

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



ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

На тему: «Термодинамічний аналіз циклу установки повторного зрідження
етану на судні-газовозі LPG «Gas Bluebonnet»»

Здобувача Іваненко Є.Д.

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**

Іваненка Євгена Дмитровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Термодинамічний аналіз циклу установки
повторного зрідження етану на судні-газовозі LPG «Gas Bluebonnet»

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 LPG газів.
Дані ходових випробувань установки повторного зрідження етану на танкері-газовозі
«Gas Bluebonnet»

4. Перелік питань, які потрібно розробити:
Вступ. Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Робота дійсної суднової
установки повторного зрідження LPG танкера- газовеоза «GAS Bluebonnet.
Розрахунки характеристик дійсного циклу установки повторного зрідження етану.
Термодинамічні основи аналізу установок повторного зрідження. Ентропійно-циклова модель
установки повторного зрідження етану. Методика ентропійно-статистичного аналізу.
установки повторного зрідження етану, яка працює за каскадним циклом. Аналіз одержаних
Результатів. Загальні висновки. Охорона праці. Економічні показники роботи.
Список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу:
Презентація Power Point (15 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 _____ Іваненко Е.Д.

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)

Іваненко Е.Д.
(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

Іваненко Е.Д.
(ПІБ)

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Термодинамічний аналіз циклу установки повторного зрідження етану на судні-газовозі LPG «Gas Bluebonnet»

Іваненко Євген

На сьогодні промислова цінність етану для виробників нафтохімічної продукції залишається високою. Проблема полягає у його транспортуванні, особливо на далекі відстані, в економічно доцільних обсягах.

Через потреби у спеціалізованому флоті судів для міжконтинентальної торгівлі в даний час розроблено інноваційні конструкції танкерів для перевезення етану. На верфі Jiangnan Shipyard у 2021 р. був спущений на воду перший у світі дуже великий етановий танкер (VLEC) типу В «GAS Bluebonnet». Компанія Babcock LGE розробила інноваційні рішення, щоб змінити ринок етану, забезпечуючи значну економію експлуатаційних витрат у порівнянні з традиційними системами вантажно-розвантажувальних робіт на великих перевізниках етану (VLEC). Як стверджує виробник, така система повторного зрідження забезпечує підвищену здатність до повторного зрідження, та забезпечує судну значну економію експлуатаційних витрат, а завдяки меншій кількості годин роботи системи вантажно-розвантажувальних робіт також знижує частоту технічного обслуговування.

Такі твердження, опубліковані в рекламній продукції компанії Babcock LGE, є цікавими та актуальними для дослідження

У роботі використані реальні дані ходових випробувань установки повторного зрідження етану на танкері-газовозі «*Gas Bluebonnet*». Використовуючи дані і термодинамічні рівняння було проведено енергетичні розрахунки установки. Визначено характеристики установки. Проведено термодинамічний аналіз установки. Для аналізу спочатку застосовано «метод циклів» за допомогою якого відтворено модель каскадної установки повторного зрідження етану, а далі проведено аналіз конструкцій елементів та енергетичних характеристик компресорів ентропійно- статистичним методом.

Оцінка ефективності роботи установки проводилася за питомими витратами споживаної потужності компресорів та значенням показника термодинамічної ефективності. Аналіз отриманих результатів підтвердили інформацію, представлену компанією Babcock Liquid Gas Equipment Limited (BLGE). має високі енергетичні показники порівняно з існуючими системами повторного зрідження етану на танкерах-газовозах LEG.

Ключові слова: танкер-газовоз VLEC, установка повторного зрідження, енергоефективність, ентропійно-статистичний метод.

ABSTRACT

Thermodynamic analysis of the methane re-liquefaction installation cycle on the LPG gas carriers "Gas Bluebonnet"

Today, the industrial value of ethane for petrochemical producers remains high. The problem lies in its transportation, especially over long distances, in economically feasible volumes.

Due to the need for a specialized fleet of vessels for intercontinental trade, innovative tanker designs have been developed for the transportation of ethane. The world's first B-type Very Large Ethane Tanker (VLEC) "GAS Bluebonnet" was launched at Jiangnan Shipyard in 2021. Babcock LGE has developed innovative solutions to transform the ethane market, delivering significant operating cost savings over traditional VLEC loading and unloading systems. According to the manufacturer, such a re-liquefaction system provides increased capacity for re-liquefaction and provides the vessel with significant savings in operating costs, and due to fewer hours of operation of the loading and unloading system, it also reduces the frequency of maintenance.

