Міністерство освіти і науки України

Одеський національний технологічний університет

Кафедра кріогенної техніки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

На тему: «Аналіз процесів змішування LPG газів у танку та характеристик установки повторного зрідження на танкері-газовозі «LEGACY»»

Здобувача Щуцького О.М.

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 механікі
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

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

Щуцького Олексія Миколайовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз процесів змішування LPG газів у танку та характеристик установки повторного зрідження на танкері-газовозі «LEGACY»

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: Суднова установка повторного зрідження LPG газів. Експериментальні дані з запису моніторингу вантажних операцій під час змішування в режимі реального часу на судні-газовозі «LEGACY»

4. Перелік питань, які потрібно розробити:
Вступ. Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Опис запропонованої установки повторного зрідження BOG на газовозі LPG.
Вирішення «задачі уніфікації» для установки повторного зрідження.
Перевірний розрахунок пластинчастого вантажного конденсатора.
Термодинамічний аналіз процесів стиснення і конденсації компонентів які не змішуються методом заміни процесів із сумішами еквівалентними процесами з чистими компонентами.
Загальні висновки. Охорона праці. Економічні показники роботи.
Список використаних джерел.

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 _____ Щуцький О.М.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вивчення технічного завдання	5 днів	
2	Огляд і вивчення літератури	14днів	
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 _____ ОЛЕКСІЙ Щуцький
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Вікторія СОКОЛОВСЬКА-
(підпис) (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 Щуцький О.М. _____
(ПІБ) (підпис)

АНОТАЦІЯ

Напрямком дослідження є аналіз циклу установки повторного зрідження в умовах морського транспортування, яка працює на суміші пропану і бутану.

Для задоволення вимог фрахтувальників або інших осіб з комерційними інтересами з доставки певного вантажу з роздільних поставок пропану і бутану на борту судна часто відбувається змішування зрідженого нафтового газу до прибуття в територіальні води країни-одержувача.

Операція змішування може привести до утворення великої кількості «відпарного газу», який повинен контролюватися судновою установкою повторного зрідження газу.

У роботі використані експериментальні дані з запису моніторингу вантажних операцій під час змішування в режимі реального часу. За допомогою цих даних, використовуючи рівняння теорії суміші, були визначені основні параметри роботи установки повторного зрідження. Розв'язана задача уніфікації, для визначення оптимальної роботи установки. Проведено перевірочний розрахунок конденсатора при роботі на суміші газів. Проведено термодинамічний аналіз процесів стиснення і конденсації компонентів, які не змішуються методом заміни процесів із сумішами, еквівалентними процесами з чистими компонентами.

У результаті такого аналізу можна отримати практичні прогнози щодо надійності і безпеки експлуатації установки повторного зрідження, яка працює на сумішах.

Ключові слова: *суміші, зріджений газ, установка повторного зрідження, еквівалентний метод*

ABSTRACT

The direction of the research is the analysis of the cycle of re-liquefaction plant in the conditions of sea transportation, which works on a mixture of propane and butane.

To meet the requirements of charterers or other people with commercial interests for the delivery of certain cargo from separate supplies of propane and butane on board the vessel is often a mixture of liquefied petroleum gas before arriving in the territorial waters of the recipient country.

The mixing operation can lead to the formation of a large amount of boil of gas, which must be controlled by the ship's installation of re-liquefaction of gas.

The paper uses experimental data from the recording of monitoring of cargo operations during real-time mixing. With these data, using the equations of the theory of the mixture, the main parameters of the re-liquefaction plant were determined. The unification problem is solved to determine the optimal operation of the installation. A test calculation of the condenser when working on a mixture of gases was conducted. A thermodynamic analysis of the processes of compression and condensation of components that do not mix by the method of replacing processes with mixtures equivalent to processes with pure components, was held.

As a result of such analysis, it is possible to receive practical forecasts on reliability and safety of operation of the re-liquefaction installation working on mixtures.

Key words: *mixtures, liquefied gas, re-liquefaction plant, equivalent method.*

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 запропонованої установки повторного зрідження BOG на газовозі LPG 20
2.2 Визначення параметрів процесу змішування пропану та бутану в танках 23
2.3 Розрахунки характеристик установки повторного зрідження яка працює на суміші пропану и бутану 29
2.3.1 Вирішення «задачі уніфікації» для установки повторного зрідження 29
2.3.2 Перевірний розрахунок пластинчастого вантажного конденсатора 40
2.4 Термодинамічний аналіз процесів стиснення і конденсації компонентів які не змішуються методом заміни процесів із сумішами еквівалентними процесами з чистими компонентами 45
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 53
ОХОРОНА ПРАЦІ 55
ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ РОБОТИ 62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 67

ВСТУП

Актуальність теми

Світовий попит на енергію швидко зростає через зростання населення та економічного зростання, особливо в країнах з ринковою економікою. Поряд з ростом добробуту попит створює нові проблеми. Традиційна залежність від викопного палива призводить до того, що економіка багатьох країн світу обмежується нестачею енергії.

Отже, такі країни повинні диверсифікувати свої енергетичні ресурси і використовувати всі наявні в розпорядженні варіанти. Диверсифікація енергетики має вирішальне значення, коли мова йде про невелику кількість традиційних запасів енергоресурсів, а також доповнює глобальні прагнення до екологізації шляхом переходу від використання невідновлюваних енергоресурсів до ширшого використання відновлюваних джерел енергії.

Одним із способів проведення політики диверсифікації енергетики для таких країн є впровадження зріджених газів енергетичних ресурсів в енергетичному секторі цих країн. У формі імпортованого зрідженого газу. Альтернативні види палива в формі зріджених газів можуть доповнювати існуючі енергетичні ресурси забезпечуючи достатнє і стійке енергопостачання цих країн.

Поставка газів в такому стані більш вигідна, так як перевезення відповідних обсягів стислих газів вимагає великих матеріальних витрат [1]. Це пов'язано з тим, що обсяг газу при зріджуванні зменшується. Зріджений газ (в рідкому вигляді) займає приблизно 1/250 свого початкового обсягу, що створює передумови для поставки його споживачам всіма видами транспорту.

Значний енергетичний потенціал мають зріджені вуглеводневі гази (LPG).

Динамічний глобальний ланцюжок поставок зрідженого нафтового газу (також відомого як пропан, бутан або автомобільний газ) дозволяє споживачам не підключеним до газової мережі отримувати чистий, універсальний та ефективний газ. Роль зрідженого нафтового газу важлива та різноманітна. На

зрілих ринках зріджений нафтовий газ пропонує рішення як чистішу альтернативу викопного палива високовуглецевим газам для опалення та транспорту, яке також є універсальним і економічно ефективним.

Роль цього універсального палива не обмежена у часі. Ланцюжок постачання зрідженого нафтового газу сповнений інновацій, що робить інвестиції в неї довгостроковим стратегічним вибором, а не тимчасовим компромісом [2].

Досягнення глобальних енергетичних та екологічних цілей потребує масштабованих низьковуглецевих рішень для транспорту, енергетики та опалення.

Обсяг світового ринку зрідженого нафтового газу (LPG) оцінювався в 250518,8 млн. доларів США в 2023 році, і очікується, що при середньорічному темпі зростання 7,21%. протягом прогнозованого періоду, досягнувши 380363,54 млн. доларів США до 2031 року [3].

Властивості вуглецевих газів (теплотехнічні, екологічні та економічні) перетворюють їх в ідеальний продукт для енергопостачання в новому світі. Газ, в порівнянні з іншими видами органічного палива, найбільшою мірою екологічно чистий вид, тому що сукупне виділення забруднюючих речовин на одиницю корисного застосування енергії в газі набагато нижче, ніж у інших видах палива.

У зв'язку з цим, вуглецеві гази не тільки заповнюють помітну частину потреб в потужності і хімічній сировині, а й постають як потужний фактор технічних результатів і соціального розвитку суспільства.

Головною властивістю таких газів є те, що їх можна стискати до рідкого стану і транспортувати.

Основним способом транспортування зріджених газів від місця видобутку або виробництва до місця споживання є їх доставка морем спеціалізованими танкерами-газовозами.

Танкери-газовози для зріджених LPG газів будуються різних типів у залежності від тиску та температури вантажів, які суднові системи можуть

підтримувати у вантажних танках в процесі транспортування: судна напірного типу, без охолодження вантажу (fully pressurized gas carrier), напів напірного типу з частковим охолодженням вантажу (semi-refrigerated gas carrier), або як судна рефрижераторного типу, з повним охолодженням вантажу (fully refrigerated carrier).

