

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



## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

**На тему:** «Термодинамічний аналіз схемно-циклових рішень установок повторного зрідження BOG при транспортуванні етилену морем»

Здобувача Борисова Р.С.

2-го курсу КТ 262М групи

Керівник доц. Соколовська-Єфименко В.В.

Консультант:

проф. Морозюк Л.І.

**Кваліфікаційна робота допускається до захисту**

Рішення кафедри від \_\_\_\_\_ 2022 р., протокол № \_\_\_\_\_

Завідувач кафедри КТ \_\_\_\_\_ Юрій Симоненко

Одеса - 2022 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

«\_\_» \_\_ 2022 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА**

Борисова Романа Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Термодинамічний аналіз схемно-циклових  
рішень установок повторного зрідження BOG при транспортуванні етилену морем

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

Затверджені наказом ОНТУ від 01 листопада 2022 року № 799-03

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 15 грудня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи: Суднова установка повторного зрідження LEG газів.  
Дані ходових випробувань установки повторного зрідження етилену на танкері-газовозі  
“ANTIKITHIRA”.

4. Перелік питань, які потрібно розробити:  
Вступ; Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Опис дійсної суднової установки  
повторного зрідження етилену судна- газовоза LEG «ANTIKITHIRA».  
Розрахунки характеристик дійсного циклу установки повторного зрідження етилену.  
Опис запропонованої установки ежекторного процесу повторного зрідження етилену.  
Моделювання запропонованої установки ЕППЗ. Моделювання ежекторів.  
Метод оцінки продуктивності запропонованої установки ЕППЗ. Результати та обговорення.  
Загальні висновки. Охорона праці. Економічні показники роботи.  
Список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу:  
Презентація Power Point (16 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 \_\_\_\_\_ Борисов Р.С.

### 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 )

Борисов Р.С.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
( підпис )

Соколовська-Єфименко В.В.  
(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**

Борисов Р.С.  
(ПІБ)

\_\_\_\_\_  
( підпис )

## АНОТАЦІЯ

### *Термодинамічний аналіз схемно-циклових рішень установок повторного зрідження BOG при транспортуванні етилену морем*

У цьому дослідженні пропонується звичайний процес повторного зрідження. (ЗППЗ) дійсної установки на танкері-газовозі LEG «ANTIKITIRA» замінити на ежекторний процес повторного зрідження (ЕППЗ) шляхом заміни дросельних вентилів на двофазні ежектори для покращення енергетичної ефективності установки. Було розроблено модель ежектора для аналізу запропонованої системи. Визначено тиск на виході із сопла ежектора. Проведено енергетичний та ексергетичні аналізи запропонованої установки (ЕППЗ) та звичайної дійсної установки (ЗППЗ). За результатами ексергетичного аналізу оцінено вплив продуктивності процесу в основних компонентах на енергетичну ефективність системи повторного зрідження (ЗППЗ та ЕППЗ).

Загальна споживана потужність запропонованого циклу не змінилася, а холодопродуктивність запропонованого циклу ЕППЗ порівняно з ЗППЗ збільшилася на 29,1 кВт. Енергетична ефективність запропонованого циклу COP збільшилася на 24%, а ексергетична ефективність збільшилася на 16%. Найбільшу термодинамічну незворотність в обох циклах (ЗППЗ, ЕППЗ) мають процеси стиснення в двоступеневому компресорі нижнього каскаду (29-34,1%) відповідно.

Аналіз показав, що використання парорідинних ежекторів позитивно позначається на енергетичній ефективності установки повторного зрідження, але така заміна вимагає додаткових капітальних вкладень.

***Ключові слова: етилен, ежектор, термодинамічний аналіз, установка повторного зрідження***

## ABSTRACT

### *Thermodynamic analysis of circuit-cycle solutions of BOG re-liquefaction units during ethylene conveying by sea transport*

A conventional re-liquefaction process is proposed in this study. (CRLP) of the current installation on the gas tanker LEG "ANTIKITIRA" to be replaced with an ejector process of re-liquefaction (EPRL) by replacing the throttle valves with two-phase ejectors to improve the energy efficiency of the installation. An ejector model was developed to analyze the proposed system. The pressure at the exit from the ejector nozzle is determined. Energy and exergy analyzes of the proposed installation (EPRL) and the conventional valid installation (CRLP) were carried out. Based on the results of the exergy analysis, the influence of the process productivity in the main components on the energy efficiency of the re-liquefaction system (CRLP and EPRL) was evaluated.

The total consumed power of the proposed cycle did not change, and the cooling capacity of the proposed EPRL cycle compared to the CRLP increased by 29.1 kW. The energy efficiency of the proposed COP cycle increased by 24% and the exergy efficiency increased by 16%. The compression processes in the two-stage compressor of the lower cascade have the greatest thermodynamic irreversibility in both cycles (CRLP, EPRL) (29-34.1%), respectively.

The analysis showed that the use of vapor-liquid ejectors has a positive effect on the energy efficiency of the re-liquefaction plant, but such a replacement requires additional capital investments.