Such claims, published in Babcock LGE's promotional products, are interesting and relevant for research

The work uses real data from running tests of the ethane re-liquefaction unit on the gas tanker "Gas Bluebonnet". Energy calculations of the installation were carried out using the data and thermodynamic equations. The characteristics of the installation are defined. A thermodynamic analysis of the installation was carried out. For the analysis, the "method of cycles" was first used, with the help of which the model of the cascade unit for ethane re-liquefaction was reproduced, and then the analysis of the designs of the elements and the energy characteristics of the compressors was carried out using the entropy-statistical method.

The evaluation of the efficiency of the installation was carried out based on the specific costs of the consumed power of the compressors and the value of the thermodynamic efficiency indicator. The analysis of the obtained results confirmed the information presented by Babcock Liquid Gas Equipment Limited (BLGE). has high energy performance compared to existing ethane re-liquefaction systems on LEG gas tankers.

Keywords: *VLEC gas tanker, re-liquefaction plant, energy efficiency, entropy-statistical method.*

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	14
1.1 Аналіз літературних даних і постановка проблеми	14
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА.	18
2.1 Робота дійсної суднової установки повторного зрідження LPG танкера-газовоза «GAS Bluebonnet»	18
2.2 Розрахунки характеристик дійсного циклу установки повторного зрідження етану	28
2.3 Аналіз термодинамічної ефективності дійсного каскадного циклу установки повторного зрідження етану	38
2.3.1 Термодинамічні основи аналізу установок повторного зрідження	38
2.3.2 Ентропійно-циклова модель установки повторного зрідження етану	41
2.3.3 Методика ентропійно-статистичного аналізу установки повторного зрідження етану, яка працює за каскадним циклом	41
2.3.4 Аналіз одержаних результатів	52
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	54
ОХОРОНА ПРАЦІ	55
ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ РОБОТИ	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	67

					<i>КРМ.КТ.1.799-03.2.3</i>					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА					
Розроб.		<i>Іваненко Е.Д.</i>						Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		<i>Соколовська-</i>						6		69
Реценз.		<i>Єфименко В.В</i>						<i>ФНТІМ, зр КТ-8618</i>		
Н. Контр.										
Затверд.										

ВСТУП

Актуальність теми

NGL відіграють важливу роль у житті людства як сировина для тисяч споживчих товарів. Сланцева революція США призвела до «революції NGL». Видобуток NGL збільшившись більш ніж на 100 відсотків всього за 10 років. NGL не може бути монетизований в короткостроковій та середньостроковій перспективі лише у США. Ця нова пропозиція відкрила можливості для розширення торгівлі NGL між США та Європою, Південною Америкою, Індією та Китаєм [1].

NGL (Natural Gas Liquids) – це так звані рідкі фракції природного газу. Основний компонент природного газу – метан (CH_4). У той же час у складі деяких газових родовищ присутні й інші вуглеводні: етан (C_2H_6), пропан (C_3H_8), бутан (C_4H_{10}), пентан (C_5H_{12}), а також вуглеводні з великою кількістю вуглецевих атомів (C_5+). Нафта складається переважно з вуглеводнів з ще більшим числом вуглецевих атомів - від 6 до 20. Таким чином, NGL займають проміжне положення між самим природним газом (метаном) та нафтою. «Проміжний» хімічний склад цих сполук знаходить своє відображення і у властивостях речовин, і їх застосуванні.

За кілька років NGL (широкі фракції вуглеводнів) перетворилися з вторинних побічних продуктів видобутку газу на цінні супутні продукти, які можуть стимулювати економіку, що визначає зростання видобутку газу.

Сланцевий бум у США зробив цю країну самодостатньою за NGL. Видобуток сланцевого газу в таких областях, як сланці Ігл-Форд у Техасі, багата на NGL – продукти. Ці продукти відокремлюються від газу на переробному заводі. Типовий склад LNG складається з 40-45% етану, 25-30% пропану, 5-10% нормального бутану, 10% ізобутану і 10-15% пентанів. Використання NGL охоплює майже всі сектори економіки. Сферу їх застосування можна поділити на дві принципово різні галузі.

