8,44306	X ¹
14 ¹	60,0	-54,91	3900	34,816	10,41	X ²
15 ¹	13,01	-60	3844,3	36,217	10,41	X ²
16 ¹	13,0	25,71	22084	105,79	10,41	X ²
17 ¹	60,0	-21,0	8363,9	62,261	8,44306	X ¹
18 ¹	69,0	-164,3	-2794	-0,52178	8,44306	X ¹
19 ¹	2,0	-167	-2770,5	2,6361	8,44306	X ¹
NG	66,51	30,0	14060	73,820	7,515	X ^{ING}
NG ¹	66,5	-52,5	9163,3	54,557	7,515	X ^{ING}
NG ²	66,5	-153,8	355,29	4,5094	7,515	X ^{ING}
NG ³	1,01	-162,10	321,76	6,6569	7,515	X ^{ING}
LNG	1,01	162,10	-287,85	0,31045	6,9475	X ^{1LNG}
BOG	1,01	162,10	8556,3	183,11	0,5674	X ^{1BOG}

Таблиця 2.7 – Технічні характеристики сировинного газу і хладагента процесу та холодоагенту для процесу MFC-Linde

Назва потоку	NG	LNG	MR3	MR2	MR1
Мольна витрата (кмоль/год)	25120,00	24197,52	18100,00	25700,0	34390,0
Температура (°C)	13,00	-164,30	35	35	35
Тиск (бар)	60,00	1,01	33,9	27,9	16,9
Компоненти (моль%)					
CH ₄	89,0	89,62	42,45	12,65	0
C ₂ H ₆	5,50	5,71	0	32,92	0,01
C ₂ H ₄	0,0	0,0	40,24	27,77	11,29
C ₃ H ₈	2,5	2,60	0	26,66	73,57
n-C ₄ H ₁₀	1,0	1,04	0	0	15,13
N ₂	2,0	1,03	17,31	0	0

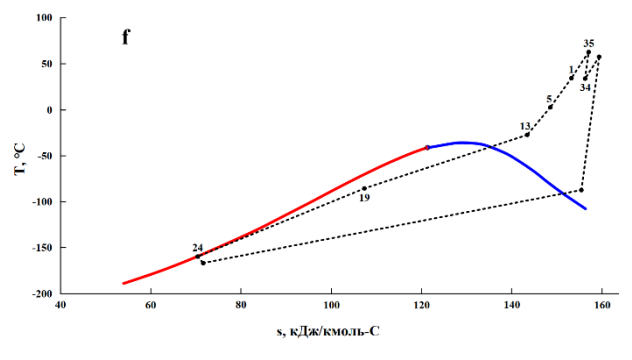
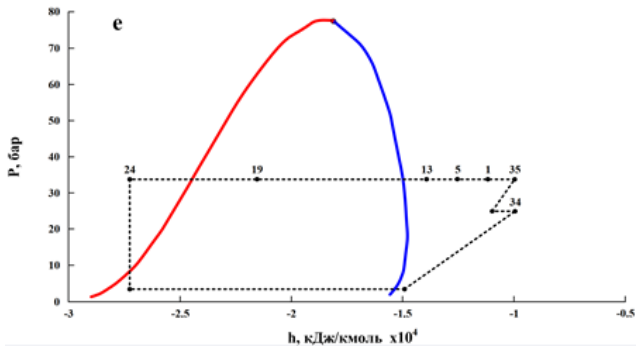
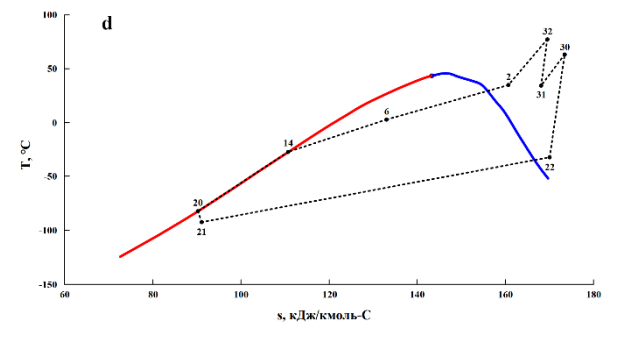
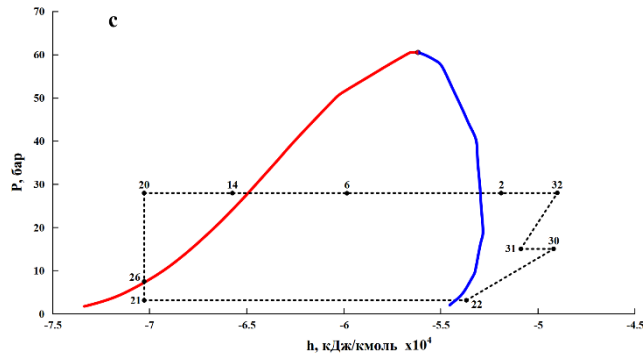
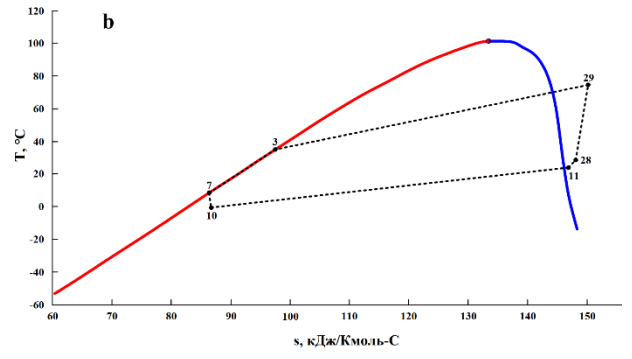
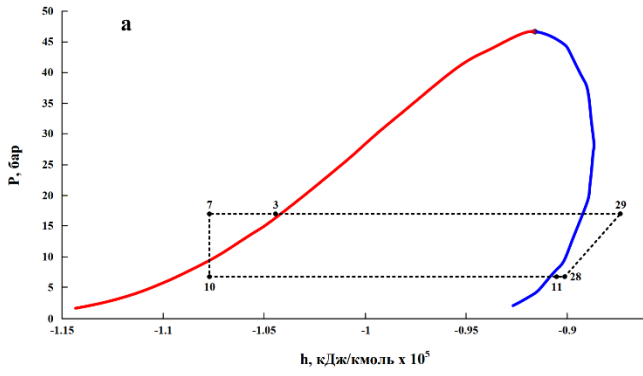


Рисунок.2.6 – $P-h(a,c,e)$ і $T-s(b,d,f)$ діаграми процесу MFC-Linde

Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата

Таблиця 2.8 – Термодинамічні параметри та молярна витрата в узлових точок MFC-Linde

№	P, бар	t, °C	h, кДж/кмоль	s, кДж/кмоль К	Ni, кмоль/с	X, моль
NG	60	13	13553	74,497	6,9777	X ^{NG}
1	33,9	35	14805	98,418	5,0277	X ^{MR3}
2	27,9	35	19656	89,696	7,1388	X ^{MR2}
3	16,9	35	13197	64,999	9,55277	X ^{MR1}
4	60	3	1306	72,742	6,9777	X ^{NG}
5	33,9	3	13422	93,681	5,0277	X ^{MR3}
6	27,9	3	11814	62,476	7,1388	X ^{MR2}
7	16,9	8,8	10103	54,512	9,55277	X ^{MR1}
8	16,9	8,8	10103	54,512	5,73166	X ^{MR1}
9	16,9	8,8	10103	54,512	3,8211	X ^{MR1}
10	6,7	-0,53	9090	54,213	5,73166	X ^{MR1}
11	6,7	24,3	27199	114,78	5,73166	X ^{MR1}
12	60	-27	11418	66,436	6,9777	X ^{NG}
13	33,9	-27	12063	88,463	5,0277	X ^{MR3}
14	27,9	-27	5898,1	40,065	7,1388	X ^{MR2}
15	16,9	-22	6782,1	42,0490	3,8211	X ^{MR1}
16	3	-29,58	6577,1	41,717	3,8211	X ^{MR1}
17	3	-1,41	25825	116,01	3,8211	X ^{MR1}
18	60	-85,20	4429,1	33,793	6,9777	X ^{NG}
19	33,9	-85,20	4468,6	52,678	5,0277	X ^{MR3}
20	27,9	-81,5	1512,8	19,992	7,1388	X ^{MR2}
21	3,1	-92,09	1544,3	21,295	7,1388	X ^{MR2}
22	3,1	-31,92	17936	99,398	7,1388	X ^{MR2}
23	60	-162	-357,28	1,4472	6,9777	X ^{NG}
24	33,9	-159	-1206,7	15,688	5,0277	X ^{MR3}
25	3,5	-166,2	-1235,8	16,875	5,0277	X ^{MR3}
26	3,5	-87,08	11055	100,7	5,0277	X ^{MR3}
27	6,7	35,31	28109	117,780	3,8211	X ^{MR1}
28	6,7	28,73	27565	116,00	9,55277	X ^{MR1}
29	16,9	75,07	30318	117,94	9,55277	X ^{MR1}
30	15	62,68	22405	102,69	7,1388	X ^{MR2}
31	15	35	20681	97,334	7,1388	X ^{MR2}
32	27,9	76,94	22639	98,780	7,1388	X ^{MR2}
33	25	57,72	15953	104,40	5,0277	X ^{MR3}
34	25	35	15004	101,43	5,0277	X ^{MR3}
35	33,9	63,03	16012	102,17	5,0277	X ^{MR3}
36	1,01	-164,3	-373,96	3,4343	6,9777	X ^{NG}
BOG	1,01	-164,3	6722	101,58	0,256	X ^{BOG}
LNG	1,01	-164,3	-654,68	-0,44859	6,7215	X ^{LNG}

Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата

2.2.1 Енергетичний аналіз процесів

Енергоспоживання та ефективність компонентів та процесів, що розглядаються у роботі ідентифікуються у вигляді енергетичного аналізу (перший закон термодинаміки). Такий аналіз має два кількісні показники: коефіцієнт питомих витрат енергії (SEC) у процесі та коефіцієнт енергетичної ефективності процесу COP. Крім того, існують деякі якісні показники, які вказують на енергоефективність, такі як діаграми температури-ентропії ($T-s$) та тиску-ентальпії ($P-h$).

Діаграми $T-s$ і $p-H$ для аналізованих процесів для кожного окремого циклу процесу подані на рисунках 2.4-2.6. На діаграмах показані зміни ентальпії та ентропії циклічних потоків залежно від їх тиску та температури. Діаграми показують важливі термодинамічні дані про реальний і ідеальний цикл аналізованого процесу. Необоротність складових термодинамічного циклу повністю пов'язана з його відхиленням від ідеального стану. Усі реальні цикли охолодження демонструють певну незворотність.

Причини відхилення реальних процесів у циклі від ідеального (оборотного) виникають з різних джерел: тертя та передавання тепла при кінцевій різниці температур у випарнику, компресорі, теплообмінниках, процеси дроселювання в дросельних пристроях, перегрів пари на вході в компресор, падіння тиску та теплоприпливи в циклі холодоагенту.

Побудову енергетичної моделі продемонструємо на прикладі розрахунку процесу MFC-Linde.

