

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



ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

На тему: «Дослідження енергетичних характеристик схемно-циклового рішення
гібридної установки повторного зрідження LNG»

Здобувача Гайдая Р.Р.
2-го курсу КТ 861б 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**

Гайдая Романа Руслановича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження енергетичних характеристик
схемно-циклового рішення гібридної установки повторного зрідження LNG

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 LNG газів.
Масова витрата паливного газу – 99752 кг/год, потужність установки LNG – 1200 кВт;
потужність етиленового циклу – 523,8 кВт; масова витрата BOG – 4632,9 кг/год.

4. Перелік питань, які потрібно розробити:
Вступ. Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Вивчення технологічної схеми
гібридної установки повторного зрідження LNG. Аналіз продуктивності гібридної установки.
Енергетичний аналіз гібридної установки. Аналіз термодинамічної ефективності гібридної
установки повторного зрідження. Термодинамічні основи ексергетичного аналізу установок
повторного зрідження. Ексергетичний аналіз гібридної установки повторного зрідження.
Загальні висновки. Охорона праці. Економічні показники роботи. Список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу:
Презентація Power Point (17 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 _____ Гайдай Р.Р.

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)

Гайдай Р.Р..
(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 _____
(ПІБ)

Гайдай Р.Р.
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Дослідження енергетичних характеристик схемно-циклового рішення гібридної установки повторного зрідження LNG

Гайдай Роман

Сучасні танкера-газовози LNG обладнані установками повторного зрідження (reliquefaction plant) на борту для перетворення будь-якого надлишкового BOG знову у рідкий вантаж. Установки повторного зрідження споживають багато енергії. З метою енергозаощадження в роботі запропоновано схемно-циклове рішення гібридної установки повторного зрідження BOG на танкерах-газовозах LNG. Запропонована гібридна установка складається з двох інтегрованих холодильних циклів: каскадного, робочою речовиною якого є водоаміачний розчин, та двоступеневого-робочою речовиною якого є етилен. Живлення каскадної машини забезпечується органічним циклом Ренкіна, первинною енергією для якого є високотемпературні вихлопні гази (LNG) від двигуна судна. Використовуючи термодинамічні рівняння було проведено енергетичні розрахунки усіх контурів установки. Проведено термодинамічний аналіз установки ексергетичним методом. Оцінка ефективності роботи установки проводилася за значеннями показників: енергетичної ефективності COP, ексергетичного ККД, та питомих енергетичних витрат. Ексергетичний аналіз показав, що найбільша деструкція ексергії спостерігається у теплообмінних апаратах та компресорах. Результати аналізу підкреслили: установка має досить високі енергетичні показники, порівняно з існуючими системами повторного зрідження, але конструктивні габарити запропонованої установки не відповідають критеріям за якими оцінюються установки на борту судна.

Ключові слова: *танкер-газовоз LNG, установка повторного зрідження, каскадна холодильна машина, абсорбційна машина, органічний цикл Ренкіна*

ABSTRACT

Study of the energy characteristics of the circuit-cycle solution of the hybrid LNG re-liquefaction plant

Modern LNG tankers are equipped with re-liquefaction plants on board to convert any excess BOG back into liquid cargo. Re-liquefaction plants consume a lot of energy. In order to save energy, the work proposed a circuit-cycle solution of a hybrid BOG re-liquefaction plant on LNG gas tankers. The proposed hybrid installation consists of two integrated refrigeration cycles: a cascade one, the working substance of which is a water-ammonia solution, and a two-stage one, the working substance of which is ethylene. The cascade machine is powered by an organic Rankine cycle, the primary energy for which is high-temperature exhaust gases (LNG) from the ship's engine. Using thermodynamic equations, energy calculations of all plant circuits were carried out. A thermodynamic analysis of the installation using the exergetic method was carried out. The evaluation of the efficiency of the installation was carried out according to the values of indicators: energy efficiency COP, exergetic efficiency, and specific energy costs. Exergy analysis showed that the greatest destruction of exergy is observed in heat exchangers and compressors. The results of the analysis proclaimed that the installation has fairly high energy performance compared to existing re-liquefaction systems, but the structural dimensions of the proposed installation do not meet the criteria by which installations on board the ship are evaluated.