Ці суда є найбільш дорогими через високий ступінь технічної оснащеності і енергоспоживання установками повторного зрідження, призначеними для підтримки необхідної температури і тиску вантажу, а також зростаючих вимог до безпеки перевезень, включно життя і здоров'я екіпажу, захист навколишнього середовища і збереження самого вантажу і судна.

За цих умов важливо забезпечити високу енергетичну ефективність установки повторного зрідження газу на всіх етапах від проектування до експлуатації. Одним з найважливіших факторів при виконанні цього завдання є вибір і підтримка найбільш раціонального режиму експлуатації установки на судах-газовозах через їх універсальність, зумовленої необхідністю перевезення зріджених газів з різними теплофізичними властивостями.

Найбільш поширеними вантажами LPG є пропан (C_3H_8) і бутан (C_4H_{10}).

Умови транспортування LPG можуть змінюватись в залежності від вимог замовника та теплофізичних властивостей вантажу.

Фрахтувальники чи особи з комерційними інтересами все частіше вимагають від судновласників змішувати зріджений нафтовий газ до прибуття до територіальних вод країни-отримувача. При цьому змішування компонентів згідно з вимогами Міжнародної морської організації (ІМО) може здійснюватися при завантаженні або розвантаженні або в самих танках на судні при транспортуванні [4].

Найбільші проблеми виникають при змішуванні газів на самому судні (під час переходу), особливо якщо судно є рефрижераторного типу та гази охолоджені до атмосферного тиску. Ці обставини в значній мірі ускладнюють вирішення поставленого завдання.

Операція змішування може привести до утворення великої кількості «миттєвого газу», який повинен контролюватися судновою установкою повторного зрідження, в іншому випадку може виникнути неконтрольоване скидання через запобіжні клапани вантажних танків. Ясно, що швидкість змішування необхідно ретельно контролювати, щоб вона перебувала в межах можливостей установки повторного зрідження.

Виходячи з вищевикладеного стає актуальним дослідження параметрів сумішей зріджених нафтових газів і характеристик установки повторного зрідження на судні-газовозі.

Такі дослідження дозволять визначити вплив кожного компонента суміші на роботу установки повторного зрідження в процесі експлуатації, що забезпечить безпеку і ефективність транспортування вантажу морем.

Обрана тема роботи є безумовно актуальною з точки зору перспектив розвитку морських перевезень і безпеки роботи суден-газовозів.

Метою роботи є дослідження параметрів суміші газів (пропану і бутану) і встановлення раціонального режиму роботи установки повторного зрідження типового судна-газовоза LPG під час змішування пропану і бутану в танках, що дозволить забезпечити безпечну роботу і високу експлуатаційну надійність установки повторного зрідження.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

– отримати математичні залежності основних термодинамічних і теплофізичних параметрів вантажу (суміші пропану і бутану) після змішування;

– виконати енергетичний аналіз циклу установки повторного зрідження, що працює на суміші і вирішити задачу «уніфікації» двоступеневої установки повторного зрідження;

– розглянути характеристики основних процесів установки повторного зрідження: стиснення в компресорі і процес конденсації на багатокомпонентних сумішах вуглеводів шляхом заміни процесів на сумішах еквівалентними процесами чистих компанентів;

– проаналізувати отримані результати аналізу.

Об'єктом дослідження є установка повторного зрідження нафтових газів.

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

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

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.

Результати аналізу допоможуть створити зрозумілу розрахункову базу для операторів суден-газовозів та забезпечать додатковий контроль за роботою установки повторного зрідження газу.

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 запровадження, двох глав, укладання, списку використаної літератури. Зміст роботи викладно на 69 сторінках, включаючи 10 рисунків, 13 таблиць, список інформаційних джерел 27 найменувань.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Зріджені вуглецеві гази отримали широке застосування в багатьох країнах світу, для потреб промисловості, житлового та комунально-побутового сектора, нафтохімічних виробництв, а також в якості автомобільного палива та як альтернативного видіу судового палива [5].

З огляду на фізико-хімічні характеристики насичених вуглеводів, їх застосування багато в чому залежить від кліматичних умов.

Зріджений бутан в чистому вигляді не буде працювати при негативних температурах. Тоді як застосування чистого пропану протипоказано в умовах жаркого клімату, оскільки висока температура викликає надмірне підвищення тиску в газовому резервуарі.

Так як для кожного регіону недоцільно проводити окрему марку газу, з метою уніфікації передбачена суміш з певним змістом двох компонентів в рамках встановлених норм. Наприклад: максимальний вміст бутану в даній суміші не повинен перевищувати 60%, для північних регіонів і в зимову пору року частка пропану повинна бути не менше 75%.

Вартість пропану-бутану залежить від вмісту в ньому першого (більш дорогого) компонента.

Морське комерційне транспортування зрідженого вуглецевого газу (LPG), почалося в 1960-х роках і з кожним роком розширюється.

Перший спеціально побудований, рефрижераторний танкер під повним тиском для зрідженого нафтового газу був побудований японською верф'ю за проектом США в 1962 році [6].

У процесі транспортування зріджені гази випаровуються, що призводить до підвищення тиску в вантажних танках і утворення пари. Для утримання тиску і температури в танках в межах встановлених норм, виникає необхідність

прибрати з танка пари газу, що утворилися при його кипінні, шляхом їх конденсації і повернення назад в танк. Такий процес здійснюється установкою повторного зрідження газу - reliquefaction plant [7].

Установки повторного зрідження є елементом складної технічної системи енергетичного комплексу судна. Наслідком відмови цього елемента зрідження, буде неконтрольоване підвищення тиску в вантажних танках, що викликає спрацьовування запобіжних клапанів і втрату частини вантажу, а в деяких випадках - руйнування танка.

Експлуатація установки повторного зрідження повинна здійснюватися дуже відповідально, без відхилень від інструкцій, покликаних дотримуватися технології транспортування. Крім того, встановлена потужність вимагає значних витрат палива на її експлуатацію.

Підвищення ефективності та надійності установки повторного зрідження можна забезпечити за рахунок вибору оптимального режиму її роботи.

Дослідження процесів у системах повторного зрідження газу опубліковано науковими групами різних країн.

У дослідженні [8] представлена установка повторного зрідження судна LPG потужністю 20 т/добу. Установка забезпечує повторне зрідження на судні, яке транспортує як зріджені вуглеводневі гази (пропан, бутан), так і кріогенні рідини (етилен, етан та метан). Установка працює за каскадним циклом. Було розроблено випробуваний та проаналізований експериментальний стенд такої установки. Аналіз установки проведено ексергетичним методом. Теоретичний аналіз установки показав, що питоме енергоспоживання становить 0,49 кВтг/кг LPG, що відповідає ексергетичній ефективності 34%.

У роботі [9] представлені результати аналізу установки повторного зрідження бутану з метою оцінки можливої швидкості завантаження. Наведено порівняння теоретичних досліджень, що ґрунтуються на наявній документації, з практичним ефектом, отриманим у порту. У ході дослідження також було оцінено ефективність роботи установки повторного зрідження відповідно до

інструкцій судна та встановлено, чи ця ефективність є максимально можливою в даних умовах.

Методика вибору схеми та циклу установки повторного зрідження газу для танкера-газовозу рефрижераторного типу LPG залежно від типу транспортованого вантажу та параметрів його роботи наведена в роботі [10]. Пропонована система працює в режимі одноступеневого стиснення при транспортуванні високотемпературних зріджених газів та в режимі двоступеневого стиснення при транспортуванні низькотемпературних зріджених газів.

Автори роботи [11] запропонували проект з оптимізації процесів повторного зрідження для систем транспортування етилену. Визначено ексергетичні втрати у кожному компоненті установки повторного зрідження та ефективність використання наявної енергії. Оптимізація призвела до збільшення ексергетичного ККД як за рахунок зниження споживання холодоагенту, так і морської води в системі. Про подібне дослідження з тією ж метою та аналогічними результатами повідомили автори роботи [12].

У роботі [13] представлено чисельне моделювання установки повторного зрідження етилену. Імітаційна модель була розроблена з використанням основних уявлень термодинаміки, теплопередачі та теплофізичних властивостей робочих тіл. Отримано тонку збіжність передбачуваних термодинамічних параметрів у кожному стані системи та експлуатаційних даних.