Результаті моделювання всіх трьох процесів представлено в таб. 2.6-2.8

Мінімальна питома робота, необхідна для зрідження 1 кг природного газу:

$$w_{\min.зрідж} = T_{н.с} \cdot (s_{NG} - s_{LNG}) - (h_{NG} - h_{LNG}), \text{ кДж/кмоль.} \quad (2.1)$$

Питома адіабатна робота стиснення в компресорі KM1/1 сумішшового холодоагенту MR1

$$w_{aKM1/1(MR1)} = h_{27} - h_{17}, \text{ кДж/кмоль.} \quad (2.2)$$

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		33

Дійсна робота стиснення в компресорі КМ1/2 сумішшового холодоагенту MR1:

$$w_{KM1/1(MR1)} = \frac{w_{aKM1/1(MR1)}}{\eta_{KM}}, \text{ кДж/кмоль} \quad (2.3)$$

Питома адіабатна робота стиснення в компресорі КМ1/2 сумішшового холодоагенту MR1

$$w_{aKM1/2(MR1)} = h_{29} - h_{28}, \text{ кДж/кмоль.} \quad (2.4)$$

Дійсна робота стиснення у кріогенному компресорі природного газу Процесу 2:

$$w_{KM1/2(MR1)} = \frac{w_{aKM1/2(MR1)}}{\eta_{KM}}, \text{ кДж/кмоль} \quad (2.5)$$

Питома адіабатна робота стиснення в компресорі КМ2/1 сумішшового холодоагенту MR2:

$$w_{aKM2/1(MR2)} = h_{30} - h_{22}, \text{ кДж/кмоль.} \quad (2.6)$$

Дійсна робота стиснення в компресорі КМ2/1 сумішшового холодоагенту MR1:

$$w_{KM2/1(MR2)} = \frac{w_{aKM2/1(MR2)}}{\eta_{KM}}, \text{ кДж/кмоль} \quad (2.7)$$

Питома адіабатна робота стиснення в компресорі КМ2/2 сумішшового холодоагенту MR2:

$$w_{aKM2/2(MR2)} = h_{32} - h_{31}, \text{ кДж/кмоль.} \quad (2.8)$$

Дійсна робота стиснення в компресорі КМ2/2 сумішшового холодоагенту MR1:

$$w_{KM2/2(MR2)} = \frac{w_{aKM2/2(MR2)}}{\eta_{KM}}, \text{ кДж/кмоль} \quad (2.9)$$

Питома адіабатна робота стиснення в компресорі КМ3/1 сумішшового холодоагенту MR3

$$w_{aKM3/1(MR3)} = h_{33} - h_{26}, \text{ кДж/кмоль.} \quad (2.10)$$

Дійсна робота стиснення у кріогенному компресорі природного газу Процесу 2:

$$w_{KM3/1(MR3)} = \frac{w_{aKM3/1(MR3)}}{\eta_{KM}}, \text{ кДж/кмоль} \quad (2.11)$$

Питома адіабатна робота стиснення в компресорі КМ3/2 сумішшового холодоагенту MR3

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		34

$$w_{aKM3/2(MR3)} = h_{35} - h_{34}, \text{ кДж/кмоль.} \quad (2.12)$$

Дійсна робота стиснення у криогенному компресорі природного газу Процесу 2:

$$w_{KM3/2(MR3)} = \frac{w_{aKM3/2(MR3)}}{\eta_{KM}}, \text{ кДж/кмоль} \quad (2.13)$$

Питома витрата MR1 для охолодження 1 кг NG в ТО1/2:

$$y_1 = \frac{N_{17}}{N_{NG}}, \text{ кг.стис. MR кг.NG.} \quad (2.14)$$

Питома витрата MR1 для охолодження 1 кг NG в ТО1/1:

$$y_2 = \frac{N_3}{N_{NG}}, \text{ кг.стис. MR кг.NG.} \quad (2.15)$$

Дійсна питома сумарна робота, затрачена на стиснення MR1:

$$w_{\sum(MR1)} = w_{KM1/1(MR1)} \cdot y_2 + w_{KM1/2(MR1)} \cdot y_1 \quad (2.16)$$

Питома витрата MR2 для охолодження 1 кг NG в ТО2:

$$y_3 = \frac{N_{22}}{N_{NG}}, \text{ кг.стис. MR кг.NG.} \quad (2.17)$$

Дійсна питома сумарна робота, затрачена на стиснення MR2:

$$w_{\sum(MR2)} = (w_{KM2/1(MR2)} + w_{KM2/2(MR2)}) \cdot y_3 \quad (2.18)$$

Питома витрата MR3 для охолодження 1 кг NG в ТО3:

$$y_4 = \frac{N_{26}}{N_{NG}}, \text{ кг.стис. MR кг.NG.} \quad (2.19)$$

Дійсна питома сумарна робота, затрачена на стиснення MR3:

$$w_{\sum(MR3)} = (w_{KM3/1(MR3)} + w_{KM3/2(MR3)}) \cdot y_4 \quad (2.20)$$

Коефіцієнт зрідження NG визначається як:

$$x_m = \frac{N_{LNG}}{N_{NG}}, \quad (2.21)$$

Дійсна питома робота витрачена на стиснення MR1, MR2 і MR:

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
						35
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		

$$w_{\sum \text{diic}} = \frac{w_{\sum (MR1)} + w_{\sum (MR2)} + w_{\sum (MR3)}}{x_m} \quad (2.22)$$

Ступінь термодинамічної досконалості циклу:

$$\eta_{m\partial} = \frac{w_{\text{min.зpid}}}{w_{\sum \text{diic}}} \quad (2.23)$$

Потужність стиснення в компресорі КМ1/1 сумішшового холодоагенту MR1:

$$W_{KM1/1(MR1)} = N_{17} \cdot w_{KM1/1(MR1)}, \text{ кВт.} \quad (2.24)$$

Потужність стиснення в компресорі КМ1/2 сумішшового холодоагенту MR1:

$$W_{KM1/2(MR1)} = N_{17} \cdot w_{KM1/2(MR1)}, \text{ кВт.} \quad (2.25)$$

Потужність стиснення в компресорі КМ2/1 сумішшового холодоагенту MR2:

$$W_{KM2/1(MR2)} = N_{22} \cdot w_{KM2/1(MR2)}, \text{ кВт.} \quad (2.26)$$

Потужність стиснення в компресорі КМ2/2 сумішшового холодоагенту MR2:

$$W_{KM2/2(MR2)} = N_{22} \cdot w_{KM2/2(MR2)}, \text{ кВт.} \quad (2.27)$$

Потужність стиснення в компресорі КМ3/1 сумішшового холодоагенту MR3:

$$W_{KM3/1(MR3)} = N_{26} \cdot w_{KM3/1(MR3)}, \text{ кВт.} \quad (2.28)$$

Потужність стиснення в компресорі КМ3/2 сумішшового холодоагенту MR3:

$$W_{KM3/2(MR3)} = N_{26} \cdot w_{KM3/2(MR3)}, \text{ кВт.} \quad (2.29)$$

Загальна потужність що споживається Процесом:

$$W^{zag*} = W_{KM1/1(MR1)} + W_{KM1/2(MR1)} + W_{KM2/1(MR2)} + W_{KM2/2(MR2)} + W_{KM3/1(MR3)} + W_{KM3/2(MR3)}, \text{ кВт.} \quad (2.30)$$

Коефіцієнт питомих витрат енергії в циклі:

$$SEC = \frac{W^{zag}}{N_{LNG} \cdot V_0}, \text{ кВт год/Нм}^3. \quad (2.31)$$

де V_0 – молярний об'єм газу при нормальних умовах;

$$V_0 = 22,414 \text{ Нм}^3/\text{к моль}.$$

Тепло, відведене від MR1 в теплообміннику (ТО1/1):

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		36

$$Q_{TO1/1}^{MR1(3-7)} = N_3 \cdot (h_3 - h_7), \text{ кВт.} \quad (2.32)$$

Тепло, відведене від MR2 в теплообміннику (TO1/1):

$$Q_{TO1/1}^{MR2(2-16)} = N_2 \cdot (h_2 - h_6), \text{ кВт.} \quad (2.33)$$

Тепло, відведене від MR3 в теплообміннику (TO1/1):

$$Q_{TO1/1}^{MR3(1-5)} = N_1 \cdot (h_1 - h_5), \text{ кВт.} \quad (2.34)$$

Тепло, відведене від NG в теплообміннику (TO1/1):

$$Q_{TO1/1}^{NG} = N_{NG} \cdot (h_{NG} - h_4), \text{ кВт.} \quad (2.35)$$

Тепло, підведене до потку (10-11) MR1 в теплообміннику TO1/1:

$$Q_{TO1/1}^{MR1(10-11)} = N_{10} \cdot (h_{11} - h_{10}), \text{ кВт.} \quad (2.36)$$

Тепловий баланс теплообмінника(TO1/1):

$$Q_{TO1/1}^{MR1(3-7)} + Q_{TO1/1}^{MR2(2-16)} + Q_{TO1/1}^{MR3(1-5)} + Q_{TO1/1}^{NG} = Q_{TO1/1}^{MR1(10-11)} \quad (2.37)$$

Тепло, відведене від потоку MR1 в теплообміннику (TO1/2):

$$Q_{TO1/2}^{MR1(9-15)} = N_9 \cdot (h_9 - h_{15}), \text{ кВт.} \quad (2.38)$$

Тепло, відведене від потоку MR2 в теплообміннику (TO1/2):

$$Q_{TO1/2}^{MR2(6-14)} = N_6 \cdot (h_6 - h_{14}), \text{ кВт.} \quad (2.39)$$

Тепло, відведене від потоку MR3 в теплообміннику (TO1/2):

$$Q_{TO1/2}^{MR3(5-13)} = N_5 \cdot (h_5 - h_{13}), \text{ кВт.} \quad (2.40)$$

Тепло, відведене від NG в теплообміннику (TO1/2):

$$Q_{TO1/2}^{NG} = N_{NG} \cdot (h_4 - h_{12}), \text{ кВт.} \quad (2.41)$$

Тепло, підведене до потку (16-17) MR1 в теплообміннику TO1/2:

$$Q_{TO1/2}^{MR(16-17)} = N_{15} \cdot (h_{17} - h_{16}), \text{ кВт.} \quad (2.42)$$

Тепловий баланс теплообмінника TO1/2:

$$Q_{TO1/2}^{MR(16-17)} = Q_{TO1/2}^{NG} + Q_{TO1/2}^{MR3(5-13)} + Q_{TO1/2}^{MR2(6-14)} + Q_{TO1/2}^{MR1(9-15)} \quad (2.43)$$

Тепло, відведене від потоку MR2 в теплообміннику (TO2):

$$Q_{TO2}^{MR2(14-20)} = N_6 \cdot (h_{14} - h_{20}), \text{ кВт.} \quad (2.44)$$

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		37

Тепло, відведене від потоку MR3 в теплообміннику (ТО2):

$$Q_{TO2}^{MR3(13-19)} = N_{13} \cdot (h_{13} - h_{19}), \text{ кВт.} \quad (2.45)$$

Тепло, відведене від NG в теплообміннику (ТО2):

$$Q_{TO2}^{NG} = N_{NG} \cdot (h_{12} - h_{18}), \text{ кВт.} \quad (2.46)$$

Тепло, підведене до потку (21-22) MR2 в теплообміннику ТО2:

$$Q_{TO2}^{MR3(21-22)} = N_{21} \cdot (h_{22} - h_{21}), \text{ кВт.} \quad (2.47)$$

Тепловий баланс теплообмінника ТО2:

$$Q_{TO2}^{MR(21-22)} = Q_{TO2}^{NG} + Q_{TO2}^{MR2(14-20)} + Q_{TO2}^{MR3(13-19)} \quad (2.48)$$

Тепло, відведене від потоку MR3 в теплообміннику (ТО3):

$$Q_{TO3}^{MR3(19-24)} = N_{19} \cdot (h_{19} - h_{24}), \text{ кВт.} \quad (2.49)$$

Тепло, відведене від NG в теплообміннику (ТО3):

$$Q_{TO3}^{NG} = N_{NG} \cdot (h_{18} - h_{23}), \text{ кВт.} \quad (2.50)$$

Тепло, підведене до потку (25-26) MR3 в теплообміннику ТО3:

$$Q_{TO3}^{MR3(25-26)} = N_{25} \cdot (h_{25} - h_{26}), \text{ кВт.} \quad (2.51)$$

Тепловий баланс теплообмінника ТО2:

$$Q_{TO3}^{MR3(25-26)} = Q_{TO3}^{NG} + Q_{TO3}^{MR3(19-24)} \quad (2.52)$$

Тепло, відведене від пари MR1 в теплообміннику (ПО1):

$$Q_{ПО1} = N_{29} \cdot (h_{29} - h_3), \text{ кВт.} \quad (2.53)$$

Тепло, відведене від пари MR2 в теплообміннику (ПО2):

$$Q_{ПО2} = N_{30} \cdot (h_{30} - h_{31}), \text{ кВт.} \quad (2.54)$$

Тепло, відведене від пари MR2 в теплообміннику (ПО3):

$$Q_{ПО3} = N_{32} \cdot (h_{32} - h_2), \text{ кВт.} \quad (2.55)$$

Тепло, відведене від пари MR3 в теплообміннику (ПО4):

$$Q_{ПО4} = N_{30} \cdot (h_{33} - h_{34}), \text{ кВт.} \quad (2.56)$$

Тепло, відведене від пари MR3 в теплообміннику (ПО5):

$$Q_{ПО5} = N_{35} \cdot (h_{33} - h_{34}), \text{ кВт.} \quad (2.57)$$

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		38

Таблиця 2.6.– Основні енергетичні параметри матеріальних потоків, за результатами моделювання процесу MFC-Linde