Key words: LNG tanker, re-liquefaction plant, cascade refrigerating machine, absorption machine, organic Rankine cycle

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	13
1.1 Аналіз літературних даних і постановка проблеми	13
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА.	20
2.1 Вивчення технологічної схеми гібридної установки повторного зрідження LNG	20
2.2 Аналіз продуктивності гібридної установки.....	26
2.3 Енергетичний аналіз гібридної установки	34
2.4 Аналіз термодинамічної ефективності гібридної установки повторного зрідження	38
2.4.1 Термодинамічні основи ексергетичного аналізу установок повторного зрідження.....	38
2.4.2 Ексергетичний аналіз гібридної установки повторного зрідження	45
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	53
ОХОРОНА ПРАЦІ	54
ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ РОБОТИ.....	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	66

					<i>КРМ.КТ.1.799-03.2.4</i>			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		<i>Гайдай Р.Р.</i>			ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		<i>Соколовська-</i>					6	70
Реценз.		<i>Єфименко В.В</i>				ФНТІМ, зр КТ-8618		
Н. Контр.								
Затверд.								

ВСТУП

Актуальність теми

Задоволення енергетичних потреб завжди є головним важким завданням для економіки будь-якої країни. Незважаючи на зусилля щодо розширення використання відновлюваних джерел енергії, залежність від викопного палива залишається важливою, ніж будь-коли.

Природний газ (NG) є універсальним джерелом енергії з широким спектром промислових та побутових застосувань, попит на нього зростає у всьому світі.

NG в основному складається з метану; він виробляє менше вуглекислого газу, SO_x (оксидів сірки) і NO_x (оксидів азоту), ніж будь-яке інше викопне паливо [1]. Тому NG вважається найчистішим паливом серед різних видів палива, таких як бензин, дизельне паливо, газ і вугілля.

Оскільки забруднення навколишнього середовища та енергетична криза стають більш серйозними проблемами, використання природного газу потрапляє до центру уваги.

Таким чином, торгівля природним газом суттєво зростає у всьому світі з безперервним збільшенням попиту. Згідно зі сценарієм, Momentum Scenario MEA, очікується, що у 2040 році природний газ буде другим після вугілля як найбільш широко використовуюче викопне паливо у світі [2].

В даний час природний газ транспортується на енергетичні ринки трубопроводами в газоподібному вигляді або в зрідженому вигляді LNG.

LNG є рідким станом природного газу, отриманим внаслідок охолодження та конденсації. Перехід у рідку форму зменшує об'єм газу в 600 разів, тому зрідження проводиться, як правило, з метою компактного зберігання та транспортування газу. До переваг LNG відноситься також той факт, що в зрідженому стані газ куди більш безпечний при перевезенні та зберіганні, ніж у компримованому.

					КРМ.КТ.1.799-03.2.4	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		7

У порівнянні з трубопровідним газом LNG економічніший і гнучкіший, а отже, стає найшвидшим енергетичним сектором, що росте, у світі [3].

Для транспортування LNG на далекі відстані використовуються танкери-газовози [4].

Морські перевезення є важливою ланкою в ланцюзі LNG від родовища до споживача. Судна для перевезення LNG є одними з найдорожчих суден у світі. Це пов'язано як із відносно низькою молярною масою LNG, наявній густини і, отже, потребує великої вантажної ємності для даної маси вантажу. Крім того, потрібна досить низька температура для підтримки LNG у його рідкому стані при низькому тиску. Такі умови забезпечують тривалий транзит морем у комерційно вигідних кількостях.

Останнім часом у зв'язку з екологічними питаннями, що загострилися, були прийняті директиви 2012/33/ЄС, які встановлюють максимальну межу викидів сірки для суден у розмірі 0,1% у визначених SECA (зонах контролю викидів сірки): Балтійське море, Ла-Манш та Північне море) з 1 січня 2015 року та 0,5% для всіх інших європейських вод у 2020 та 2025 році. Ця директива позиціонує LNG як суднове паливо [5]. Крім більш низького впливу на навколишнє середовище, вартість LNG значно більш конкурентоспроможна, ніж вартість інших видів палива з низьким вмістом сірки.

Такі вимоги привели до створення великих газозовів нового покоління LNG які використовують LNG як паливо і обладнані системами подавання палива LNG.

LNG транспортується при тиску трохи вище атмосферного та температурі його кипіння приблизно -160°C . Фізичні властивості LNG визначають його систему утримання вантажу. Всі системи захисної оболонки повинні бути виготовлені з матеріалів, які можуть витримувати надзвичайно низькі температури та розраховані на значні перепади температур від умов навколишнього середовища до умов експлуатації, а також забезпечувати ефективну теплоізоляцію для запобігання теплоприпливів та неприйнятних

					КРМ.КТ.1.799-03.2.4	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		8

охолодження основних конструкцій корпусу судна. Кожна з систем утримання вантажу, що використовуються в даний час, відповідає цим критеріям по-різному, часто з використанням різних матеріалів. Основний матеріал, що використовується у всіх системах утримання LNG, значно дорожчий, ніж звичайні суднобудівні сталі.

Незалежні резервуари, як правило, виготовляються з алюмінієвого сплаву, хоча також прийнятними матеріалами є сталь із вмістом 9% нікелю та нержавіюча сталь. Газовози LNG містять у собі велику різноманітність форм вантажних танків, включаючи сферичні, призматичні та мембранні танки.