					КРМ.КТ.1.799-03.2.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		7

Перша - це нафтохімія, тобто виробництво полімерів та інших синтетичних матеріалів.

Друга сфера застосування - як джерела енергії. Конкретна галузь залежить від типу вуглеводнів. Так, пентан і довші вуглеводні безпосередньо поєднуються з продуктами перегонки нафти під час виробництва бензину.

Пропан і бутан також застосовують як моторне паливо, крім того, важлива сфера застосування пропану - як паливо для обігріву та побутових цілей в районах, не порушених централізованою системою газопостачання. Хоча і пропан, і бутан — гази, вже за відносно невеликого тиску та кімнатної температури вони зріджуються, тому можуть транспортуватися у балонах.

Етан вже зріджується значно гірше, тому як паливо нині застосовується лише на суднах-газовозах, які транспортують цей продукт. Хоча як джерело палива це дуже привабливий ресурс через його достаток і відносно низьку ціну.

Основна сфера застосування етану - нафтохімічна промисловість як сировина для отримання етилену в процесі крекінгу з водяною парою. Він також використовується у виробництві пластмас, антифризу та миючих засобів.

Крім того, у ряді випадків при переробці природного газу вигідніше не виділяти окремо етан, а продавати його разом з метаном. Виділення етану досить затратне, а крім того, його вартість найнижча серед NGL.

Зі сказаного вище ясно, що ціни на різні NGL відрізняються. Так як нафта в даний час значно дорожча за природний газ, то речовини найбільш близькі за складом до нафти (пентан і довші NGL) фактично коштують приблизно так само, як нафта, і навіть дорожче (адже в нафті завжди є надто важкі фракції, які здешевлюють її вартість). Навпаки, вартість етану трохи вища за ціни на природний газ.

Зростання потужностей з видобутку етану США дали цій хімічній речовині цінову перевагу проти нафти і зробили його життєздатним експортним товаром. На сьогоднішній день промислова цінність етану для виробників нафтохімічної продукції залишається високою. Проблема полягає у його транспортуванні,

					КРМ.КТ.1.799-03.2.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		8

особливо на далекі відстані, в економічно доцільних обсягах. Етан — один із найбільш технічно складних газів для транспортування.

Для транспортування на далекі відстані морем етан повинен бути охолодженим до температури $-89,9^{\circ}\text{C}$, стиснутий до високого тиску або й те, й інше. Ці фактори обмежують типи суден, здатних перевозити продукт у рідкому стані.

З існуючого газовозного флоту лише етиленовози були здатні транспортувати етан. Такі типи суден зазвичай оснащені системами утримання вантажу напіврефрижераторного типу з частковим охолодженням вантажу (semi-refrigerated gas carrier) і обладнані незалежними танками типу "С" [2].

Оскільки етан та етилен традиційно вважаються «нішевим» сегментом газового сектора, вони історично транспортувалися відносно невеликими партіями. Багато судів цього класу (LEG) відносно малі за сьогodнішніми стандартами газовозів. Але вони залишаються затребуваними: близько 70% існуючого парку зі 160 з лишком етиленових перевізників мають вантажопідйомність 10 000 кубометрів і менше. Це накладає економічні обмеження на транснаціональних виробників нафтохімічної продукції, які хотіли б переміщати етан на далекі відстані, наприклад, із США до Азії чи Європи.

Як правило, світовий флот дуже великих газовозів (VLGC) вантажопідйомністю понад 75 000 кубічних метрів призначений для перевезення зрідженого нафтового газу (LPG), оснащений однокорпусними призматичними танками типу «А», з повним охолодженням вантажу, такі судна використовують корпус судна як вторинний бар'єр для запобігання витоку вантажу. Однак правила не дозволяють використовувати такий тип конструкції для перевезення вантажів, які необхідно перевозити за температури нижче -55°C .