Параметр	Значення
Мінімальна питома робота, необхідна для зрідження , w_{min} , кДж/ кмоль	8137,3
Потужність стиснення в компресорі КМ1/1 сумішшового холодоагенту MR1, кВт	9697,07
Потужність стиснення в компресорі КМ1/2 сумішшового холодоагенту MR1, кВт	11688,28
Потужність стиснення в компресорі КМ2/1 сумішшового холодоагенту MR2, кВт	35447,7
Потужність стиснення в компресорі КМ2/2 сумішшового холодоагенту MR2, кВт	15530,8
Потужність стиснення в компресорі КМ3/1 сумішшового холодоагенту MR3, кВт	27361,8
Потужність стиснення в компресорі КМ3/2 сумішшового холодоагенту MR3, кВт	5631,024
Загальна потужність що споживається Процесом, кВт	105356,7
Коефіцієнт питомих витрат енергії в циклі	0,2545
Тепло, відведене від MR1 в теплообміннику (ТО1/1), кВт	29556,05
Тепло, відведене від MR2 в теплообміннику (ТО1/1), кВт	55982,46
Тепло, відведене від MR3 в теплообміннику (ТО1/1), кВт	6953,309
Тепло, відведене від NG в теплообміннику (ТО1/1), кВт	3440,006
Тепло, підведене до потку (10-11) MR1 в теплообміннику ТО1/1, кВт	103785,6
Тепло, відведене від потоку MR1 в теплообміннику (ТО1/2), кВт	12689,49
Тепло, відведене від потоку MR2 в теплообміннику (ТО1/2), кВт	42232,46
Тепло, відведене від потоку MR3 в теплообміннику (ТО1/2), кВт	6832,644
Тепло, відведене від NG в теплообміннику (ТО1/2), кВт	11457,38
Тепло, підведене до потку (16-17) MR1 в теплообміннику ТО1/2, кВт	73548,2
Тепло, відведене від потоку MR2 в теплообміннику (ТО2), кВт	31305,78
Тепло, відведене від потоку MR3 в теплообміннику (ТО2), кВт	38182,37
Тепло, відведене від NG в теплообміннику (ТО2),кВт	48766,44
Тепло, підведене до потку (21-22) MR2 в теплообміннику ТО2, кВт	117017,0
Тепло, відведене від потоку MR3 в теплообміннику (ТО3), кВт	28533,71
Тепло, відведене від NG в теплообміннику (ТО3), кВт	33397,92
Тепло, підведене до потку (25-26) MR3 в теплообміннику ТО3, кВт	61794,45
Тепло, відведене від пари MR1 в теплообміннику (ПО1), кВт	163552,9
Тепло, відведене від пари MR2 в теплообміннику (ПО2), кВт	12307,29
Тепло, відведене від пари MR2 в теплообміннику (ПО3), кВт	21295,04
Тепло, відведене від пари MR3 в теплообміннику (ПО4), кВт	4771,287
Тепло, відведене від пари MR3 в теплообміннику (ПО5), кВт	6068,43
Коефіцієнт зрідження:	0,96
Ступінь термодинамічної досконалості циклу	0,44

Таблиця 2.7.– Основні енергетичні параметри матеріальних потоків, за результатами моделювання процесу SMR-APCI

Параметр	Значення
Мінімальна питома робота, необхідна для зрідження кДж/ кмоль	7569,022
Потужність стиснення в компресорі КМ1 сумішшового холодоагенту MR, кВт	56568,5
Потужність стиснення в компресорі КМ2 сумішшового холодоагенту MR, кВт	47047,96
Потужність стиснення в компресорі КМ3 сумішшового холодоагенту MR, кВт	44417,33
Потужність стиснення в насосі сумішшового холодоагенту MR, кВт	682,86
Загальна потужність що споживається Процесом, кВт	148656,6
Коефіцієнт питомих витрат енергії в циклі	0,304
Тепло, відведене від потоку (13 ^{//} -17)MR в теплообміннику ТО1, кВт	57903,34
Тепло, відведене від потоку (13 [/] -14)иMR в теплообміннику ТО1, кВт	88807,71
Тепло, відведене від NG в теплообміннику ТО1, кВт	36798,4
Тепло, підведене до потку (16-15) MR в теплообміннику ТО1, кВт	189875,2
Тепло, відведене від потоку (17-18) MR в теплообміннику ТО2, кВт	94206,82
Тепло, відведене від NG в теплообміннику ТО2, кВт	66192,19
Тепло, підведене до потку (19-20) MR в теплообміннику ТО2, кВт	161173,8
Тепло, відведене від пари MR в теплообміннику ПО1, кВт	32809,73
Тепло, відведене від пари MR2 в теплообміннику (ПО2), кВт	59506,77
Тепло, відведене від пари MR2 в теплообміннику (ПО3), кВт	128783,6
Коефіцієнт зрідження:	0,92
Ступінь термодинамічної досконалості циклу	0,35

Таблиця 2.8.– Основні енергетичні параметри матеріальних потоків, за результатами моделювання процесу SMR- Linde

Параметр	Значення
Мінімальна питома робота, необхідна для зрідження кДж/ кмоль	8122,53
Потужність стиснення в компресорі КМ1 сумішшового холодоагенту MR, кВт	74309,7
Потужність стиснення в компресорі КМ2 сумішшового холодоагенту MR, кВт	65135,4
Потужність стиснення в компресорі КМ3 сумішшового холодоагенту MR, кВт	37498,2
Загальна потужність що споживається Процесом, кВт	176943,3
Коефіцієнт питомих витрат енергії в циклі	0,35
Тепло, відведене від потоку (5-10)MR в теплообміннику ТО1, кВт	27667,45
Тепло, відведене від потоку (9-14)иMR в теплообміннику ТО1, кВт	22997,17
Тепло, відведене від потоку (8-13)иMR в теплообміннику ТО1, кВт	76516,02
Тепло, відведене від NG в теплообміннику ТО1, кВт	5560,67
Тепло, підведене до потку (11-15) MR в теплообміннику ТО1, кВт	90104,33
Тепло, відведене від потоку (17-21) MR в теплообміннику ТО2, кВт	32430,75
Тепло, відведене від потоку (16-20) MR в теплообміннику ТО2, кВт	44924,5
Тепло, відведене від потоку (14-22) MR в теплообміннику ТО2, кВт	24065,5
Тепло, відведене від NG в теплообміннику ТО2, кВт	45322,59
Тепло, підведене до потку (18-23) MR в теплообміннику ТО2, кВт	119712,2
Тепло, відведене від потоку (20-26) MR в теплообміннику ТО3, кВт	16629,7
Тепло, відведене від потоку (21-27) MR в теплообміннику ТО3, кВт	8218,29
Тепло, відведене від NG в теплообміннику ТО3, кВт	16668,05
Тепло, підведене до потку (24-28) MR в теплообміннику ТО3, кВт	41743,76
Тепло, відведене від потоку (26-31) MR в теплообміннику ТО3, кВт	22913,37
Тепло, відведене від NG в теплообміннику ТО3, кВт	28931,5
Тепло, підведене до потку (29-32) MR в теплообміннику ТО3, кВт	51067,53
Тепло, відведене від пари MR в теплообміннику (ПО1), кВт	70853,64
Тепло, відведене від пари MR в теплообміннику (ПО2), кВт	82997,61
Тепло, відведене від пари MR2в теплообміннику (ПО3), кВт	98060,29
Коефіцієнт зрідження:	0,958
Ступінь термодинамічної досконалості циклу	0,306

На рис .2.7 порівнюється ступінь термодинамічної досконалості трьох процесів. Як можна бачити, процес MFC має максимальне значення ступеня термодинамічної досконалості в порівнянні з рештою процесів, оскільки теплообмін між холодоагентом та природним газом відбувається за більш високих перепадів температур.

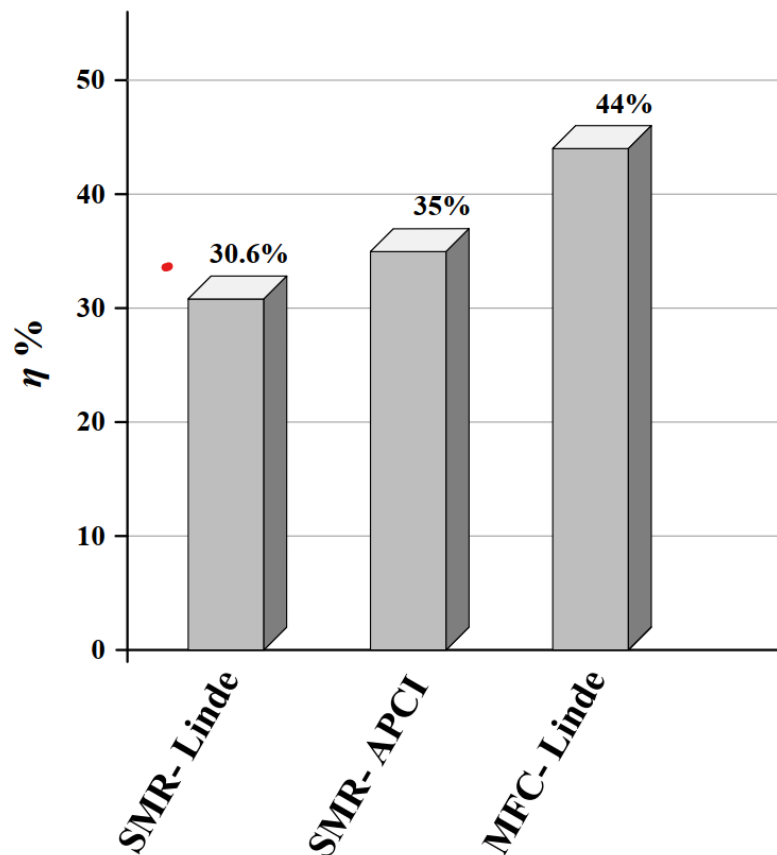


Рисунок.2.7 – Ступінь термодинамічної досконалості трьох процесів

2.3. Традиційний ексергетичний аналіз

Для визначення продуктивності систем використовується енергетичний метод термодинамічного аналізу, що базується на першому законі термодинаміки (закон збереження енергії). Однак для досягнення мети розробки стійких методів виробництва LNG енергетичний аналіз є лише першим етапом.

Процеси необхідно аналізувати та оптимізувати, а це вимагає використання методів термодинамічного аналізу, заснованих на другому законі термодинаміки. Найефективнішим методом аналізу є ексергетичний метод.

Ексергія вказує на якість енергії, і її важливість стає дуже ясною під час аналізу та оптимізації будь-яких енергоперетворювальних систем, а також хімічних процесів. Простіше кажучи, ексергія системи в певному термодинамічному стані - це максимальний обсяг роботи, який можна отримати при переході системи з цього конкретного стану до рівноваги з навколишнім середовищем [32].

Ексергія не підпорядковується закону збереження (за винятком ідеальних, або оборотних процесів), вона витрачається або руйнується внаслідок незворотності будь-якого реального процесу. Ексергія не підпорядкована закону збереження (за винятком ідеальних або оборотних процесів), вона витрачається або знищується через незворотність будь-якого реального процесу. Споживання ексергії під час процесу пропорційне ентропії, створеній через необоротність, пов'язану з процесом.

Ексергетичний аналіз – це метод, який використовує принципи збереження маси та збереження енергії разом із другим законом термодинаміки для аналізу, проектування та покращення використання енергії та інших систем. Ексергетика, пов'язана з кількістю енергії, є кількісною оцінкою її корисності або якості [33].

Ексергія – це максимальна теоретична корисна робота (механічна або електрична робота), яку можна отримати від теплової системи, оскільки вона приведена в термодинамічну рівновагу з навколишнім середовищем під час взаємодії лише з навколишнім середовищем [34].