Результати дослідження установки щодо зрідження етилену, засновані на детальних експериментальних даних, були представлені в роботі [14]. Проведено аналіз роботи установки повторного зрідження з великою кількістю можливих холодоагентів. Результатом є термодинамічна модель, що дозволяє швидко оцінити та порівняти різні холодоагенти. У роботі [15] проаналізовано різні способи повторного зрідження BOG на борту танкерів LNG, виходячи з економічних критеріїв та енергетичної ефективності. Були описані, проаналізовані та обговорені різні технології зрідження. Це дозволило виділити

технологічні та експлуатаційні характеристики, а також критерії вибору установки повторного стискування газу. Проведено порівняння різних установок щодо повторного зрідження газу на основі їх продуктивності та ефективності, а також інших технічних даних. У роботі [16] проведено аналіз існуючих досліджень, присвячених резервуарам для зберігання зрідженого нафтового газу (LPG), з метою оцінки утворення відпарного газу (BOG) та управління ним. Зроблено висновок, що швидкість утворення відпарного газу (зміна температури та тиску) є головним фактором безпеки та економічної оцінки резервуарів для зберігання зрідженого нафтового газу.

У роботі [17] проведено дослідження установки повторного зрідження реального танкера-газовозу «Chinagas Legend». Танкер транспортує зріджені нафтові гази. Тематичне дослідження було проведено шляхом спостереження за умовами експлуатації судна. Результати дослідження показали проблеми, які уповільнювали процес зрідження і робили його неефективним. До таких проблем відносяться: наявність домішок, що переносяться морською водою та засмічують фільтри, а також витік у всмоктувальному та нагнітальному клапані вантажного компресора. Ці проблеми можна вирішити шляхом періодичних планових перевірок компонентів.

У роботі [18] наведено огляд поточних програм технічного обслуговування та підходів до зменшення часу простою основних компонентів установки повторного зрідження LPG. На прикладі сучасної системи повторного зрідження LPG пояснюється значення сучасних методів застосовуваних на сьогоднішній день у практиці судноплавства, показано, що суднові компанії дотримуються консервативних підходів (календарного обслуговування), хоча сучасні системи вимагають постійного контролю та запобігання простою обладнання.

Автори роботи [19] проаналізували установку повторного зрідження відпарного газу (BOG), що мінімізує втрати метану на малотоннажних танкерах LNG. В установці використовувалася газова турбіна замкнутого циклу з азотом як робоча речовина. У дослідженні розглянуто два цикли, один з яких працює

без стиснення BOG за рахунок внутрішньої регенерації. Другий цикл реалізується з попереднім підігрівом BOG та подальшим стисненням у компресорі при температурах, близьких до навколишнього середовища. Термодинамічний аналіз забезпечив концептуальне розуміння ключових робочих змінних, що впливають на продуктивність процесу повторного зрідження відпарного газу BOG

Дослідники [20] запропонували нову систему повторного зрідження BOG для танкерів LNG. Два каскадні цикли зі змішаним холодоагентом (або подвійні цикли зі змішаним холодоагентом, DMR) використовуються для забезпечення охолоджувальної здатності при повторному зрідженні BOG. Енергетична ефективність нової системи оцінена на основі ексергетичного методу термодинамічного аналізу для стаціонарного моделювання Aspen HYSYS. Всі зміни робочих параметрів, що впливають на продуктивність системи, пропонується враховувати під час динамічного моделювання системи.

Огляд вищезазначених досліджень показав, що дослідники приділяють особливу увагу системам транспортування LNG, вважаючи найбільш затребуваними. Дуже мало робіт направлено на дослідження установок повторного зрідження нафтового газу.

Для задоволення вимог чартеру з доставки певного вантажу з роздільних поставок пропану і бутану на борту судна часто відбувається змішування зрідженого нафтового газу до прибуття в територіальні води країни-одержувача.

Згідно з вимогами IMO [4] гази можна змішувати:

1) під час завантаження;

2) під час вивантаження;

3) в танку (танки завантажені не повністю і змішуються під час переходу).

Найбільш важливі фактори, які слід враховувати - це час, необхідний для різних операцій.

Перемішування під час завантаження може дозволити перевозити повний вантаж, але означає, що специфікація суміші повинна бути визначена

заздалегідь, і процес змішування знизить швидкість завантаження, що досягається через надлишок енергії суміші в порівнянні з окремими компонентами.

При змішуванні під час розвантаження обидва продукти будуть перебувати під тиском вантажних насосів, тому вони будуть перебувати під тиском вище насичення, і, отже, «миттєвий газ» буде зменшуватися природним чином [21].

При змішуванні пропану і бутану в вантажних танках, по крайній мірі, один танк повинен бути заповнений тільки частково в порту відвантаження. Це може викликати проблеми з остійністю та напругою для судна при відході через те, що один танк "провисає". По крайній мірі, два резервуари будуть провисати після початку операції, що означає, що ефективний центр ваги судна підвищується за рахунок «ефекту вільної поверхні» і, відповідно, знижується остійність судна. Крім того, частково заповнений резервуар може вплинути на сили зсуву і згинальні моменти судна, а також на зміну розподілу в міру того, як відбувається операція змішування.

Через те, що судно рухається по морському шляху, зазвичай важко точно розрахувати рівні вантажних танків і, отже, кількості. Таким чином, через цю невизначеність збільшується ризик переповнення при змішуванні в морі.

Усереднення температур під час змішування викликає утворення пари, оскільки температура насичення пропану вище температури точки насичення атмосферного тиску.

Якщо до бутану додати пропан, буде утворюватися більше газу миттєвого випаровування, ніж навпаки.

Однак, якщо бутан доданий до пропану, утворюється менше газу миттєвого випаровування (що може забезпечити більш високу швидкість завантаження). Однак будь-які проблеми з тиском можуть бути не відразу очевидні і можуть через короткий період часу привести до раптового швидкого збільшення миттєвого викиду газу і, тиску в вантажному танку. Щоб запобігти розшаруванню між важчим бутаном і пропаном, можливо, буде потрібно

забезпечити циркуляцію вантажу за допомогою суднових насосів незабаром після змішування.

Будь-які проблеми з тиском негайно виявляться, і тому ті, хто проводить операцію, повинні мати можливість регулювати швидкість змішування, щоб контролювати це. Додавання «легшого» пропану до нижньої частини «тяжчого» бутану сприятиме перемішування суміші через природні тенденції пропану підніматися. Слід враховувати ризик теплового удару для поверхонь резервуара, так як при додаванні пропану може виникнути швидке охолодження. Якщо до пропану додають бутан, потрібна велика обережність. Тиск і температура в резервуарі повинні контролюватися всюди, а запас міцності по відношенню до тиску в резервуарі повинен підтримуватися в ході операції.

Обидва перерахованих вище варіанти широко використовуються, проте, кожен варіант має свої специфічні недоліки.

Єдиним способом контролю тиску парів вантажу на суднах-газовозах рефрижераторного типу є застосування установки повторного зрідження.

Таким чином важливо забезпечити високу ефективність установки повторного зрідження газу під час експлуатації.

Відсутність робіт з дослідження систем повторного зрідження нафтового газу в процесі змішування газів у вантажних танках, а також реальний моніторинг таких систем створюють хороші можливості для наукових досліджень. Зазначена вище інформація підтверджує актуальність теоретичного дослідження процесів перемішування вантажів у танку на основі наявних експериментальних даних реальних газовозів із залученням наукових інструментів для вивчення цих процесів.

Таке дослідження допоможе забезпечити безпечну та ефективну роботу установки повторного зрідження, що дозволить отримати бажаний фінансовий ефект судновласнику без втрат.

РОЗДІЛ 2
ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

2.1 Опис запропонованої установки повторного зрідження BOG на газовозі LPG

У роботі проводиться аналіз реальної суднової установки повторного зрідження LPG танкера-газовозу «LEGACY» [22].

За способом перевезення вантажу судно відноситься до рефрижераторного типу (з повним охолодженням вантажу при атмосферному тиску) Fully refrigerated carrier – LPG танкер. Конструкція вантажних танків передбачає транспортування зріджених газів, коли тиск насиченої пари в танках близький до атмосферного, максимум на 0,3 бар вище атмосферного.

Система утримання вантажу складається з трьох вантажних танків з ізоляцією. Танки поміщені у внутрішній корпус і розташовані на одній лінії від носа до корми. За конструкцією вони являють собою незалежні призматичні танки типу "A" [23].

Установки з повторного зрідження розташовуються в відділенні на верхній палубі. Є компресорне відділення, де розташовуються компресора, основне і допоміжне обладнання, також є електромоторне відділення з усім електронним обладнанням. На судні є три однакові установки повторного зрідження вантажу.

Технологічна схема установки повторного зрідження представлена на рис.2.1.

Основними елементами установки повторного зрідження газів є: двоступеневий крейцкопфний вантажний компресор фірми «Burckhardt Compression», марки: 2K160-2F_1 [24], пластинчастий конденсатор, що охолоджується забороною водою, лінійний ресивер, проміжна посудина, відокремлювач рідини і система запірної і дросельної арматури.