***Key words: ethylene, ejector, thermodynamic analysis, re-liquefaction plant***

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА .....	13
1.1 Аналіз літературних даних і постановка проблеми .....	13
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА. ....	17
2.1 Опис дійсної суднової установки повторного зрідження етилену судна-газовоза LEG «АНТІКІТІРА» .....	17
2.2 Розрахунки характеристик дійсного циклу установки повторного зрідження етилену.....	20
2.3 Опис запропонованої установки ежекторного процесу повторного зрідження етилену.....	29
2.4 Моделювання запропонованої установки ЕППЗ.....	32
2.4.1 Моделювання ежекторів .....	33
2.5 Метод оцінки продуктивності запропонованої установки ЕППЗ.....	45
2.6 Результати та обговорення.....	55
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	58
ОХОРОНА ПРАЦІ .....	60
ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ РОБОТИ.....	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	72

					<i>КРМ.КТ.1.799-03.1.1</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Борисов Р.С.</i>			<b>ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА</b>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Соколовська-</i>				6	75	
<i>Реценз.</i>		<i>Єфименко В.В</i>				<b>ФНТІМ, гр КТ-262М</b>		
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>								

## ВСТУП

### Актуальність теми

Морський транспорт – основа міжнародної торгівлі та світової економіки. Пандемія COVID-19 та військові конфлікти, зокрема повномасштабне вторгнення в Україну, призводять до розвитку таких екологічних катастроф, як зміна клімату. Це впливає на життя людей і призводить до глобальної енергетичної кризи. Важливим аспектом у боротьбі з наслідками є використання зріджених газів, як альтернативного палива.

Їх застосування призводить до збільшення кількості суден-газовозів. Постачання газів у зрідженому стані вигідніше, оскільки перевезення відповідних об'ємів стиснутих газів потребує великих матеріальних витрат [1].

Газовози - це вузькоспеціалізований вид суден [2]. В залежності від виду вантажів, що транспортуються, вони поділяються на різні групи.

Значний енергетичний потенціал має зріджений етилен.

Найбільший виробник цього сполучення – США. Основними виробниками етилену в Азіатсько-Тихоокеанському регіоні є Південна Корея і Японія.

На сьогодні етилен розглядається, як випереджальний індикатор зростання у виробничому секторі. Величезне зростання попиту на етилен в останні роки спостерігається в Китаї, а також на Середньому і Дальньому Сході. Близько 85 мільйонів тон етилену виробляється у всьому світі щороку, але оскільки більша частина цього виробництва утилізується близько до свого місця, тільки 2,5 мільйона тон вдається транспортувати морем на великі відстані. [3].

Перевезення етилену морем вважається «нішевим» етиленовим сегментом ринку. Етилен – вуглеводень, що широко використовується в хімічній промисловості. Газ це (хімічна речовина) безбарвне пальне, вироблене в промислових масштабах. Використовується при створенні поліетиленових пластиків, етилового спирту, полівінілхлориду (ПВХ), антифризу, полістиролу та поліефірних волокон. Його можна застосовувати як холодоагент, особливо в

					КРМ.КТ.1.799-03.1.1	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		7

установках LNG. Також використовується, як охолоджуюча рідина і паливо, для різання і зварювання металів. Крім того, він вважається важливим рослинним гормоном, що прискорює ріст і змушує дозрівати плоди. У природному стані етилен у невеликих кількостях міститься в природному газі. У технічних масштабах він отримується при термічному розкладанні газоподібних і рідких вуглеводнів, з газових продуктів процесів нафтопереробки і з коксових газів.

Етиленові судна часто будуються для конкретних цілей – перевозити етилен або етан. Транспортна класифікація таких зріджених газів – LEG (Liquefied Ethylene Gas). З цього флоту етиленовозів близько дюжини становлять особливу підгрупу суден, здатних одночасно обробляти широкий спектр рідких хімікатів та зріджених газів. Судна можуть завантажуватись або розвантажуватись практично на всіх герметичних та рефрижераторних терміналах, що робить їх найбільш універсальними газовозами з погляду на вантажопідйомність. Багато етиленовозів також можуть перевозити вантажі зрідженого нафтового газу, та аміак, що підвищує їхню гнучкість. Останні дані IHS SeaWeb показують, що в усьому світі існує 141 перевізник етану і етилену місткістю від 918 до 22000 м<sup>3</sup>. Перші торгові шляхи етилену були прокладені навколо узбережжя Європи, Мексики та Японії.

Фізичні властивості етилену визначають його систему утримання вантажу. Етилен має нормальну температуру кипіння -104°C. Танкери для зрідженого етилену будуються або як судна напівнапірного типу з частковим охолодженням вантажу (semi-refrigerated gas carrier), або як судна рефрижераторного типу, з повним охолодженням вантажу (fully refrigerated carrier).

Танкери з етиленом містять в собі велику різноманітність форм вантажних танків, включаючи сферичні, призматичні і мембранні танки, а також поздовжньо і поперечно встановлені циліндричні і дволепесткові. Матеріали вантажних танків, сумісні з температурою перевезення -104°C, містять алюмінієві сплави і нікелеві сталі з вмістом 5.9 і 36%.