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		43

Ексергетичний баланс показує, як процес споживає більшу частину корисного робочого потенціалу, введеного у процес.

Для типової системи перетворення енергії загальну ексергію можна розділити на чотири основні частини фізичну, хімічну, кінетичну та потенційну ексергію

$$\dot{E}x = \dot{E}x_{кин} + \dot{E}x_n + \dot{E}x_\phi + \dot{E}x_{хим} \quad (2.50)$$

Де

$\dot{E}x_{кин}$ кінетична ексергія; $\dot{E}x_n$ потенційна ексергія; $\dot{E}x_\phi$ – фізична ексергія; і $\dot{E}x_{хим}$ – хімічна ексергія.

Для аналізованих процесів у цьому дослідженні передбачається, що кінетична і потенційна ексергія незначні.

Таким чином, ексергія матеріального потоку визначається як сума хімічної та фізичної частин:

$$\dot{E}x = \dot{E}x_\phi + \dot{E}x_{хим} \quad (2.58)$$

Фізична ексергія потоку робочої речовини в k -тому компоненті визначається відповідно до рівняння:

$$\dot{E}x_{\phi(k)} = N_k \cdot [(h_k - h_0) - T_0 \cdot (s_k - s_0)], \text{ кВт} \quad (2.59)$$

де індекс «0» – еталонний стан для ексергетичного аналізу.

T_0 , h_0 , s_0 і N – еталонна температура навколишнього середовища, питома ентальпія, питома ентропія та молярна витрата (в кмоль/с).

Хімічна ексергія потоку робочої речовини в k -тому компоненті визначається відповідно до рівняння:

$$\dot{E}x_{хим(k)} = \sum_{i=1}^n \psi_i \cdot e_i^0 + G - \sum_{i=1}^n \psi_i \cdot G_i, \quad (2.60)$$

e_i^0 (кДж/моль) – хімічна ексергія компонента, при стандартних температурі та тиску та по відношенню до стандартизованого навколишнього середовища,

ψ_i – мольна частка компонента у суміші;

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		44

G_1 – вільна ентальпія (потенціал Гіббса), (кДж/моль).

G – хімічна ексергія Гіббса при стандартних температурі та тиску та по відношенню до стандартизованого навколишнього середовища:

$$G = h_0 - T_0 \cdot s_0 \quad (2.61)$$

$$G_i = h_i - T_0 \cdot s_0 \quad (2.62)$$

Після отримання цих параметрів деструкція ексергії та ексергетична ефективність є двома основними параметрами процесу, які необхідно визначити в ексергетичному аналізі.

Рівняння ексергетичної рівноваги для k -го компонента в системі встановлюється так [28]:

$$\dot{E}x_{вих.(k)} - \dot{E}x_{вх.(k)} + \dot{E}x_{D(k)} = W_{(k)} + \dot{E}x_{Q(k)}, \quad (2.63)$$

де

$\dot{E}x_{вх.(k)}$ – ексергія вхідного матеріального потоку в k -том компоненті;

$\dot{E}x_{вих.(k)}$ – ексергія вхідно гоматеріального потоків k -том компоненті;

$\dot{E}x_{Q(k)}$ – ексергія теплоти при температурі T :

$$\dot{E}x_{Q(k)} = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (2.64)$$

$\dot{E}x_{D(k)}$ – деструкція ексергії k -го компонента. Деструкцію ексергії k -го компонента також називають руйнуванням доступності або втраченою роботою.

$W_{(k)}$ – механічна робота.

Ексергетичну ефективність різних пристроїв зі стаціонарним потоком можна визначити з її загального визначення [27]:

$$\varepsilon_{заг} = (\text{Відновлена ексергія}) / (\text{Подана ексергія}) \quad (2.65)$$

Основні ексергетичні параметри матеріальних потоків, за результатами моделювання трьох аналізованих процесів наведено в табл.(2.9-2.11)

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		45

Таблиця 2.9 – Основні ексергетичні параметри матеріальних потоків SMR-APCI

№	Фізична ексергія $\dot{E}x_{\phi}$, (кВт)	Хімічна ексергія $\dot{E}x_{xlm}$, (кВт)	Загальна ексергія $\dot{E}x$, (кВт)
20 ¹	15745,87	10437211,77	10452957,64
1 ¹	55989,86	10437211,77	10493201,63
2 ¹	52004,17	10437211,77	10489215,93
3 ¹	114596,74	28354241,52	28468838,26
12 ¹	147566,44	28354241,52	28501807,95
4 ¹	1425524,89	28354241,52	28496766,41
5 ¹	132063,96	25087802,51	25219866,47
6 ¹	8838,65	3268966,66	3277805,31
7 ¹	162102,51	25087802,51	25249905,02
8 ¹	9290,47	3268966,66	3278257,13
9 ¹	171669,35	28354241,52	28525910,87
13 ¹	161277,14	28354241,52	28515518,66
13 ¹	80292,75	17919931,49	18000224,24
13 ^{//1}	78082,65	10437211,77	10515294,42
14 ¹	92825,02	17919931,49	18012756,51
15 ¹	87971,69	17919931,49	18007903,18
16 ¹	62477,95	17919931,49	17982409,43
17 ¹	82336,24	10437211,77	10519548,01
18 ¹	144022,22	10437211,77	10581233,99
19 ¹	137584,15	10437211,77	10574795,92
NG	75122,73	6609489,36	6684612,09
NG ¹	81267,68	6609489,36	6690757,04
NG ²	127108,44	6609489,36	6736597,80
NG ³	122215,71	6609489,36	6731705,07
LNG	119905,76	6177451,76	6297357,52
BOG	2029,71	432317,84	434347,55

Таблиця 2.10 – Основні ексергетичні параметри матеріальних потоків SMR-Linde

№	Фізична ексергія $\dot{E}x_{\phi}$, (кВт)	Хімічна ексергія $\dot{E}x_{xim}$, (кВт)	Загальна ексергія $\dot{E}x$, (кВт)
NG	68042,09	6338117,01	6406159,10
1	90277,35	25806953,25	25897230,60
2	138283,92	25806953,25	25945237,17
3	128323,00	25806953,25	25935276,25
4	126845,98	25324428,98	25451274,97
5	1219,27	482782,01	484001,29
6	148967,33	25324428,98	25473396,31
7	141178,78	25324428,98	25465607,76
8	100407,31	15215221,65	153315628,96
9	37867,58	10112111,22	10149978,81
10	1245,98	482782,01	484027,99
11	61232,31	25806953,25	25868185,57
12	68444,33	6338117,01	6406561,34
13	102604,36	15215221,65	15317826,02
14	38591,07	10112111,22	10150702,30
15	45590,91	25806953,25	25852544,17
16	52415,88	5801094,53	5853510,41
17	46689,84	9417625,76	9464315,61
18	111326,39	25324428,98	25435755,37
19	81867,52	6338117,01	6419984,53
20	64083,17	5801094,53	5865177,70
21	55093,38	9417625,76	9472719,15
22	43727,96	10112111,22	10155839,18
23	59884,18	25324428,98	25384313,16
24	93692,09	15215221,65	15308913,74
25	91551,00	6338117,01	6429668,02
26	73025,33	5801094,53	5874119,86
27	59221,04	9417625,76	9476846,80
28	69119,34	15215221,65	15284340,99
29	92596,49	5801094,53	5893691,02
30	121713,17	6338117,01	6459830,19
31	95824,51	5801094,53	5896919,04
32	35363,57	5801094,53	5836458,10
33	55103,40	9417625,76	9472729,17
34	395591,00	10112111,22	10151702,22
35	1122,12	482782,01	483904,13
36	99047,05	25806953,25	25906000,31
37	117732,84	6338117,01	6455849,86
38	1051,14	181906,64	182957,78
LNG	116248,95	6156643,12	6272892,07

Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата

KPM.KT1.897-03.1.3

лист

47

Таблиця 2.11 – Основні ексергетичні параметри матеріальних потоків FMC-Linde

№	Фізична ексергія $\dot{E}x_{\phi}$, (кВт)	Хімічна ексергія $\dot{E}x_{xlm}$, (кВт)	Загальна ексергія $\dot{E}x$ (кВт)
NG	68042,09	6338117,01	6406159,10
1	42519,89	4538001,28	4580521,17
2	54377,07	11093539,35	11147916,43
3	50616,31	20734535,78	20785152,08
4	68250,59	6338117,01	6406367,61
5	42672,32	4538001,28	4580673,60
6	56367,27	11093539,35	11149906,63
7	50934,41	20734535,78	20785470,19
8	30560,65	12440721,47	12471282,11
9	20373,77	8293814,13	8314188,08
10	29884,27	12440721,47	12470605,74
11	25454,29	12440721,47	12466175,76
12	69886,51	6338117,01	6408003,52
13	43657,05	4538001,28	4581658,34
14	61826,19	11093539,35	11155365,54
15	21926,58	8293814,31	8315740,89
16	21357,56	8293814,31	8315171,87
17	10316,66	8293814,31	8304130,97
18	88893,67	6338117,01	6427010,68
19	59241,95	4538001,28	4597243,23
20	73524,47	11093539,35	11167063,82
21	71297,72	11093539,35	11164837,07
22	21751,88	11093539,35	11115291,23
23	122337,78	6338117,01	6460454,79
24	86156,24	4538001,28	4624157,52
25	84100,06	4538001,28	4622101,35
26	20482,36	4538001,28	4558483,64
27	17023	8293814,31	8310837,31
28	42440,87	20734535,78	20776976,64
29	63066,99	20734535,78	20797602,77
30	46471,14	11093539,35	11140010,49
31	45572,28	11093539,35	11139111,64
32	56295,50	11093539,35	11149834,86
33	39381,52	4538001,28	4577382,81
34	39061,28	4538001,28	4577062,56
35	42973,13	4538001,28	4580974,42
36	118381,24	6338117,01	6456498,25
BOG	921,330	155782,61	156703,94
LNG	117054,56	6182739,76	6299794,32

Основні результати отримані при традиційному ексергетичному аналізі компонентів процесів SMR-Linde, FMC-Linde і SMR-APCI подано в табл 2.12-2.14 всі визначення взяті з [31].

Таблиця 2.12.– Основні результати отримані при традиційному ексергетичному аналізі компонентів процесу SMR-Linde

Компонент	Деструкція ексергії $E_{D,k}$, кВт	Ексергетична ефективність ε_k (%)
КМ1	13676,44	79,63
КМ2/1	12173,45	79,77
КМ2/2	6050,30	78,52
ПО1	4450,24	95,51
ПО2	6571,72	95,26
ПО3	2938,96	98,03
ТО1	12291,91	88,32
ТО2	12811,30	91,28
ТО3	2938,96	98,03
ТО4	4271,57	91,62
ДВ1	123,86	54,62
ДВ2	4136,96	75,90
ДВ3	4117,64	72,74
ДВ4	3228,02	82,55
ДВ5	3980,33	85,83
31	273,53	100
32	287,84	100
33	31,32	100
Ексергетична ефективність процесу Linde – APCI $\varepsilon_{заг}$, %	0,402	

Таблиця 2.13.– Основні результати отримані при традиційному ексергетичному аналізі компонентів процесу SMR - APCI

Компонент	Деструкція ексергії $E_{D,k}$, кВт	Ексергетична ефективність ε_k (%)
КМ1	10423,75	79,43
КМ2	9194,03	78,19
КМ3	7887,98	79,20
Н	171,52	72,48
ПО1	1668,88	97,02
ПО2	290,43	99,80
ПО3	4505,80	99,33
ТО1	2562,93	98,66
ТО2	14322,54	91,02
ДВ1	4853,33	60,58
ДВ2	6438,07	42,07
ДВ3	4892,73	94,78
31	2787,10	100
32	2251,28	100
Ексергетична ефективність процесу SMR- APCI $\varepsilon_{заг}$, %	0,4509	

Таблиця 2.14 – Основні результати отримані при традиційному ексергетичному аналізі компонентів процесу FMC-Linde

Компонент	Деструкція ексергії $E_{D,k}$, кВт	Ексергетична ефективність ε_k (%)
КМ1/1	2170,60	75,55
КМ1/2	5692,45	78,37
КМ2/1	7305,66	77,19
КМ2/2	2937,88	78,49
КМ3/1	5832,40	76,42
КМ3/2	1126,86	77,63
ПО1	7077,60	88,87
ПО2	603,4	98,70
ПО3	824,22	98,54
ПО4	201,55	99,49
ПО5	817,77	98,11
ДВ1	676,38	29,87
ДВ2	569,02	40,80
ДВ3	2226,75	88,82
ДВ4	2056,18	84,72
ДВ5	3956,54	72,76
ТО1/1	1760,75	98,21
ТО2/2	1408,52	98,08
ТО2	3255,50	97,25
ТО3	3259,30	94,74
З	36,43	100
Ексергетична ефективність процесу FMC-Linde, $\varepsilon_{заг}$, %	0,5182	

Були представлені результати традиційного ексергетичного аналізу трьох традиційних процесів LNG які представлені у табл. 2.12-2.14.