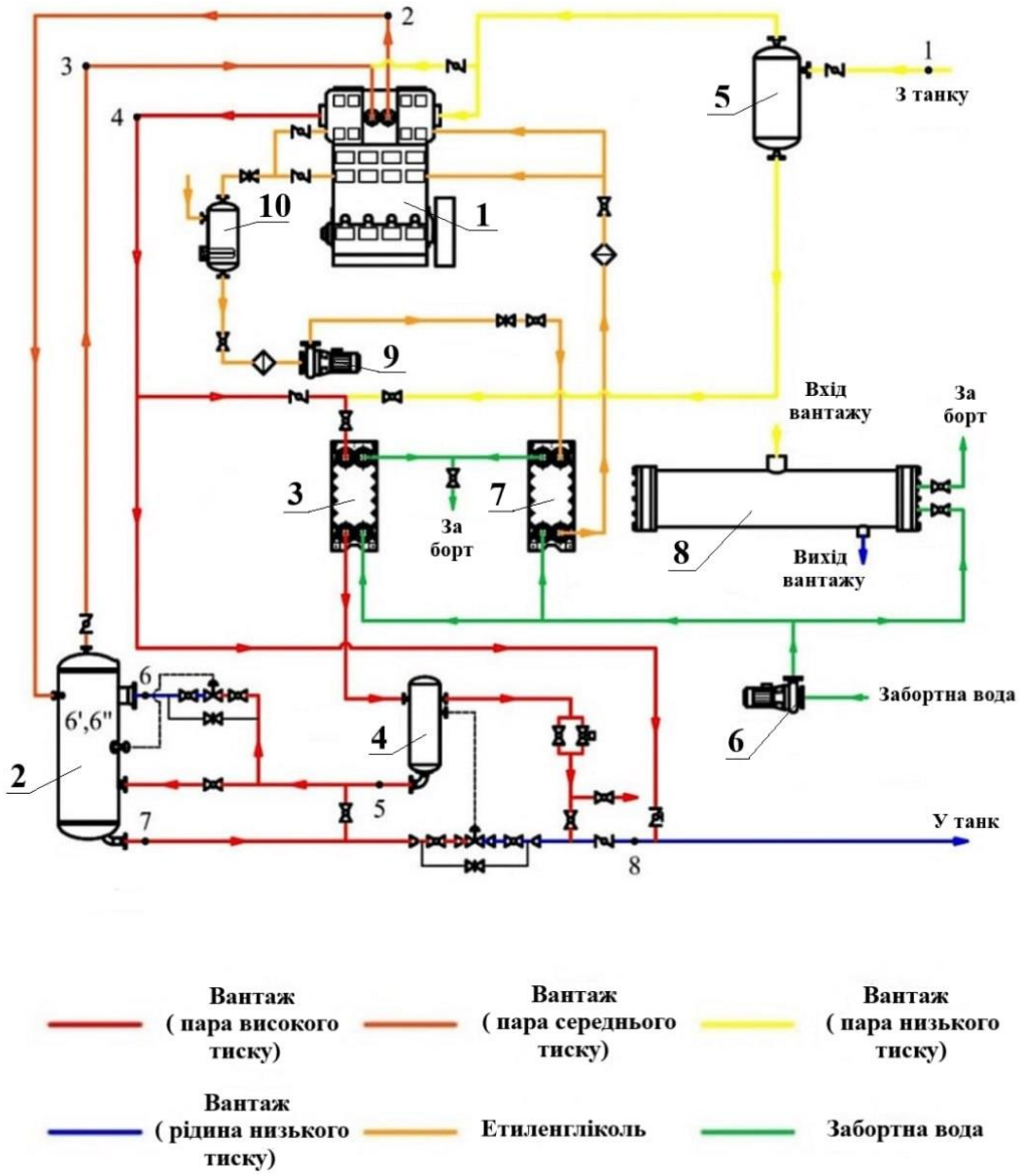

Рисунок.2.1 – Технологічна схема дійсної установки повторного зрідження судна «LEGACY»

1–компресор; 2 – проміжна посудина; 3 – пластинчастий конденсатор;

4–лінійний ресивер; 5–відокремлювач рідини; 6–водяний насос;

7– пластинчастий теплообмінник (вода/ етиленгліколь);

8– випарник-нагрівач вантажу; 9– насос для етиленгліколю;

10– бак акумулятор етиленгліколю.

Під час завантаження на борт судна подається окремо пропан і бутан.

У танку №2 перевозять зріджений пропан при температурі -40,1°С, а в танках №1, №3 перевозять зріджений бутан при температурі -4,7°С (рис.2.2).

Для захоложування пропану установка працює за циклом двоступеневого стиснення з неповним проміжним охолодженням і змійовиком в проміжний посудині, причому дві установки працюють паралельно. Бутан захолоджуся однією установкою, яка працює за циклом двоступеневого стиснення без проміжного охолодження (або з проміжним).

Вся вантажна лінія знаходиться на палубі. У момент завантаження зріджений газ подається через маніфолд по рідинної лінії в вантажний танк.

Відповідно до вимог фрахтувальника дуже часто доводиться змішувати пропан і бутан на борту в танках під час переходу.

Така операція проводиться наступним чином (рис.2.2). Максимальне завантаження танків можлива на 98%. Перший танк завантажений не повністю. З танка №2 (C_3H_8) вантаж перекидається на дно танка №1 (C_4H_9) до 95%. За рахунок того, що (C_3H_8) є легкокиплячим компонентом він підіймається на верх, тим самим утворюючи суміш. Далі з танка №3 (C_4H_9) вантаж перекидаємо в танк №2.

Операція змішування продовжується доти, доки параметри суміші не вирівняються у всіх трьох танках, які контролюються за температурою суміші. Пропан подається в нижню частину танка, а бутан – у верхню, що пов'язано з теплофізичними властивостями цих газів [25].

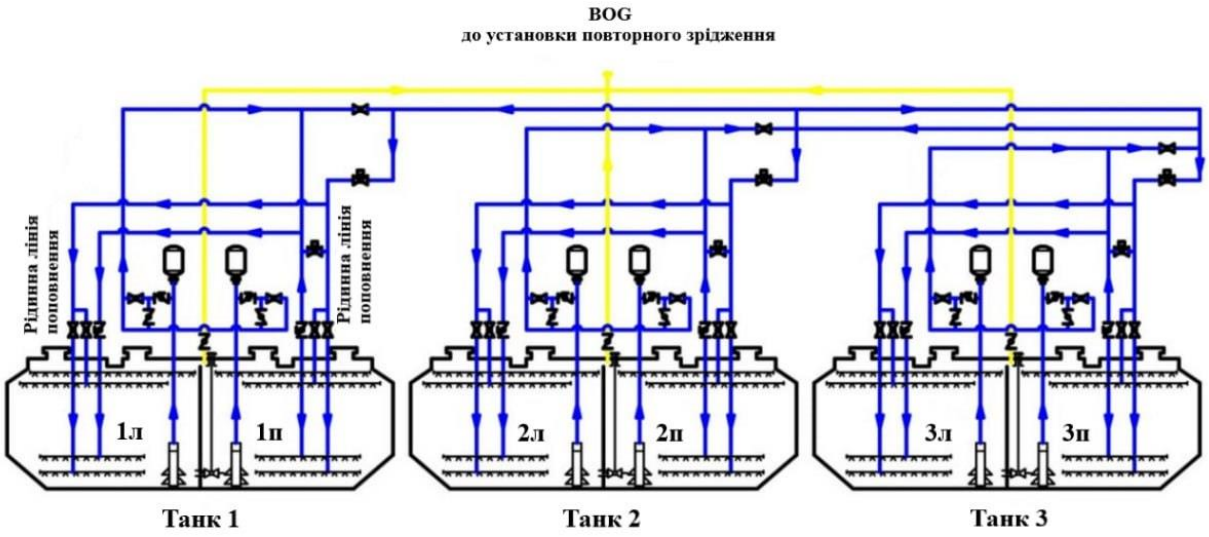

Рисунок.2.2 – Технологічна схема операції змішування пропану та бутану в танках

2.2 Визначення параметрів процесу змішування пропану та бутану в танках.

Усі характеристики суміші у реальних умовах експлуатації визначено з використанням даних моніторингу вантажних операцій (скриншоти на рис.2. 3-2.4). Параметри газу перед процесом змішування представлені у таблиці 2.1. Вага вантажу до змішування представлена у таблиці 2.2. Слід зазначити, що конструктивно ємність танка розділена вертикальною непроникною перегородкою на два відсіки (лівий і правий борт), які з'єднані між собою отворами в куполі (рис. 2.2).