					КРМ.КТ.1.799-03.1.1	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		8

У процесі транспортування частина вантажу (0.08-0.3%) випаровується кожен день, що призводить до підвищення тиску і температури у вантажних танках.

Щоб утримати тиск і температуру в межах норми, виникає необхідність прибрати з танка пари газу, що утворилися при його кипінні, сконденсувати їх і повернути назад у танк.

Такий процес здійснюється на танкері-газовозі системою повторного зрідження газу (reliquefaction plant). Установки повторного зрідження на судах, які транспортують етилен і етан являють собою каскадні холодильні машини.

Робочою речовиною нижнього каскаду в таких установках є сам вантаж-етилен – (R1150), у верхньому каскаді традиційно використовувався холодоагент – R22. Екологічні вимоги до морських перевезень, постійно посилюються відповідно до Міжнародної конвенції по запобіганню забруднення з суден (MARPOL 73/78). На нових судах з 1 січня 2020 року МК МАРПОЛ заборонило використання гідрохлорфторвуглеців (НСFC) в холодильних установках.

Ефективний і екологічно безпечний вибір – це натуральні холодоагенти. Таким чином, на сьогодні у верхньому каскаді використовують пропілен (R1270). Установка повторного зрідження вважається ключовим елементом, що підвищує безпеку і економічність цих типів суден. Система повторного зрідження вимагає відносно великих капіталовкладень. Вона є великим споживачем енергії, володіє значною масою і займає великий об'єм.

Щоб дотримуватись обов'язкових стандартів енергоефективності для суден, таких як Індекс проектування енергоефективності (EEDI) та План управління енергоефективністю суден (SEEMP) [4], конструктори суден LEG та суднобудівники займаються підвищенням енергоефективності системи повторного зрідження.

У цих умовах важливо забезпечити високу ефективність установки повторного зрідження газу на всіх етапах від проектування до експлуатації, щоб підвищити її продуктивність і зменшити споживання енергії.

					КРМ.КТ.1.799-03.1.1	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		9

Висока ефективність роботи установки повторного зрідження досягається шляхом вдосконалення процесів в окремих її елементах з метою інтенсифікації цих процесів і пошуку нових конструктивних рішень елементів установки, вибором найбільш раціонального режиму роботи при проектуванні і експлуатації всієї установки.

У літературі [5,6,7] при аналізі установок повторного зрідження LEG, було показано, що значні незворотні втрати в установках спостерігаються в дросельних пристроях. Продуктивність звичайного процесу повторного зрідження LEG може бути додатково покращена за рахунок використання ефективніших розширювальних пристроїв.

Враховуючи вищевикладене, у цій роботі пропонується дослідження спрямоване на оцінку покращення продуктивності процесу повторного зрідження з використанням ежектора. При наявності дійсних параметрів роботи установки повторного зрідження на танкері-газовозі LEG «АНТИКІТІРА».

Обрана тема роботи є актуальною з точки зору перспектив розвитку морських перевезень з дотриманням вимог ІМО, щодо енергоефективності суден.

					КРМ.КТ.1.799-03.1.1	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		10

**Метою роботи** є визначення характеристик процесів каскадної установки повторного зрідження етилену при заміні дросельних пристроїв на ежектори в дійсній установці на танкері-газовозі LEG «ANTIKITIRA». Таке дослідження допоможе оцінити доцільність заміни дросельних пристроїв на ежектори на діючих установках, та доповнить теоретичну базу що до покращення енергоефективності установок повторного зрідження етилену.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

- розробити технологічну схему заміни дросельних пристроїв на ежектори;
- провести аналіз розробленої технологічної схеми;
- виконати енергетичний аналіз циклів установки повторного зрідження (з дроселем та з ежектором);
- виконати ексергетичний аналіз характеристик циклів дійсної установки повторного зрідження (з дроселем та з ежектором);
- проаналізувати отримані результати аналізу.

**Об'єктом дослідження** є установка повторного зрідження LEG газів.

**Предметом дослідження** є термодинамічні процеси, які здійснюються в елементах установки повторного зрідження.

**Методи дослідження** – термодинамічний аналіз та числове моделювання термодинамічних процесів в елементах установки повторного зрідження.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У роботі вперше здобуто такі наукові результати:

- отримав подальший розвиток ексергетичний метод термодинамічного аналізу складних схемно-циклових рішень.

					КРМ.КТ.1.799-03.1.1	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		11

### **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. Наукові результати та рекомендації обґрунтовані реальним моніторингом фахівців-експлуатаційників.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Розроблена методика визначення величин незворотностей у циклі складної теплоенергетичної установки ексергетичним методом є підставою для оцінки енергетичної ефективності установки повторного зрідження етилену у реалізації практичних проектів.

**Фактологічною основою** є підручники, навчальні посібники, інструкції по експлуатації судна, 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 викладно на 76 сторінках, включаючи 9 рисунків, 15 таблиць, список інформаційних джерел 31 найменувань.

					КРМ.КТ.1.799-03.1.1	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		12