Як видно з табл.2.12 в процесі SMR-Linde, компресор KM1 має максимальну деструкцію ексергії, також велику деструкцію мають теплообмінники теплообмінники ступеня попереднього охолодження (TO1 і TO2). ексергії. Ексергетична ефективність дросельних пристроїв мала, але вони мають незначну деструкцію ексергії.

Результати ексергетичного аналізу для процесу SMR-APCI (табл.2.13) показують, що максимальне значення незворотності пов'язане з теплообмінником TO2, в якому відбувається зрідження та переохолодження природного газу та його ексергетична ефективність становить 91,02%. Найменше значення ексергетичної ефективності спостерігається у дросельному вентилі DV2, у якого деструкція ексергії становить 6438,07 кВт. Ексергетична ефективність процесу SMR-APCI склала 45,09%, що вище, ніж у SMR-Linde (40,2%).

У процесі MFC(табл 2.14) компресор KM-2/1 і проміжний охолоджувач ПО1 мають високе значення деструкції ексергії, ексергетична ефективність дросельних пристроїв найнижча серед усіх компонентів системи, зате в цих компонентах спостерігається мінімальні незворотні втрати. Ексергетична ефективність цього процесу складає 51,82%., що є найвищим показником серед трьох процесів одержання зрідженого газу.

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		52

2.4 Розширений ексергетичний аналіз

Традиційний ексергетичний аналіз точно і легко розраховує незворотність компонентів, проте не може класифікувати незворотність з погляду походження. Також він не може розрахувати частину незворотності компонента, яка викликана іншими компонентами процесу. Це стає можливим з розширеним ексергетичним аналізом [36,37], в якому деструкція ексергії в кожному компоненті розділена на різні частини.

Ендогенна деструкція ексергії – це частина деструкції ексергії всередині компонента, отримана при ідеальній роботі решти всіх компонентів і аналізованому компоненті з тією ж ефективністю, що і в реальній системі.

Екзогенна деструкція ексергії - це різниця між значенням деструкції ексергії всередині компонента в реальній системі та ендогенною частиною.

$$\dot{E}x_{D(k)} = \dot{E}x_{D(k)}^{EN} + \dot{E}x_{D(k)}^{EX} \quad (2.65)$$

Такий поділ деструкції ексергії дає інженерам можливість оцінити взаємозв'язок між компонентами системи.

Ще один поділ деструкції ексергії (на неминучі та усувні частини) показує нам реальний потенціал покращення k-го компонента.

Неминуча ($\dot{E}x_{D(k)}^{UN}$) деструкція ексергії не може бути додатково зменшена через технологічні обмеження, такі як доступність і вартість матеріалів та методів виробництва. Різниця між повною і неминучою деструкцією ексергії компонента являє собою усувну деструкцію ексергії ($\dot{E}x_{D(k)}^{AV}$), яку слід враховувати в ході процедури поліпшення.

$$\dot{E}x_{D(k)} = \dot{E}x_{D(k)}^{UN} + \dot{E}x_{D(k)}^{AV} \quad (2.66)$$

Об'єднавши описані вище процедури поділу, можна розрахувати: усувну ендогенну деструкцію ексергії ($\dot{E}x_{D(k)}^{AV,EN}$), яку можна зменшити за рахунок поліпшення k-го компонента з термодинамічної точки зору, і усувну екзогенну деструкцію ексергії ($\dot{E}x_{D(k)}^{AV,EX}$), яку можна знизити за рахунок структурного

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		53

поліпшення всього процесу або за рахунок підвищення ефективності інших компонентів, і завжди, звичайно, за рахунок підвищення ефективності k-го компонента.

Усувна ендогенна деструкція ексергії k-го компонента розраховується таким чином:

$$\dot{E}x_{D(k)}^{UN,EN} = \dot{E}x_{p(k)}^{EN} \cdot \left(\dot{E}x_{D(k)}^{UN} / \dot{E}x_{p(k)}^{UN} \right) \quad (2.67)$$

Усувна екзогенна деструкція ексергії розраховується за рівнянням:

$$\dot{E}x_{D(k)}^{UN,EX} = \dot{E}x_{D(k)}^{EN} - \dot{E}x_{D(k)}^{UN,EN} \quad (2.68)$$

Усувна ендогенна та усувна екзогенна деструкції ексергії визначаються шляхом віднімання неминучих ендогенних і неминучих екзогенних складових деструкції від загальної суми ендогенних та екзогенних деструкцій ексергії відповідно:

$$\dot{E}x_{D(k)}^{AV,EN} = \dot{E}x_{D(k)}^{EN} - \dot{E}x_{D(k)}^{UN,EN} \quad (2.69)$$

$$\dot{E}x_{D(k)}^{AV,EX} = \dot{E}x_{D(k)}^{EN} - \dot{E}x_{D(k)}^{UN,EX} \quad (2.70)$$

Характеристики цих частин деструкції ексергії представлені у таблиці 2.15. для розрахунку кожної частини деструкції ексергії всередині всіх компонентів необхідно змінити ексергетичну ефективність інших компонентів, щоб зменшити їх незворотність. Для побудови діаграм необхідно зменшити деструкцію ексергії в інших компонентах процесу та врахувати його вплив на аналізований компонент.

Таблиця 2.15 – Технічні характеристики кожної частини незворотності

Ендогенні	Екзогенні
Усувні може бути знижені за рахунок підвищення ефективності k-го компонента.	можна зменшити шляхом оптимізації структури всієї системи або підвищення ефективності інших компонентів
Неминучі неможливо зменшити через технічні та технологічні обмеження для k-го компонента	Неможливо зменшити через технічні та/або технологічні обмеження в інших компонентах загальної системи для даної структури

У таблиці 2.16 показані результати розширеного ексергетичного аналізу процесів SMR-Linde, SMR-APCI, FMC-Linde також на рис. 2.8-2.10 представлені деструкції ексергії окремих компонентів усіх трьох процесів.

Таблиця 2.16 – Основні результати розширеного ексергетичного аналізу процесів

Компонент	$\dot{E}x_{D(k)}^{EN}$	$\dot{E}x_{D(k)}^{EX}$	$\dot{E}x_{D(k)}^{UN}$	$\dot{E}x_{D(k)}^{AV}$	$\dot{E}x_{D(k)}^{AV,EN}$	$\dot{E}x_{D(k)}^{AV,EX}$	$\dot{E}x_{D(k)}^{UN,EN}$	$\dot{E}x_{D(k)}^{UN,EX}$
SMR-Linde								
КМ1	121474	1202,4	4811,1	8865,4	8254,60	610,79	4219,4	591,65
КМ2/1	11735	438,45	4277,4	7896,1	7751,60	144,47	3983,4	293,98
КМ2/2	4129	1921,3	2090,4	3959,8	2680,5	1279,33	1448,5	641,97
ПО2	1139,7	5432,0	3539,6	3032,1	377	2655,08	762,70	2776,94
ТО1	11172	1119,9	7316,3	4975,6	4349,3	626,08	6822,70	493,61
ТО2	10124	2687,3	9777,4	3033,8	2228,9	804,92	7895,10	1882,38
ТО4	4271,57	0,00	3273,1	998,56	998,56	0,00	3273,01	0,00
SMR-APCI								
КМ1	6986,6	3437,1	3706,5	6717,2	4561,40	2155,88	2425,20	1281,27
КМ2	9056,8	137,23	3174,9	6019,0	6015,6	3,45	3041,20	133,78
КМ3	6641,6	1246,3	2742,5	5145,4	4402,5	742,96	2239,10	504,42
ТО1	2562,9	0,0	2144,0	418,9	418,9	00	2144,03	0,00
ТО2	8425,5	5886,0	13311	999,73	840,2	159,53	7585,30	5726,51
FMC-Linde								
КМ1/1	2090	80,60	733,72	1436,8	1394,8	42,08	695,2	38,52
КМ1/2	5460,8	231,75	1967,8	3724,5	3649,49	75,07	1811,2	156,66
КМ2/1	7269,4	36,26	2533,7	4771,9	4747,90	24,04	2521,5	12,22
КМ2/2	2857	80,88	1016,5	19221	1854,70	66,66	1002,3	14,22
КМ3/1	5789,1	43,30	2035,5	3796,8	3773,6	23,21	2015,43	20,09
ПО1	5264,4	1813,2	2404,1	4673,5	3467,5	1205,8	1796,84	607,31
ТО2	3202,70	52,80	2615,4	640,1	606,4	33,71	2596,31	19,09
ТО3	2535,30	724	2975,6	283,6	255,67	27,97	2279,63	696,03

Рис. 2.8 демонструє деструкцію ексергії у компонентах процесу SMRLinde.

Як видно, з рис.2.8 більшість деструкції ексергії в компонентах, за винятком проміжного охолоджувача 2, є ендегенними. Високі значення ендегенної деструкції показують, що взаємодії компонентів не роблять істотного внеску в термодинамічну неефективність всього процесу. Екзогенна деструкція ексергії, що виробляється багатопотоковим теплообмінником ТО2, більша, ніж у інших теплообмінників, а у випадку з ТО4 всі незворотності є ендегенними.

Завдяки вдосконаленим процедурам проектування процесів частина екзогенної деструкції ексергії може бути суттєво змінена.

Такий стан зазвичай виникає у деяких апаратах технологічного процесу, режим роботи вхідних потоків яких не змінюється при зменшенні деструкції ексергії в інших компонентах. Компресор КМ2/2 має високі значення екзогенної деструкції ексергії. Ендогенна деструкція ексергії у проміжному охолоджувачі ПО2 більша, ніж екзогенна, яка виникає через великі незворотності компресорів КМ та КМ 2/1 та проміжного охолоджувача ПО-1.

Більшість деструкції ексергії, в компресорах можна уникнути, а термодинамічну ефективність процесу можна підвищити за рахунок поліпшення продуктивності цих компонентів. Але у разі теплообмінників та проміжних охолоджувачів більша частина деструкції ексергії неминуча.

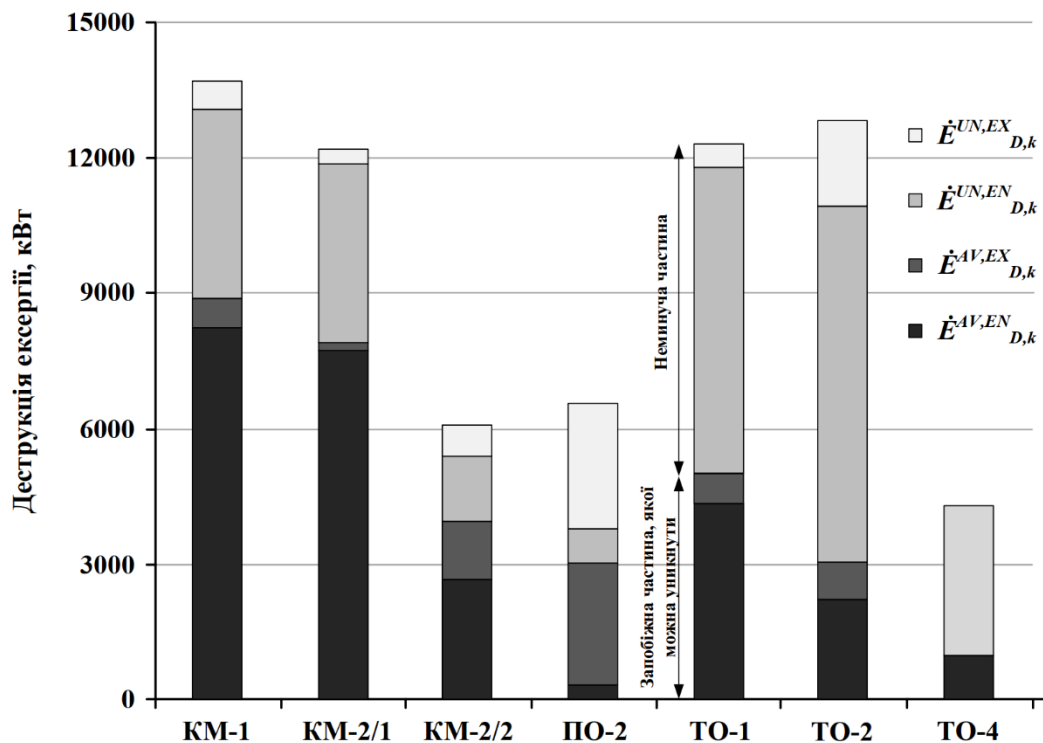


Рисунок.2.8 – Деструкція ексергії у компонентах процесу SMR-Linde.