1	Vessel	LPG/C LEGACY	Port	PROPANE(51%) – BUTANE(49%)	Voyage No.	034–31	Rep. No.	1

3	Date and Time			Tank 1P				Tank 1S				Tank 2P				Tank 2S				Tank 3P				Tank 3S				
4				P	Temp			p	Temp			P	Temp			P	Temp			P	Temp			P	Temp			
5	D	M	H	(bar)	T	M	B	(bar)	T	M	B	(bar)	T	M	B	(bar)	T	M	B	(bar)	T	M	B	(bar)	T	M	B	
6	29	10	19:00	0,07	5,0	–2.7	–2.9	0,07	5,0	–2.8	–2.8	0,06	–41.1	–41.7	41,5	0,06	–41.0	–41.6	–41.6	0,09	5,5	–2.4	–1.8	0,09	5,3	–2.3	–2.1	START FROM TANK"2" to TANK"1"
7	29	10	20:00	0,26	4,7	–5.6	–3.2	0,26	4,9	–6.1	–3.2																	
8	29	10	20:35	0,33	4,2	–7.1	–5.9	0,33	4,1	–8.1	–6.5	0,12	–39.6	–41.6	–41.1	0,12	–40.1	–41.6	–37.6									PAUSE
9	29	10	22:30									0,17	–37.5	–41.2	–40.8	0,17	–37.8	–41.4	–31.0	0,18	5,7	–2.7	–2.5	0,18	5,7	–2.5	–2.7	START FROM TANK"2" to TANK"3"
10	29	10	23:00																	0,22	5,6	–4.4	–2.5	0,22	5,5	–4.5	–2.7	
11	29	10	23:45									0,21	–35.4	–41.2	–40.9	0,21	–35.2	–41.1	–30.1	0,31	5,6	–6.4	–2.5	0,31	3,2	–6.8	–2.7	PAUSE
12	30	10	3:10	0,24	–3.9	–9.7	–9.6	0,24	–4.0	–10.7	–10.4	0,21	–33.2	–41.0	–33.7	0,21	–33.7	–40.9	–30.5									CONTINUE FROM TANK"2" to TANK"1"
13	30	10	4:00	0,30	–4.2	–11.1	–11.0	0,30	–4.2	–12.1	–11.6																	
14	30	10	4:30	0,32	–4.3	–11.5	–11.3	0,32	–4.2	–12.5	–12.1	0,22	–33.4	–41.0	–41.0	0,22	–33.9	–40.7	–39.6									PAUSE
15	30	10	14:00	0,23	–13.6	–14.0	–14.0	0,23	–13.5	–14.6	–14.4	0,20	–34.8	–40.0	–39.9	0,20	–34.7	–39.9	–40.0									CONTINUE FROM TANK"2" to TANK"1"
16	30	10	15:00	0,27	–14.3	–15.8	–15.7	0,27	–14.4	–16.7	–16.2																	
17	30	10	15:40	0,30	–16.8	–16.6	–16.6	0,30	–16.9	–17.4	–17.2	0,20	–35.3	–40.0	–39.9	0,20	–35.4	–39.8	–39.9	0,24	–5.4	–7.9	–7.3	0,24	–6.5	–8.5	–8.1	FINISH to TANK"1" CONTINUE to TANK"3"
18	30	10	17:00									0,21	–34.8	–39.9	–39.8	0,21	–34.9	–39.7	–39.8	0,32	–5.5	–10.3	–9.5	0,32	–7.1	–10.6	–10.2	PAUSE
19	30	10	22:20									0,22	–32.5	–39.5	–39.3	0,22	–32.4	–39.3	–39.4	0,28	–8.7	–11.2	–10.4	0,28	–9.1	–11.5	–11.0	CONTINUE FROM TANK"2" to TANK"3"
20	30	10	23:00																	0,33	–8.7	–12.4	–11.5	0,33	–9.2	–12.9	–12.4	
21	30	10	23:20									0,22	–32.6	–39.4	–39.3	0,22	–32.7	–39.3	–39.4	0,34	–8.7	–12.6	–11.8	0,34	–9.2	–13.1	–12.6	PAUSE
22	31	10	9:20									0,22	–31.9	–39.3	–39.1	0,22	–31.9	–39.1	–39.2	0,26	–12.9	–14.2	–13.3	0,26	–13.1	–14.5	–14.1	CONTINUE FROM TANK"2" to TANK"3"
23	31	10	10:00																	0,30	–12.9	–15.4	–14.8	0,30	–13.2	–15.7	–15.4	
24	31	10	11:00									0,22	–32.2	–39.3	–39.2	0,22	–32.4	–39.2	–29.3	0,35	–13.7	–17.1	–16.5	0,35	–13.8	–16.9	–16.5	PAUSE
25	31	10	19:20									0,22	–30.5	–39.2	–39.0	0,22	–30.3	–39.0	–39.1	0,29	–18.0	–18.5	–18.0	0,29	–17.3	–18.1	–17.8	CONTINUE FROM TANK"2" to TANK"3"
26	31	10	20:00																	0,31	–18.0	–19.0	–18.4	0,31	–17.4	–18.7	–18.4	
27	31	10	21:00																	0,32	–18.6	–19.6	–19.0	0,32	–18.1	–19.6	–19.1	
28	31	10	21:40									0,22	–30.6	–38.7	–39.1	0,22	–30.6	–38.6	–39.1	0,33	–20.6	–20.3	–19.2	0,33	–20.3	–20.1	–19.9	FINISH FROM TANK"2" to TANK"3"
29	31	10	22:40									0,23	–30.5	–38.7	–38.5	0,23	–30.4	–38.6	–38.2	0,31	–20.5	–20.5	–19.7	0,31	–20.5	–2.4	–20.1	START FROM TANK"3" to TANK"2"
30	31	10	0:00									0,26	–30.3	–38.1	–30.7	0,26	–30.4	–38.2	–30.0									
31	1	11	1:00									0,27	–30.3	–37.1	–28.7	0,27	–30.4	–37.4	–27.9									
32	1	11	3:00	0,26	–19.3	–19.2	–19.4	0,26	–19.3	–19.6	–19.6	0,29	–30.6	–35.0	–29.6	0,29	–30.6	–36.0	–28.2									TANK"3" to TANK"2" / START FROM TANK"
33	1	11	4:00	0,26	–19.0	–19.2	–19.4	0,26	–19.0	–19.7	–19.7	0,31	–30.9	–33.7	–27.2	0,31	–30.9	–34.8	–25.8									PAUSE
34	1	11	14:30	0,25	–18.6	–19.2	–19.4	0,25	–18.5	–19.6	–19.6	0,30	–29.6	–32.2	–31.9	0,30	–30.1	–32.7	–32.3									CONTINUE FROM TANK"1" to TANK"2"
35	1	11	15:00									0,30	–29.8	–32.8	–29.6	0,30	–30.2	–32.6	–29.7									
36	1	11	17:00									0,29	–29.9	–33.0	–23.7	0,29	–30.4	–32.9	–24.3									
37	1	11	18:00																									

Рисунок.2.3 – Записи моніторингу вантажних операцій (температура вантажу) в режимі реального часу

1	CARGO OPERATION MONITORING RECORDS														
2	Vessel	LPG/C LEGACY		Port	PROPANE(51%) – BUTANE(49%)			Voyage No.		034–31		Rep. No.		1	
3															
4	Date and Time			Tank 1P		Tank 1S		Tank 2P		Tank 2S		Tank 3P		Tank 3S	
5				sound.	Total weight	sound.	Total weight	sound.	Total weight	sound.	Total weight	sound.	Total weight	sound.	Total weight
6	D	M	H	m	M/T	m	M/T	m	M/T	m	M/T	m	M/T	m	M/T
7	29	10	19:00	9,58	1986,74	9,74	1962,33	13,11	3911,81	13,11	3905,14	8,67	1956,33	8,70	1963,76
8	29	10	20:00					12,34	3737,79	12,22	3701,71				
9	29	10	20:35	11,39	2337,78	11,42	2348,03	11,76	3606,58	11,75	3594,86				
10	29	10	22:30					11,83	3623,84	11,84	3592,46	8,71	1966,29	8,68	1963,09
11	29	10	23:00					11,51	3532,90	11,48	3493,63				
12	29	10	23:45					11,16	3424,99	11,14	3383,08	9,64	2198,55	9,71	2218,11
13	30	10	3:10	11,39	2348,63	11,34	2342,60	11,18	3407,69	11,18	3397,11				
14	30	10	4:00					10,76	3298,25	10,77	3297,17				
15	30	10	4:30	12,20	2530,31	12,15	2524,35	10,61	3251,76	10,61	3248,89				
16	30	10	14:00	12,20	2542,22	12,15	2535,84	10,71	3276,69	10,70	3277,54				
17	30	10	15:00					9,98	3047,35	9,95	3039,87				
18	30	10	15:40	14,00	2885,50	14,07	2860,75	9,63	2940,35	9,58	2925,06	9,49	2172,796	9,55	2191,222
19	30	10	17:00					9,09	2768,54	9,02	2747,07	10,24	2362,247	10,24	2388,906
20	30	10	22:20					9,09	2767,09	9,06	2758,28	10,20	2357,544	10,28	2381,607