Внаслідок різниці температур між навколишнім середовищем та зрідженим газом виникають потоки теплової енергії до рідкого вантажу, що викликають випаровування останнього. Добова випаровуваність, так званий BOG (boil-off gas), може становити 0,1-0,3% ємності танків газозовів. Величина добового BOG визначається переважно термічним опором теплової ізоляції танків-газовозів та умовами навколишнього середовища.

Щоб утримати тиск і температуру в танку в межах норми, виникає необхідність видалити з танка пари газу, що утворилися при його кипінні.

Сьогоднішня тенденція в морському транспортуванні LNG полягає у мінімізації витрати пального та максимальному збільшенні кількості вантажів, що доставляють у порти розвантаження з мінімальним впливом на навколишнє середовище.

Таким чином, сучасні судна-газовози працюють із досконалыми малооборотними двотактними двигунами ME-GI (упорскування газу з електронним управлінням) та двигуни XDF останнього покоління. На таких судах добове википання BOG становить лише 0,07%. Двигуни ME-GI приблизно на 30% ефективніші, ніж TFDE, і на 50% ефективніші, ніж старі паротурбінні судна. Ці судна обладнані установками повторного зрідження (reliquefaction plant) для перетворення будь-якого надлишкового BOG назад у рідкий вантаж.

					КРМ.КТ.1.799-03.2.4	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		9

Впровадження методів повторного зрідження на борту набуло останніми роками дуже важливої ролі у прагненні знизити експлуатаційні витрати та підвищити енергоефективність таких суден.

У свою чергу, система повторного зрідження споживає багато енергії [6], вимагає відносно великих капіталовкладень має значну масу та займає великий об'єм. При використанні двигунів, що працюють на LNG небажано витрачати холодну енергію, що зберігається в LNG.

Одним з ефективних способів відновлення енергії з відпрацьованих джерел тепла є органічний цикл Ренкіна (ОЦР). Використання високотемпературних вихлопних газів судна для нагрівання вбудованої конструкції системи повторного зрідження BOG, забезпечить зменшення енергоспоживання судна, а також зменшить вплив викидів шкідливих речовин на довкілля.

В даний час на борту танкерів-газовозів LNG застосовують різні технологічні процеси повторного зрідження BOG.

На основі порівняльного вивчення різних установок повторного зрідження щодо їх продуктивності, ефективності та інших технічних характеристик у літературі [7,8] показано, що каскадна технологія повторного зрідження може бути використана як альтернативна технологія зрідження BOG на танкерах-газовозах через її високу енергоефективність і малі витрати на технічне обслуговування.

Враховуючи вищевикладене, ґрунтуючись на дослідженнях [9,10,11] у цій роботі пропонується провести аналіз схемно-циклового рішення гібридної установки повторного зрідження BOG на танкері-газовозі LNG за допомогою двох інтегрованих холодильних циклів: каскадного та двоступеневого. Живлення каскадної машини і забезпечується органічним циклом Ренкіна, первинною енергією для якого є високотемпературні вихлопні гази (LNG) від двигуна судна.

					КРМ.КТ.1.799-03.2.4	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		10

Обрана тема роботи є актуальною з точки зору перспектив розвитку морських перевезень з дотриманням вимог ІМО, що до енергоефективності і екологічної безпеки суден.

Метою роботи є визначення характеристик окремих процесів схемно-циклового рішення гібридної установки повторного зрідження LNG на танкері-газовозі LNG на основі розвитку методів дослідження термодинамічної ефективності. За результатами дослідження можна судити про перспективність впровадження такої технології та високу енергетичну ефективність циклу.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

- провести аналіз технологічної схеми гібридної установки повторного зрідження LNG;
- дослідити термодинамічні процеси, що відбуваються в елементах технологічної схеми;
- застосувати ексергетичний метод термодинамічного аналізу до оцінки характеристик установки повторного зрідження;
- проаналізувати отримані результати аналізу.

Об'єктом дослідження є гібридна установка повторного зрідження LNG.

Предметом дослідження є термодинамічні процеси, які здійснюються в елементах гібридної 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 ексергетичного методу термодинамічного аналізу дійсних циклів.

					КРМ.КТ.1.799-03.2.4	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.

Практичне значення отриманих результатів.

Розроблене схемне-циклове рішення та методика визначення величин незворотностей ексергетичним методом є підставою для удосконалення установок повторного зрідження LNG.

Фактологічною основою є підручники, навчальні посібники, інструкції з 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 70 сторінках, включаючи 9 рисунків, 11 таблиць, список інформаційних джерел 35 найменувань.

					КРМ.КТ.1.799-03.2.4	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		12