Рис. 2.9 демонструє деструкцію ексергії у компонентах процесу SMR-APCI

У цьому процесі також велика частина деструкції ексергії є ендогенною, а деструкція ексергії в компресорі КМ2 та теплообміннику ТО1 є ендогенними.

У теплообміннику ТО2 близько 41,12% деструкції ексергії є екзогенною, і відповідно до конфігурації процесу цей ступінь незворотності може бути викликаний теплообмінником ТО1. Близько 65% деструкції ексергії у компресорах можна уникнути, що вказує на потенціал підвищення ефективності процесу. Повна деструкція ексергії компресора КМ2 є ендогенною, оскільки вона розташована після змішувача З.

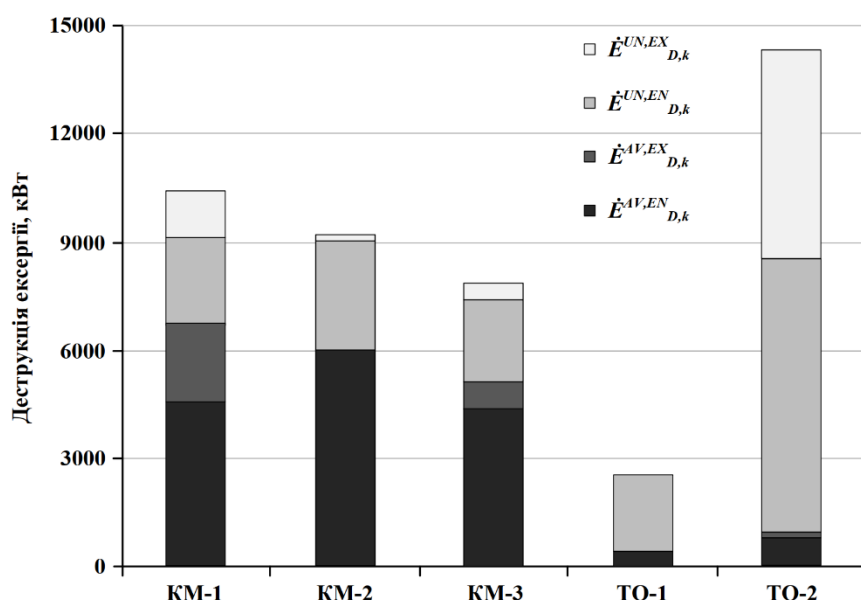


Рисунок.2.9 – Деструкція ексергії у компонентах процесу SMR-APCI

Рис. 2.10 демонструє деструкцію ексергії у компонентах процесу FMC-Linde

Деструкція ексергії в компресорах КМ-1/1, КМ-2/1, КМ-2/2 КМ-3/1 та теплообміннику ТО2 є ендогенною та викликана роботою компонентів. У компресорі КМ 1/2, у проміжному охолоджувачі ПО1 та теплообміннику ТО3 спостерігається екзогенна деструкція ексергії, яка викликана дією інших компонентів. Але, як показує рис.15, більшу частину деструкції ексергії, що відбувається всередині компонентів, можна уникнути, за допомогою ефективних

пристроїв, за рахунок чого можна значно підвищити ефективність процесу. Необоротності теплообмінниках TO2 і TO3 більш неминучі.

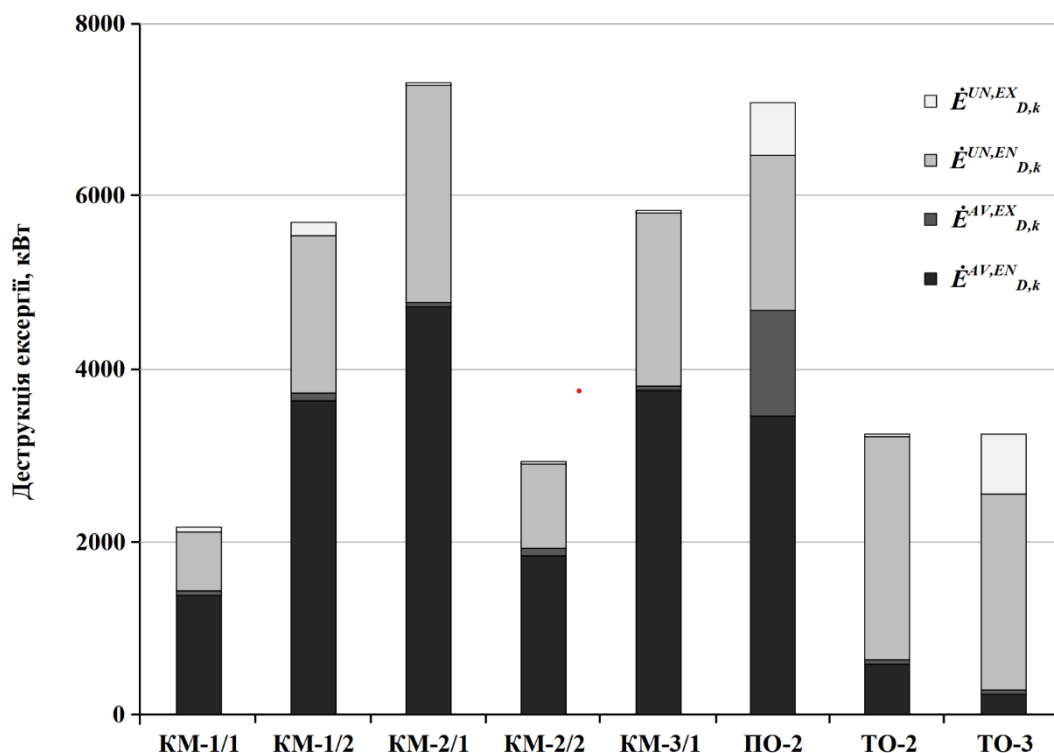


Рисунок.2.10 – Деструкція ексергії у компонентах процесу FMC-Linde

Порівняння результатів аналізів, проведених на трьох процесах показують, що екзогенна деструкція ексергії всередині проміжних охолоджувачів більша, ніж в інших компонентах. Однією з причин цього випадку є положення розміщених перед ними компресорів.

Механізм наведення неефективності від компонентів, що залишилися, до розглянутого компонента змінює тиск і температуру вихідного потоку компонента. За рахунок чого збільшується температура вихідного потоку компресора з високою незворотністю, що може збільшити незворотність наступних компонентів, таких як охолоджувач повітря.

Після виявлення компонента з високою незворотністю наступним кроком буде зменшення незворотності. Деструкція ексергії, якої можна уникнути,

показує потенціал покращення процесу, тому інженер чи проектувальник повинен зосередитися на цій частині незворотності.

У випадку ендогенної частини, якої можна уникнути, можна використовувати деякі способи, такі як заміна компонентів ефективними пристроями або оптимізація їхньої продуктивності або розробка нових компонентів.

Для зміни усуненої екзогенної частини необхідно підвищити ефективність інших компонентів або оптимізувати проектування та налаштування процесу та зв'язків між ними.

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		59

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі оцінено три традиційні процеси зрідження природного газу: SMR-Linde, SMR-APCI, FMC-Linde за допомогою традиційного ексергетичного, та розширеного ексергетичного методу термодинамічного аналізу, що базуються на сучасних методах прикладної термодинаміки та дозволяють проектувальникам забезпечити реалізацію енергозберігаючих технологій на стадії проектування.

Відповідно до мети роботи було вирішено завдання дослідження та отримано такі результати:

1. Енергетичний аналіз процесів показав, що з усіх трьох аналізованих процесів найвище значення ступеня термодинамічної досконалості має процес FMC-Linde, за ним слідує процес SMR-APCI.

2. Результати ексергетичного аналізу показали, що у всіх трьох процесах найвища деструкція ексергії спостерігається у компресорах та багатопотокових теплообмінниках.

3. Для компонентів з високими значеннями деструкції ексергії були розраховані чотири частини незворотності (усувна/немінуча) та (ендогенна/екзогенна). Результати розширеного ексергетичного аналізу показали, що більшість незворотних явищ усередині компонентів були ендогенними, а деструкція ексергії компресорів, була вищою, ніж у інших компонентів.

4. Взаємодія між компонентами не суттєво впливає на неефективність.

5. У компресорах більша частина деструкції ексергії відноситься до усувної, тому вони мають високий потенціал поліпшення. Але в багатопотокових теплообмінниках та проміжних охолоджувачах немінуча деструкція ексергії вища, ніж в інших частинах.

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		60

6. Механізм індукції неефективності від інших компонентів до компоненту, що розглядається, змінює тиск і температуру вихідного потоку компонента. Наприклад, температура вихідного потоку компресора з високою незворотністю збільшується, і це може збільшити незворотність таких компонентів, як проміжний охолоджувач. Таким чином, підвищення енергетичної ефективності компонента процесу може зменшити деструкцію в ньому, а також в інших компонентах, що взаємодіють з ним.

7. Технологічна схема процесу в деяких випадках робить цінність екзогенних факторів. Деструкція ексергії всередині компонентів буде тоді дуже низька. Наприклад, в процесі SMR-APCI, незворотність теплообмінників повністю ендегенна і не відноситься до інших процес.

8. На прикладі трьох процесів зрідження газу показано, що розширений ексергетичний аналіз може виявити потенціали і стратегії поліпшення термодинамічних характеристик енергоємних процесів.

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		61

ОХОРОНА ПРАЦІ

Законодавча та нормативна база України з охорони праці.

Охорона праці – діюча на підставі відповідних законодавчих та інших нормативних актів, система соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, що забезпечують збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці.

Нормативною умовою запобігання виробничим травмам і аваріям є розроблення заходів з охорони праці, що попереджують дію на працівників на робочих місцях небезпечних та шкідливих виробничих чинників, ліквідують умови, за яких вони можуть діяти на людей, а також зменшують ризик можливих небезпечних дій самих працівників.

Законодавчі та інші нормативно-правові акти з охорони праці встановлюють, регламентують та регулюють державні вимоги щодо забезпечення безпечних і нешкідливих умов праці, сприяють створенню та ефективному функціонуванню чіткої системи управління охорони праці на підприємстві, в галузі, в регіоні та в державі в цілому, забезпеченню на кожному робочому місці безпечних і нешкідливих умов праці, встановленню правил.

Законодавча та нормативна база України з охорони праці регламентує все, що пов'язано із створенням та забезпеченням безпечних умов праці.

Правовою основою законодавства України про охорону праці є:

- Конституція України;
- Закон України «Про охорону праці»;
- Кодекс законів про працю України (КЗпП);
- Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування»;
- Основи законодавства України про охорону здоров'я;
- Кодекс цивільного захисту України;
- Закон України «Про забезпечення санітарного та епідеміологічного благополуччя населення»;

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		62

- Закон України «про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку».

Зараз в Україні створена і діє ціла система законодавчих та нормативно-правових актів, що регламентують питання охорони праці.

Законодавчими актами, що визначають основні правовідносини у виробничій діяльності, є державні нормативні акти про охорону праці (ДНАОП).

Державні нормативні акти про охорону праці – це правила, стандарти, норми, положення, інструкції та інші документи, яким надано силу закону і які є обов’язковими для виконання.

Залежно від сфери впливу ДНАОП можуть мати міжгалузеву та галузеву дію.