Рисунок.2.4 – Записи моніторингу вантажних операцій (вага вантажу) в режимі реального часу

Використовуючи дані моніторингу вантажних операцій визначимо параметри газів до моменту процесу змішування (табл.2.2)

Таблиця 2.1 – Параметри газів до моменту процесу змішування

№ танку	Температура, t (℃)	Тиск Р(бар)
1 (C_4H_{10})	-4,7	1,01
2 (C_3H_8)	-40,1	1,01
3 (C_4H_{10})	-4,7	1,01

Таблиця 2.2 – Параметри газів до моменту процесу змішування

Назва	Танк 1 лівий	Танк 1 правий	Танк 2 лівий	Танк 2 правий	Танк 3 лівий	Танк 3 правий
Загальна вага вантажу, m, М/Т	1967	1972	3956	3964	1959	1981
$\sum m$,кг	3939000		7920000		3940000	

Сумарна маса вантажу у всіх трьох танках:

$$\sum m_{ван}^{mix} = 7920000 + 3939000 + 3940000 = 15799000 \text{ кг}$$

Визначимо максимальну кількість вантажу при заданій температурі, яке може вмістити кожен танк:

$$m_{ван}^{max} = V_m \cdot \rho_{ван}, \quad (2.1)$$

де

V_m – об'єм танка, м^3; $\rho_{ван}$ – густина вантажу при відповідній температурі, (кг/м^3).

Маса вантажу танка №1:

$$m_{C_4H_{10}}^{max} = V_m^1 \cdot \rho_{C_4H_{10}} = 9700 \cdot 605,76 = 5875872 \text{ кг}.$$

$V_m^1 = 9700 \text{ м}^3$ об'єм №1 танка; $\rho_{C_4H_{10}} = 605,76 \text{ кг/м}^3$ при температурі рідини $t_{C_4H_{10}} = -4,7^0 C$.

Маса вантажу танка №2:

$m_{C_3H_8}^{max} = V_m^2 \cdot \rho_{C_3H_8} = 14745 \cdot 578,55 = 8530719,75$ кг.

$V_m^2 = 14745\,м^3$ об'єм №2 танка; $\rho_{C_3H_8} = 578,55\,кг/м^3$ при температурі рідини $t_{C_3H_8} = -40,1^0 C$.

Маса вантажу танка №3:

$m_{C_3H_8}^{max} = V_m^3 \cdot \rho_{C_3H_8} = 7950 \cdot 605,76 = 4815792$ кг.

$V_m^2 = 7950\,м^3$ об'єм №2 танка; $\rho_{C_4H_{10}} = 605,76\,кг/м^3$ при температурі рідини $t_{C_4H_{10}} = -4,7^0 C$.

Визначимо заповнення танків рідиною до моменту змішування вантажів.

Танк №1 заповнений на 67%.

Танк №2 заповнений на 92,8%.

Танк №3 заповнений на 81,8%.

Використовуючи теорію сумішей визначимо масову концентрацію кожного компонента суміші в результаті усталеного стаціонарного режиму у всіх танках після проведення операції змішування (C_3H_8+C_4H_{10}):

Масова концентрація пропану складе:

$$X_{C_3H_8} = \frac{m_{C_3H_8}}{\sum m_{ван}^{mix}} = \frac{7920000}{15799000} = 0,51 \qquad (2.2)$$

Масова концентрація бутану складе:

$$X_{C_4H_{10}} = \frac{m_{C_4H_{10}}}{\sum m_{ван}^{mix}} = \frac{7879000}{15799000} = 0,49 \qquad (2.3)$$

Визначимо кількість молей кожного компонента в суміші:

$$M_{C_3H_8} = \frac{m_{C_3H_8}}{\mu_{C_3H_8}} = \frac{7920}{44,097} = 179,604\,моль, \qquad (2.4)$$

де $\mu_{C_3H_8} = 44,0972$ г/моль. - молярна маса пропану.

$$M_{C_4H_{10}} = \frac{m_{C_4H_{10}}}{\mu_{C_4H_{10}}} = \frac{7879}{58,124} = 135,55\,моль \qquad (2.5)$$

де $\mu_{C_3H_8} = 58,124$ г/моль. - молярна маса бутану.

Загальне число молей в суміші:

$$M_{mix} = M_{C_3H_8} + M_{C_4H_{10}} = 179,6047 + 135,55 = 315,134 \text{ моль.} \quad (2.6)$$

Мольна концентрація суміші по кожному компоненту:

$$\psi_{C_3H_8} = \frac{M_{C_3H_8}}{M_{mix}} = \frac{179,604}{315,154} = 0,568 \quad (2.7)$$

$$\psi_{C_4H_{10}} = \frac{M_{C_4H_{10}}}{M_{mix}} = \frac{135,55}{315,154} = 0,4301 \quad (2.8)$$

Визначаємо температуру суміші в танках, яка встановиться в результаті операції змішування.

Для цього будемо використовувати тепловий баланс суміші, не враховуючи втрат в навколишнє середовище.

Тепловий баланс суміші: теплота, яку одна речовина передала іншому в процесі їх змішування, дорівнює теплоті отриманої іншою речовиною. Передача тепла буде відбуватися, до тих пір, поки температури речовин не зрівняються.

$$m_{C_3H_8} \cdot c_p^{C_3H_8} \cdot (\Delta T_1) = m_{C_4H_{10}} \cdot c_p^{C_4H_{10}} \cdot (\Delta T_2), \quad (2.9)$$

$$T_{C_4H_{10}} > T_{mix} > T_{C_3H_8}$$

$$\Delta T_1 = T_{mix} - T_{C_3H_8};\ \Delta T_2 = T_{C_4H_{10}} - T_{mix}.$$

$c_p^{C_3H_8} = 2,254$ кДж/кгК – теплоємність рідкого пропану, яка відповідає температурі $T_{C_3H_8} = 232,9$ К.

$c_p^{C_4H_{10}} = 2,2290$ кДж/кгК – теплоємність рідкого бутану, яка відповідає температурі $T_{C_4H_{10}} = 268,3$ К.

Визначимо температуру суміші:

$$T_{mix} = \frac{m_{C_3H_8} \cdot c_p^{C_3H_8} \cdot T_{C_3H_8} - m_{C_4H_{10}} \cdot c_p^{C_4H_{10}} \cdot T_{C_4H_{10}}}{\left(m_{C_3H_8} \cdot c_p^{C_3H_8} - m_{C_4H_{10}} \cdot c_p^{C_4H_{10}}\right)}, \text{ К} \quad (2.10)$$

$$T_{mix} = \frac{232,9 \cdot 2,254 \cdot 10^3 \cdot 7920000 + 268,3 \cdot 2,2293 \cdot 10^3 \cdot 7879000}{\left(7920000 \cdot 2,254 \cdot 10^3 - 78790002,2293 \cdot 10^3\right)} = 248,8K.$$

$t_{mix} = -24,2^0 C$.

Визначимо парціальний тиск у кожного компонента суміші за законом Рауля.

Закон Рауля: в стані рівноваги тиск пари кожного компонента ідеальної суміші залежить від температури і змісту компонента і пропорційне мольної долі цього компонента в рідині.

$$P_{C_3H_8} = P_{C_3H_8}'' \cdot \psi_{C_3H_8}, \quad (2.11)$$

де $P_{C_3H_8}'' = 2{,}1$ бар –тиск насичених парів пропану при температурі суміші $t_{mix} = -24{,}2^0 C$.

$P_{C_3H_8} = 2{,}1 \cdot 0{,}5698 = 1{,}19$ бар.

$$P_{C_4H_{10}} = P_{C_4H_{10}}'' \cdot \psi_{C_4H_{10}}, \quad (2.\ 12)$$

де $P_{C_4H_{10}}'' = 0{,}39$ бар –тиск насичених парів бутану при температурі суміші $t_{mix} = -24{,}2^0 C$.