Відповідно, Міжнародний кодекс будівництва та обладнання суден, що транспортують зріджені гази наливом (IGC Code) [3], вимагає, щоб етан

					КРМ.КТ.1.799-03.2.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		9

транспортувався на судні з подвійним корпусом при використанні призматичних танків. Таким чином, існуючі варіанти систем утримання етану включають: ємності під тиском (циліндричні, двопелюсткові або трипелюсткові танки типу «С»), мембранні танки GTT Mark III, (використовуються на багатьох танкерах LNG), сферичні резервуари, призматичні резервуари з частковим вторинним бар'єром або призматичні резервуари з повним вторинним бар'єром (самонесучі призматичні танки типу «В»), що не залежать від конструкції корпусу корабля.

Етановозний флот демонструє потенціал для поступового зростання, як у кількості судів, так і їх вантажопідйомності через потреби у спеціалізованому флоті судів для міжконтинентальної торгівлі.

В даний час розроблено інноваційні конструкції танкерів для перевезення етану.

На верфі Jiangnan Shipyard у 2021 р. був спущений на воду перший у світі дуже великий етановий танкер (VLEC) типу В «GAS Bluebonnet». [4].

Двопаливне судно місткістю 99 000м³, перше з чотирьох найбільших коли-небудь введених в експлуатацію суден, призначене для перевезення етану на великі відстані, але також може перевозити інші вантажі зрідженого газу, такі як зріджений нафтовий газ та етилен. Корабель оснащений одним тихохідним дизельним двигуном MAN із уприскуванням газу під високим тиском у його версії ME-GIE, здатної працювати на етані, з тяговою потужністю близько 20 000 кВт. Також танкер має чотири допоміжні двигуни та систему селективного каталітичного відновлення для відповідності обмеженням викидів NOx Tier III.

Компанія Babcock LGE — світовий лідер у галузі систем обробки вантажів та подачі паливного газу для ринків зрідженого газу розробила інноваційні рішення, щоб змінити ринок етану, забезпечуючи значну економію експлуатаційних витрат у порівнянні з традиційними системами вантажно-розвантажувальних робіт на великих перевізниках етану (VLEC). Використовуючи існуючі технології у системах повторного зрідження BOG такі як: SuperCooler™, VentGasCooler (VGC™), та ecoETHN™ Babcock інтегрує

					КРМ.КТ.1.799-03.2.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		10

систему повторного зрідження із системою подачі паливного газу, забезпечуючи повторне зрідження збагаченого метаном BOG, який можна використовувати як паливо для головного двигуна та допоміжних генераторів енергії.

Як стверджує виробник, така система повторного зрідження забезпечує значне підвищення продуктивності етанових носіїв, у тому числі підвищену здатність до повторного зрідження, знижує викиди парникових газів, забезпечує судну значну економію експлуатаційних витрат, а завдяки меншій кількості годин роботи системи вантажно-розвантажувальних робіт також знижує частоту технічного обслуговування. [5].

Такі ствердження, опубліковані в рекламній продукції компанії Babcock LGE, є цікавими та актуальними для дослідження.

Обрана тема роботи є безумовно актуальною з погляду на перспективи розвитку морських перевезень і безпеки роботи танкерів-газовозів

					КРМ.КТ.1.799-03.2.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		11

Метою роботи є визначення характеристик окремих процесів установки повторного зрідження етану танкера-газовозу VLGC «GAS BLUEBONNET» на основі розвитку методів дослідження термодинамічної ефективності, аналізу та ходових випробувань. За результатами дослідження можна судити про перспективність впровадження технологій компанії Babcock LGE та високу енергетичну ефективність циклу.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

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

Об'єктом дослідження є установка повторного зрідження етану.

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 ентропійно-статистичний аналіз термодинамічної ефективності та розподілу витрат енергії в елементах каскадної установки повторного зрідження етану.

					КРМ.КТ.1.799-03.2.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		12

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.

Розроблена методика визначення величин незворотностей у циклі складної енергоперетворювальної установки ентропійно-статистичним методом є підставою для оцінки енергетичної ефективності каскадної установки повторного зрідження етану у реалізації практичних проектів. На конкретному прикладі показані можливості розрахунку розподілу витрат енергії на елементи установки з метою внесення коректив вже на стадії проектування

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 викладено на 69 сторінках, включаючи 10 рисунків, 3 таблиці, список інформаційних джерел 25 найменувань

					КРМ.КТ.1.799-03.2.3	лист
Змін.	лист	№ докум.	підпис	Дата		13