Міжгалузеві державні нормативні акти про охорону праці мають загальнодержавне значення, їх дія поширюється на всі підприємства незалежно від їх відомчої належності, форми власності та виду господарської діяльності.

Галузеві державні нормативні акти про охорону праці поширюються лише на підприємства, що належать до певної галузі. Одним з головних державних правових актів про охорону праці в нафтогазовій галузі є:

- ДНАОП 0.00-1.21-98, Про затвердження Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів;

- ДНАОП 0.03-8.07-94, Перелік робіт і робіт зі шкідливими і небезпечними умовами праці, на яких забороняється застосування праці неповнолітніх;

Наказ, Правила від 18.12.2007 №315 Про затвердження Правил охорони праці при термічній обробці металів.

Крім вказаних законодавчих актів, правові відносини у сфері охорони праці регулюють підзаконні нормативні акти, укази Президента, рішення Уряду, нормативні акти міністерств та інших центральних органів державної виконавчої влади.

На підставі ДНАОП розробляються відомчі документи про охорону праці (ВДОП). Вони затверджуються міністерствами або іншими об’єднаннями з

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		63

метою конкретизації вимог охорони праці залежно від специфіки галузевих об'єктів.

Перехід на нові, суто українські нормативні акти вимагає значного обсягу робіт та певного часу. Тому у державі дотепер залишаються чинними правила, стандарти, норми, положення та інші нормативні акти, які діяли ще за радянських часів. Крім вищезгаданих документів, вимоги охорони праці регламентують також будівельні й санітарні норми та правила, правила облаштування електроустановок, норми радіаційної безпеки, правила побудови та безпечної експлуатації кранів, резервуарів, що працюють під тиском та інші нормативні документи.

До найважливіших підзаконних нормативно-правових актів, що регламентують охорону праці, належать такі:

- Постанова «Про порядок проведення розслідування та ведення обліку нещасних випадків, професійних захворювань і аварій на виробництві» (№ 1232 від 30.11.1993р.);

- Список виробництв, професій і робіт з важкими та шкідливими умовами праці, на яких забороняється застосування праці жінок, затверджений МОЗ (№ 256 від 29.12.1993р.);

- Постанова КМУ №1107 від 26.10.2011 «Про затвердження порядку видачі дозволів на виконання робіт підвищеної небезпеки та на експлуатацію (застосування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки»;

- Типове положення про проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці (ДНАП 0.00-4.12-99 №15 від 25.01.2005р.) та інші.

Нормативно-правові акти з охорони праці в міру розвитку наукових досягнень не рідше одного разу на десять років мають переглядатися, уточнюватися й доповнюватися.

Нормативно-правові акти з охорони праці є обов'язковими до виконання, в умовах виробничої діяльності, будь-якими суб'єктами господарювання.

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		64

Опрацювання та прийняття нових, перегляд і скасування чинних нормативно-правових актів здійснює спеціально уповноважений центральний орган з нагляду за охороною праці за погодженням з галузевими міністерствами або відомствами створеними за галузевим принципом.

Охорона праці на комплексі LNG.

К роботі з обслуговування та ремонту обладнання допускаються особи, не молодші 18 років, які пройшли навчання та атестацію на право проведення даних робіт

Технологічні об'єкти, приміщення виробничого, адміністративно-господарського, побутового призначення та місце постійного або тимчасового перебування на території людей в межах небезпечної зони, оснащуються ефективними системами оповіщення персоналу, про аварійну обстановку на технологічному об'єкті.

Планами ліквідації повинні передбачатися заходи щодо виведення у безпечне місце людей, не пов'язаних безпосередньо з ліквідацією аварії.

Для проведення ремонту апаратури та обладнання на діючих виробництвах розробляються додаткові заходи безпеки, затверджені технічним керівником ЗПГ.

Операції з прийому-відпустки LNG слід проводити у світлий час доби або при достатньому місцевому висвітленні робочої зони. При цьому всі транспортні засоби, наливні пристрої та трубопроводи повинні бути заземлені, двигуни автомашин вимкнені, вивішені відповідні попереджувальні знаки та вжито всіх необхідних заходів безпеки.

Повинен здійснюватися контроль за герметичністю технологічного обладнання, трубопроводів та арматури, де можливі витіки вибухонебезпечних пар та газів.

Контроль за загазованістю виробничих приміщень та проммайданчиків повинен здійснюватися за допомогою газоаналізаторів із сигналізацією та включенням аварійної вентиляції.

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		65

Обслуговуючий персонал повинен працювати в спецодязі, знати та вміти користуватися та застосовувати в роботі індивідуальні і колективні засоби захисту.

Роботи всередині технологічного обладнання повинні вироблятися відповідно Типової інструкції по організації безпечного проведення газонебезпечних робіт.

Роботи з застосуванням відкритого вогню (зварювання, різання та інш.) в приміщеннях або на зовнішніх майданчиках діючих виробництв слід проводити у відповідності з Типовою інструкцією по організації безпечного проведення огневих робіт на вибухонебезпечних та вибухопожежонебезпечних об'єктах.

Пожежовибухобезпека

На комплексі з виробництва, зберігання та відвантаження LNG повинні передбачатися заходи, що забезпечують вибухопожежобезпечність технологічних процесів, будівель та споруд відповідно до Правил пожежної безпеки.

При загорянні пролитого на поверхню землі рідкого природного газу рекомендується дати можливість йому горіти під конторлем, вживає заходів до перекриття доступу природного газу до вогнища пожежі.

У разі великих аварійних проток LNG, коли неможливо перекрити доступ природного газу до вогнища пожежі, що не виникло, недоцільно проводити гасіння природного газу, що горить. У цьому випадку необхідно захищати навколишні об'єкти від безпосереднього впливу вогнища (теплове випромінювання, поширення горіння) водним зрошенням.

Для захисту від теплової дії при пожежах на криогенних резервуарах комплексу LNG необхідні автоматичні установки водяного зрошення та стаціонарні лафетні стовбури (за наявності двох і більше систем зберігання).

Тип, кількість і розстановка зрошувачів, а також режим їх роботи (тиск перед зрошувачами, інтенсивність розпилення) повинні бути визначені проектом виходячи з умови рівномірного зрошення всіх поверхонь, що захищаються, і

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		66

створення надійного теплового захисту конструкції резервуара при тепловому впливі полум'я LNG, що горить в межах обвалування суміжного резервуару.

Використання системи водяного охолодження для зрошення палаючого резервуара категорично забороняється, оскільки надходження води посилює інтенсивність випаровування LNG, що розлився, і, отже, інтенсивність горіння LNG.

Для установки двох і більше резервуарів уряд схема підключення кільцевих трубопроводів зрошення бічних поверхонь резервуарів повинна забезпечувати можливість диференційованого зрошення частини поверхні бічної стінки резервуара, утвореної половиною кола з боку суміжного резервуара.

Джерелом водопостачання автоматичних установок водяного зрошення та лафетних стволів (за їх наявності) може служити протипожежний кільцевий водопровод високого тиску.

Витрата води з мережі протипожежного водопроводу повинна визначатися розрахунком виходячи з умови однієї пожежі при площі забудови до 150 га.

Додатково слід додавати витрату води не менше 50 л/с на пересувну пожежну техніку.

Витрати води на автоматичні установки зрошення резервуарів або ємностей слід приймати за умови одночасного зрошення резервуару, що горить, або ємностей, суміжних з ним. Інтенсивність подачі води на охолодження криогенних резервуарів або ємностей слід приймати:

0,1 л/с на 1 м² поверхні, що захищається - для поверхонь резервуарів або ємностей

0,5 л/с на 1 м² поверхні, що захищається - для місць розташування функціонального обладнання (запобіжні клапани, вузли арматури, що відключає).

Розрахункову тривалість охолодження резервуара автоматичними установками зрошення слід приймати 75 хв, для решти обладнання - 60 хв.

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		67

Автоматичні установки зрошення, крім автоматичного, повинні мати дистанційне включення з пультової та ручної.

Вузли управління повинні розміщуватись на відстані не менше 10 м від ємнісного обладнання або обвалування резервуарів.

Усі будівлі, споруди, зовнішні установки, склади комплексу LNG мають бути обладнані ручними пожежними сповіщувачами для виклику пожежної охорони/

Заходи для мінімізації екологічного впливу заводу LNG:

- поділ відходів та вивчення можливості їх вторинного застосування або переробки до їхнього видалення;
- встановлення шумозахисних бар'єрів або благоустрій насаджень зниження рівня шуму;
- забезпечити максимальний розрахунковий тиск резервуарів, фактично що використовуються для перевезення LNG;
- чітке дотримання регламентів щодо проведення робіт протягом всього життєвого циклу заводу LNG;
- постійний контроль систем скидання тиску;
- проектування заводів з мінімальним споживанням енергії для зниження викидів забруднюючих речовин.

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		68

ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ РОБОТИ

Розрахунок вартості науково-дослідницької магістерської роботи

Формування стрічкового графіку виконання роботи

Плани підготовки магістерської роботи формують з використанням різних моделей, один з яких стрічковий графік.

Стрічковий графік – графічна модель з переліком робіт, що виконуються, з зазначенням часу початку робіт, часу завершення робіт і тривалості всієї роботи. Формування стрічкових графіків вимагає розрахунків трудомісткості і тривалості кожної роботи і кількості виконавців. Для цих розрахунків потрібні нормативи трудомісткості виконання робіт, диференційованих за такими ознаками, як ступінь новизни, складності, формат креслень.

Перевагами стрічкового графіка є простота, наочність, можливість відображення змісту і багатьох організаційно-економічних характеристик робіт

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		69

Таблиця 9 – Дані для створення стрічкового графіка

Стадія №	Назва стадії	Трудомісткість робіт (посада виконавців)	Тривалість, доба
1	Розробка та затвердження технічного завдання	здобувач/ доцент	0/2
2	Вивчення технічного завдання	здобувач/ доцент	5/0
3	Огляд і вивчення літератури	здобувач /доцент	14/14
4	Розробка математичної моделі об'єкта	здобувач /доцент	10/0
5	Вибір методу дослідження	здобувач /доцент	0/2
6	Адаптація методів дослідження до практичного застосування	здобувач /доцент	2/0
7	Теплові і конструктивні розрахунки елементів об'єкта	здобувач /доцент	35/0
8	Розробка креслень і графічних моделей	здобувач /доцент	5/0
9	Аналіз результатів досліджень	здобувач /доцент	2/2
10	Корекція моделей і алгоритмів, що використовуються	здобувач /доцент	0/7
11	Оформлення пояснювальної записки	здобувач /доцент	2/0
12	Обговорення та затвердження результатів роботи	здобувач /доцент	2/2
13	Підготовка матеріалів роботи до захисту	здобувач/доцент	2/0
Разом:			77/29

Загальний термін роботи 3 місяці, з 11 вересня по 10 грудня 2023 року з урахуванням вихідних днів. Кількість робочих календарних днів за цей період склало 65 (5-ти денний робочий тиждень)

На підставі даних таблиці 13 складемо календарний графік виконання робіт, що відображає тривалість кожного виду робіт у вигляді відрізків часу, які розташовуються відповідно до послідовності виконання робіт (рис. 10).

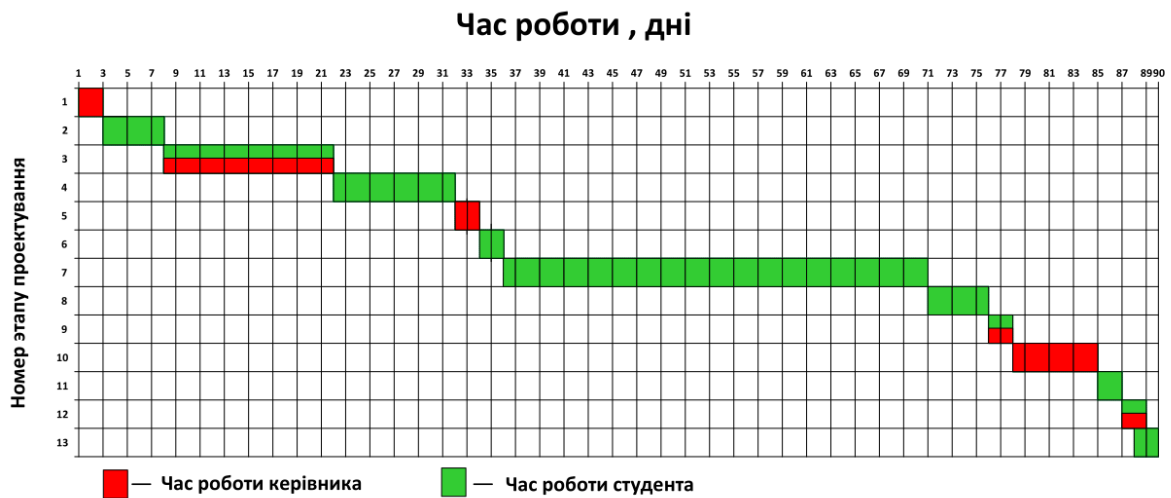


Рисунок 13 – Стрічковий графік виконання роботи

Розрахунок вартості досліджень і розробок

Кошторис витрат на НДР являє собою вартісну оцінку використовуваних у процесі виконання магістерської роботи матеріалів, енергії, основних фондів, трудових ресурсів, а також інших витрат на її створення та захист.