$P_{C_4H_{10}} = 0{,}39 \cdot 0{,}4301 = 0{,}16$ бар.

Тиск суміші складе:

$$P^{mix} = P_{C_3H_8} + P_{C_4H_{10}} = 1{,}19 + 0{,}16 = 1{,}35 \text{ бар}. \quad (2.13)$$

Склад суміші в газовій фазі над поверхнею рідини визначимо як:

Вміст пропану в газовій фазі складе:

$$\psi_{C_3H_8} = \frac{P_{C_3H_8}}{P^{mix}} = \frac{1{,}19}{1{,}35} = 0{,}88 \quad (2.14)$$

Вміст бутану в газовій фазі складе:

$$\psi_{C_4H_{10}} = \frac{P_{C_4H_{10}}}{P^{mix}} = \frac{0{,}16}{1{,}35} = 0{,}11 \quad (2.15)$$

Таким чином було визначено, що газ який всмоктується компресором системи повторного зрідження складається на 88% з пропану і на 11% з бутану, незважаючи на те, що в рідкій фазі пропану міститься 51%, а бутану 49%.

З чого можна зробити висновок, що максимально допустимий тиск конденсації в суміші в установках повторного зрідження буде визначається тиском пропану при заданій температурі конденсації.

2.3. Розрахунки характеристик установки повторного зрідження яка працює на суміші пропану и бутану

2.3.1 Вирішення «задачі уніфікації» для установки повторного зрідження

Під час операції процесу змішування у всіх трьох танках встановлюються однакові параметри суміші. Для контролю тиску і утримання суміші в рідкому стані включаються в роботу всі три установки повторного зрідження, які працюють паралельно на всі танки.

Установка повторного зрідження працює за циклом двоступеневого стиснення з неповним проміжним тиском і паралельним дроселюванням.

Теоретичний об'єм, описаний поршнем компресора нижнього ступеня:

$V_h^{кнс} = 1273 м^3/ч = 0.3536 м^3/с$;

Теоретичний об'єм, описаний поршнем компресора верхнього ступеня:

$V_h^{квс} = 476 м^3/ч = 0.1322 м^3/с$.

Співвідношення об'ємної продуктивності верхньої і нижньої ступені компресора:

$$\frac{V_h^{квс}}{V_h^{кнс}} = \frac{0.1322}{0.356} = 0,37 .$$

Таким чином теоретична об'ємна продуктивність компресора з урахуванням використання трьох працюючих паралельно установок складе:

$V_h^{кнс} = 0.3536 \cdot 3 = 1,0603 м^3/с$; $V_h^{квс} = 0.1322 \cdot 3 = 0,397 м^3/с$.

Для встановлення оптимального режиму роботи установки повторного зрідження вирішимо завдання уніфікації.

Для встановлення оптимального режиму роботи установки повторного зрідження вирішимо завдання уніфікації - знайдемо такий проміжний тиск $P_{пр}$, який відповідає конструктивним характеристикам компресора, тобто співвідношенням його об'ємних продуктивностей: $\frac{V_h^{квс}}{V_h^{кнс}} = 0,37$.

Вихідні данні для розрахунку.

Робоча речовина - суміш пропану 51% і бутану 49%.

Така суміш є неазеотропною (кипить і конденсується при змінній температурі кипіння) температурній глайд суміші складає близько 15 градусів).

Температура кипіння : $t_{mix} = t_0 = -24,2^0 C$;.

Температура, парів суміші на всмоктуванні в циліндр нижньої ступені . $t_1 = -6,7°C$.

Переохолодження рідини в змійовику проміжної посудини визначимо, як: $t_7 = t_{пр} + 3$.

Джерелом відведення тепла конденсації в установці повторного зрідження є забортна вода.

Температура забортної води і її густина змінюється в широкому діапазоні в залежності від району плавання і солоності води.

На судні використовують пряму систему охолодження. У прямих системах охолодження забортна вода безпосередньо використовується в якості теплоносія в теплообмінниках.

Тепло відводиться проміжним теплоносієм, забортною водою.

Для необмеженого району плавання судна приймаємо температуру за умовами тропіків: $t_{з.в} = 35℃$ – температура забортної води.

Тоді температура конденсації визначається як:

$t_к = t_{з.в} + 6℃ = 35 + 6 = 41℃.$

Для розрахунку суміші використовуємо програму REFPROP [26].

На рис.2.5-2.6 представлені цикли установки повторного зрідження в діагамах (*T*-*s* і *p*-*h*).

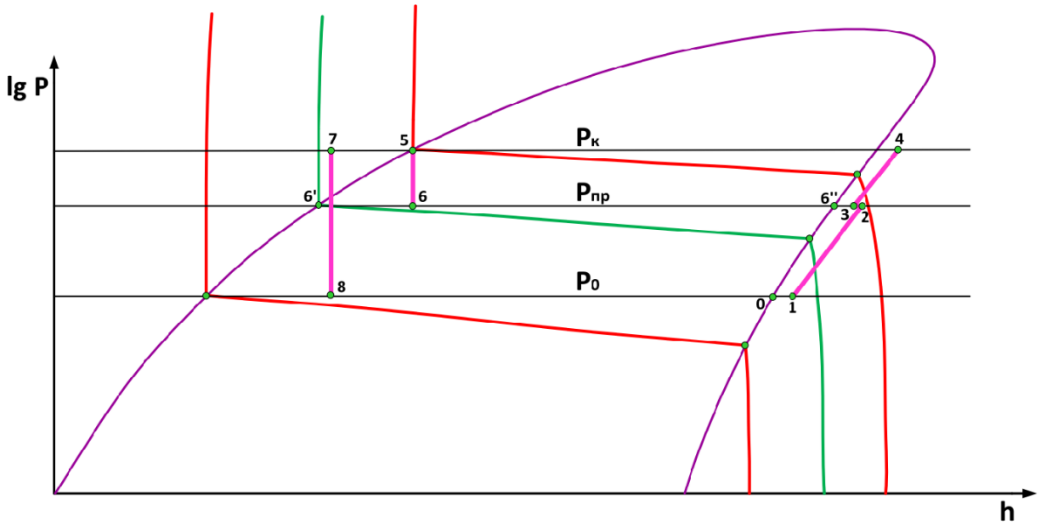

Рисунок.2.5 – Цикл установки повторного зрідження, яка працює на суміші пропану і бутану в діаграмі(lgp-h)

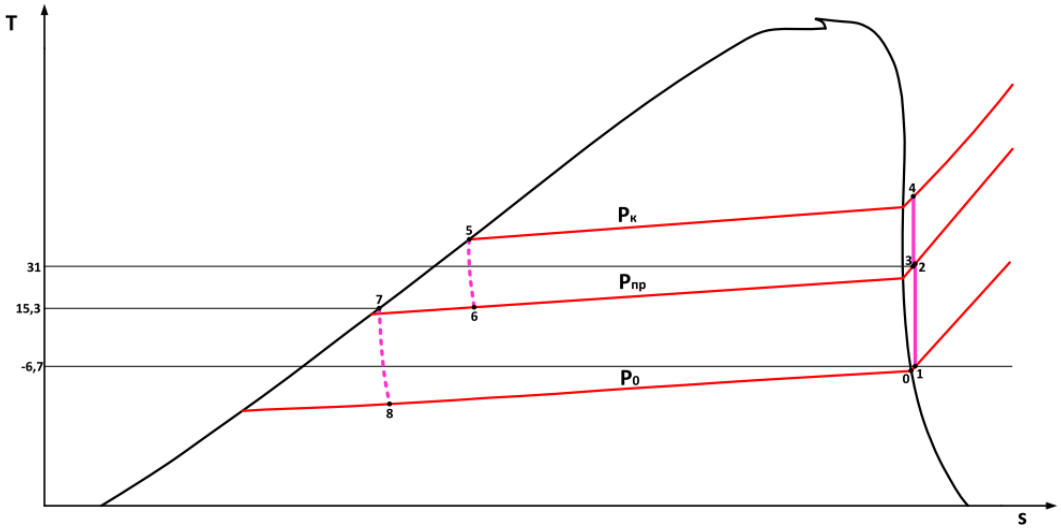

Рисунок.2.6 – Цикл установки повторного зрідження, яка працює на суміші пропану і бутану в діаграмі (T-s)

Термодинамічні параметри в вузлових точках циклу визначимо при різних значеннях проміжного тиску використовуючи математичну модель теплового розрахунку циклу двоступеневої установки.