Витрати, що утворюють кошторис, групують відповідно до їх економічного змісту за такими елементами:

- матеріальні витрати;
- вартість робочої сили;
- амортизація основних засобів;
- інші витрати.

Матеріальні витрати

Таблиця 10 – Список матеріальних витрат

Назва	Одиниці	Кількість	Ціна за одиницю, гривень.	Сума, гривень.
Канцелярські товари	Шт.	10	150	1500
USB флеш- пам'ять	Шт.	1	450	450
Чорнило для лазерного принтера	Шт.	1	450	450
Разом				2400

Витрати на електроенергію включають до статті матеріальних

$$B_{ел} = N \cdot c_{ел} \cdot \tau_в \quad (1)$$

Де N – енергоспоживання обладнання кВт/год;

$c_{ел}$ – вартість 1 кВт/год, гривень;

$\tau_в$ – час використання обладнання під час робіт, год.

Для роботи використовували персональний комп'ютер потужністю 350 Вт і принтер потужністю 10 Вт. У ПІВМ є час: 50 днів, 8 годин на добу, принтера- 6 хвилин.

Вартість 1кВт електроенергії становить – 2,64 гр/кВт.

Вартість електроенергії становить:

$$B_{ел} = 0,35 \cdot 2,64 \cdot 50 \cdot 8 + 0,01 \cdot 2,64 \cdot 0,1 = 369,6 \text{ гр.} \quad (2)$$

Загалом матеріальні витрати дорівнюють:

$$\sum B = B_m + B_{ел} = 2400 + 369,6 = 2769,6 \text{ гр.} \quad (3)$$

Витрати на заробітну плату включають заробітну плату керівника (доцента), і стипендію здобувача.

Заробітна плата нараховується, виходячи із ставки розробника і часу, що витрачається на виконання роботи.

Доцент має ставку 12800 гривень, здобувач має ставку 2500 гривень.

					КРМ.КТ1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		72

Виходячи з витрат часу на розроблення (керівник - 29 днів, здобувач - 77 днів), зарплата дорівнює:

$$Z_{кер} = \frac{12800}{22} \cdot 29 = 16872,72 \text{ гр} - \text{зарплата керівника};$$

$$Z_{ст} = \frac{2500}{22} \cdot 77 = 8750 \text{ гр} - \text{зарплата здобувача}.$$

Витрати на заробітну плату:

$$\sum Z = Z_{кер} + Z_{ст} = 16872,72 + 8750 = 25622,72 \text{ гр}.$$

Додаткова зарплата становить 15% від основної суми:

$$Z_{дод} = \sum Z \cdot 0,15 = 25622,72 \cdot 0,15 = 3843,408 \text{ гр}.$$

Фонд оплати праці:

$$\Phi_{зн} = Z_{дод} + \sum Z = 20774,95 + 3116,24 = 23891,191 \text{ гр}.$$

Загальні прямі витрати

$$\sum B_{пр} = \Phi_{зн} + \sum B = 23891,191 + 2769,6 = 26660 \text{ гр}$$

Таблиця 11 – Необхідні витрати

Назва витратних позицій	Сума, гривень.	Відсоток
Матеріальні витрати, $\sum B$	2769,6	5
Витрати на заробітну плату, $\Phi_{зн}$	23891,191	95
Загальна вартість, $\sum B_{пр}$	26660	

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Rystad Energy - The future of CCUS research <https://www.rystadenergy.com/news/spurred-by-the-energy-crisis-global-lng-investments-will-now-peak-at-42-billion-i> (accessed December 2023)
2. Gomez, J. R., Gomez, M. R., Bernal, J. L., & Insua, A. B. (2015). Analysis and efficiency enhancement of a boil-off gas reliquefaction system with cascade cycle on board LNG carriers. *Energy Conversion & Management*, 94(3), 261-274. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)].
3. Li, J., Li, P., Gao, G., Pei, G., & Su, Y. (2017). Thermodynamic and economic investigation of a screw expander-based direct steam generation solar cascade rankine cycle system using water as thermal storage fluid. *Applied Energy*, 195(7), 137-151. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)].
4. Wang, Z., Han, F., Ji, Y., & Li, W. (2020). Analysis on feasibility of a novel cryogenic heat exchange network with liquid nitrogen regeneration process for onboard liquefied natural gas reliquefaction. *Case Studies in Thermal Engineering*, 22, 100760. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)].
5. Tak, K., Lee, I., Kwon, H., Kim, J., & Ko, D. (2015). Comparison of multistage compression configurations for single mixed refrigerant processes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 54(41), 9992-10000. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)].
6. Kai, L. (2010). Experiment and composition analysis of pre-cooling mixed refrigerant cycle gas liquefaction system. *Cryogenics*, 25(4), 37-41. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)].
7. Amir Mortazavi, Abdullah Alabdulkarem, Yunho Hwang, Reinhard Radermacher, Development of a robust refrigerant mixture for liquefaction of highly uncertain natural gas compositions, *Energy*, Volume 113, 2016, Pages 1042-1050, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.147> (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216310805>)

					KPM.KT1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		74

8. Linde AG. Group technology, technical brochure, 2009.
9. Shukri T. LNG technology selection. Hydrocarbon engineering, 2004 Foerg W, Bach W, Stockmann R. A New LNG Baseload Process and the Manufacturing of the Main Heat Exchangers. : Linde AG - Stat oil, 2003
10. Shukri T, Barclay M. Single mixed refrigerant process has appeal for growing offshore market. LNG 2007; 3:31–37.
11. Roberts MJ, Varma VA. Pre-cooled liquefaction process. U.S. patent 2010/0281915.
12. Newton CL, Stuber WG. Double mixed refrigerant liquefaction process for natural gas. U.S. patent 4,504,296.
13. Foerg W, Bach W, Stockmann R. A New LNG Baseload Process and the Manufacturing of the Main Heat Exchangers. : Linde AG - Stat oil, 2003/
14. Smith JM, Van Ness HC, Abbott MM. Introduction to chemical engineering thermodynamics. McGraw-Hill. Seventh edition, 2005.
15. Roberts MJ, Agrawal R, Daugherty L. Single mixed refrigerant gas liquefaction process. U.S. patent 6,347,531.
16. Geist, J.M. The role of LNG in energy supply. Int. J. Refrig. 1983, 6, 283–297. [Google Scholar] [CrossRef]
17. Meek, H.J.; Cariou, H.; Schier, M. SS: Offshore Floating LNG-LNG FPSO Development-bringing two industries together. In Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, TX, USA, 4–7 May 2009. [Google Scholar]
18. Zhang, Y.; Gai, J.; Jiang, H.; Liu, X.; Amp, B. Application of PRICO® liquefaction technology in offshore floating devices. Nat. Gas Ind. 2018, 38, 115–120. [Google Scholar]
19. Tram Ngoc Pham, Nguyen Van Duc Long, Sanggyu Lee, Moonyong Lee, Enhancement of single mixed refrigerant natural gas liquefaction process through process knowledge inspired optimization and modification, Applied Thermal Engineering, Volume 110, 2017, Pages 1230-1239, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.043>.

					KPM.KT1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		75

20. Mohd Shariq Khan, Moonyong Lee, Design optimization of single mixed refrigerant natural gas liquefaction process using the particle swarm paradigm with nonlinear constraints, *Energy*, Volume 49,2013,Pages 146-155, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.11.028>.
21. Mohd Shariq Khan, Sanggyu Lee, G.P. Rangaiah, Moonyong Lee,
22. Knowledge based decision making method for the selection of mixed refrigerant systems for energy efficient LNG processes, *Applied Energy*, Volume 111, 2013, Pages 1018-1031, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.010>.
23. Niu, G.; Huang, Y.H.; Wang, J. Thermodynamic analysis of liquefied natural gas process. *Chem. Eng.* 2005, 33, 71–74. [Google Scholar] [CrossRef]
24. He, T.; Ju, Y. Design and Optimization of a Novel Mixed Refrigerant Cycle Integrated with NGL Recovery Process for Small-Scale LNG Plant. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2014, 53, 5545–5553. [Google Scholar] [CrossRef]
25. Liang, Z.; Li, S.; Tian, J.; Zhu, X.; Mei, Q.; Zhang, L. An experimental study of technical measures for energy saving of CNG compressors. *Nat. Gas Ind.* 2013, 33, 95–98. [Google Scholar] [CrossRef]
26. Chen, Z. Study on Mixed Refrigerant Cycle Liquefied Natural Gas Technology. *Low Temp. Spec. Gases* 2019, 37, 17–23. [Google Scholar]
27. Tak, K.; Lee, I.; Kwon, H.; Kim, J.; Ko, D.; Moon, I. Comparison of Multistage Compression Configurations for Single Mixed Refrigerant Processes. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2015, 54, 9992–10000. [Google Scholar] [CrossRef]
28. Vatani, A.; Mehrpooya, M.; Palizdar, A. Energy and exergy analyses of five conventional liquefied natural gas processes: Liquefied natural gas. *Int. J. Energy Res.* 2014, 38, 1843–1863. [Google Scholar] [CrossRef]
29. Yajun Li, Hao Luo, Integration of light hydrocarbons cryogenic separation process in refinery based on LNG cold energy utilization, *Chemical Engineering Research and Design*, Volume 93, 2015, Pages 632-639, ISSN 0263-8762, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.04.009>.

					KPM.KT1.897-03.1.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		76

30. Ramezani, T.; Nargessi, Z.; Palizdar, A.; Vatani, A. Control Structure Design and Dynamic Simulation of Mixed Fluid Cascade Natural Gas Liquefaction Process. *J. Gas Technol.* 2019, 5, 19. [Google Scholar]
31. Mehrpooya, M.; Hossieni, M.; Vatani, A. Novel LNG-Based Integrated Process Configuration Alternatives for Coproduction of LNG and NGL. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2014, 53, 17705–17721. [Google Scholar] [CrossRef]
32. Gundersen T.: An Introduction to the Concept of Exergy and Energy Quality. Retrieved from Norwegian University of Science and Technology: <http://www.ivt.ntnu.no/ept/fag/tep4120/innhold/Exergy%20Light%20Version%203.pdf> (accessed December 2023)
33. . Dincer I., Cengel Y.A.: Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering. *Entropy* 3(2001), 3, 116-149.
34. Hamut H.S., Dincer I., Naterer G.F.: Exergoeconomic and Enviroeconomic Analyses of Hybrid Electric Vehicle Thermal Management Systems. In: *Progress in Sustainable Energy Technologies Vol II*, (2014).
35. Tirandazi B, Mehrpooya M, Vatani A, Moosavian SMA. Exergy analysis of C2+ recovery plants refrigeration cycle. *Chem Eng Res Des* 2011;89:676–89.
36. Tsatsaronis, G. and Morosuk, T., 2009, “Advances in exergy-based methods for improving energy conversion systems”. In “Optimization using exergybased methods and computational fluid dynamics”,.Tsatsaronis and A.Boyano A., eds., ClausthalZellerfeld: Papierflieger Verlag, 2009, pp. 1-10.
37. Morosuk T, Tsatsaronis G. A new approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines. *Energy.* 2008;33:890- 907. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.09.012>

					KPM.KT1.897-03.1.3	лист
						77
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		