Математична модель теплового розрахунку циклів

Питома холодопродуктивність:

$$q_0 = h_0 - h_8,\ кДж/кг. \tag{2.16}$$

Питома робота стиснення циліндра нижній ступені компресора

$$w_{кнс} = h_2 - h_1,\ кДж/кг. \tag{2.17}$$

Питома об'ємна холодопродуктивність машини:

$$q_v = \frac{q_0}{v_1},\ кДж/м^3. \tag{2.18}$$

Коефіцієнт подавання циліндра нижнього ступеня компресора:

$$\lambda^{кнс} = \left(1 - c\left[\left(\frac{P_{пр}}{P_0}\right) - 1\right]\right) \cdot \frac{T_0}{T_{пр}} \quad . \tag{2.19}$$

Коефіцієнт подавання циліндра верхнього ступеня компресора:

$$\lambda^{квс} = \left(1 - c\left[\left(\frac{P_к}{P_{пр}}\right) - 1\right]\right) \cdot \frac{T_{пр}}{T_к}, \tag{2.20}$$

Холодопродуктивність машини:

$$Q_0 = V_h^{кнс} \cdot \lambda^{кнс} \cdot q_v, кВт. \tag{2.21}$$

Масова витрата агенту через циліндр нижнього ступеня:

$$M_a^{кнс} = \frac{Q_0}{q_0}, кг/с. \tag{2.22}$$

Масова витрата агенту через циліндр верхнього ступеня визначимо по тепловому балансу проміжної посудини:

$$M_a^{квс} = M_a^{кнс} + \left(M_a^{квс} - M_a^{кнс}\right) \cdot x_6 + M_a^{зм} \tag{2.23}$$

Ступінь сухості пари:

$$x_6 = \frac{(h_6 - h_{6'})}{h_{6''} - h_{6'}} \tag{2.24}$$

Масова витрата робочої речовини через змійовик:

$$M_a^{зм} = \frac{M_a^{кнс}(h_5 - h_7)}{h_{6''} - h_{6'}}, кг/с. \tag{2.25}$$

$$M_a^{квс} = \frac{M_a^{кнс}(1-x_6) + M_a^{зм}}{1-x_6}, кг/с\,. \quad (2.26)$$

Співвідношення витрат робочої речовини за ступенями компресора:

$$a = \frac{M_a^{кнс}}{M_a^{кнс}} \quad (2.27)$$

Параметри пари суміші на виході з проміжної посудини (всмоктування у циліндр верхнього ступеня) визначимо з рівняння енергетичного балансу процесу змішування:

$$h_3 = h_{6''} + \frac{M_a^{кнс}}{M_a^{квс}} \cdot \left(h_2 - h_{6''}\right), кДж/кг \quad . \quad (2.28)$$

Питома робота стиснення циліндра верхнього ступеня компресора:

$$w_{квс} = h_4 - h_3, \quad кДж/кг\,. \quad (2.29)$$

Дійсна об'ємна продуктивність нижнього ступеня компресора:

$$V_д^{кнс} = M_a^{кнс} \cdot v_1, \; м^3/с \quad (2.30)$$

Дійсна об'ємна продуктивність верхнього ступеня компресора:

$$V_д^{квс} = M_a^{квс} \cdot v_3, м^3/с\,. \quad (2.31)$$

Адіабатна потужність циліндра нижнього ступеня компресора:

$$N_a^{кнс} = M_a^{кнс} \cdot w_{кнс}, кВт\,. \quad (2.32)$$

Адіабатна потужність циліндра верхнього ступеня компресора:

$$N_a^{квс} = M_a^{квс} \cdot w_{квс}\; кВт\,. \quad (2.33)$$

Індикаторний ККД циліндра нижнього ступеня компресора:

$$\eta_i^{кнс} = \lambda_w^{кнс} + b \cdot (t_0) \quad (2.34)$$

$$\lambda_w^{кнс} = \frac{T_0}{T_{пр}} \quad (2.35)$$

Індикаторний ККД циліндра верхнього ступеня компресора:

$$\eta_i^{квс} = \lambda_w^{квс} + b \cdot (t_{пр}) \quad (2.36)$$

$$\lambda_w^{квс} = \frac{T_{пр}}{T_к} \quad (2.37)$$

Параметри в вузлових точках циклу при різному проміжному тиску заносимо в табл.2.3-2.7.

Таблиця 2.3 – Термодинамічні параметри вузлових точок циклу установки повторного зрідження при $P_{пр}$=2,4 бар

№ Точки	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**6″**	**6′**	**7**	**8**
P, бар	1,35	1,35	2,4	2,4	9,39	9,39	2,4	2,4	2,4	9,39	1,35
t, ^0C	-24,2	-6,7	11,25	9,854	57,4	41	-4,1	6,5	-8,1	-5,08	-23
h, кДж/кг	572	576.1	601,1	598,7	660,8	303,9	303,9	592	180,8	188,4	188
υ, $м^3/кг$	0.34	0,314	0,18	0,184	0,049	0,001	-	0,12	-	-	-
s, *кДж/кг*	2,45	2,472	2,472	2,463	2,463	1,35	1,39	2,44	0,929	0,95	0,96

Таблиця 2.4 – Термодинамічні параметри вузлових точок циклу установки повторного зрідження при $P_{пр}$=3,45 бар.

№ Точки	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**6″**	**6′**	**7**	**8**
P, бар	1,35	1,35	3,45	3,45	9,39	9,39	3,45	3,45	3,45	9,39	1.35
t, ^0C	-24,2	-6,7	23,07	21.6	57,3	41	6,3	17,48	3,3	6,33	-22
h, кДж/кг	572	576.1	617,4	614,7	660,6	303,9	303,9	607,2	208	215	215,5
υ, $м^3/кг$	0.34	0,314	0,132	0,131	0,049	0,001	-	0,128	-	-	-
s, *кДж/кг*	2,45	2,472	2,472	2,463	2,463	1,35	1,37	2,44	1,02	1,05	1,07

Таблиця 2.5 – Термодинамічні параметри вузлових точок циклу установки повторного зрідження при $P_{пр}$=4,2 бар.

№ Точки	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**6″**	**6′**	**7**	**8**
P, бар	1,35	1,35	4,2	4,2	9,39	9,39	4,2	4,2	4,2	9,39	1,35
t, ^0C	-24,2	-6,7	29,68	28.5	57,7	41	12,4	23.84	9,97	12,97	-21.65
h, кДж/кг	572,3	576.1	626,3	624,3	661,3	303,9	303.9	615,6	224	231.9	231,9
υ, $м^3/кг$	0.34	0,314	0,109	0,108	0,049	0,001	-	0,106	-	-	-
s, *кДж/кг*	2,458	2,472	2.472	2,465	2,465	1,35	1,36	2,437	1,08	1,110	1,138

Таблиця 2.6 – Термодинамічні параметри вузлових точок циклу установки повторного зрідження при $P_{пр}$=4,5 бар

№ Точки	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**6″**	**6′**	**7**	**8**
P, бар	1,35	1,35	4,5	4,5	9,39	9,39	4,5	4,5	4.5	9,39	1.35
t, ^0C	-24,2	-6,7	32,03	31.02	57,81	41	14,9	26.15	12.38	15.3	-21,45
h, кДж/кг	572,3	576.1	629.4	627,5	661.5	303,9	303,9	618.6	230,1	237,8	237,8
υ, $м^3/кг$	0.34	0,314	0,102	0.101	0,049	0,001	-	0,099	-	-	-
s, *кДж/кг*	2,458	2,472	2,47	2,466	2,466	1,35	1,36	2.43	-	1,13	1.161

Таблиця 2.7 – Термодинамічні параметри вузлових точок циклу установки повторного зрідження при $P_{пр}$=5 бар.

№ Точки	0	1	2	3	4	5	6	$6''$	$6'$	7	8
P, бар	1,35	1,35	5	5	9,39	9,39	5	5	5	9.39	1.35
t, ^0C	-24,2	-6,7	35,67	34,6	57,8	41	18,15	29,74	16,15	19,15	-21,1
h, *кДж/кг*	572,3	576.1	634,3	632,4	661,6	303,9	303,9	621,7	239,5	247,2	247,2
υ, $м^3/кг$	0.34	0,314	0,092	0,091	0,049	0,001	-	0,689	-	-	-
s, *кДж/кг*	2,458	2,472	2,472	2,46	2,46	1,35	1,361	2,431	1.139	1,163	

Таблиця 2.8 – Тепловий розрахунок циклу установки повторного зрідження при різних значеннях проміжного тиска

Характеристики циклу	Проміжний тиск в установки , $P_{пр}$,бар				
	2,4	3,45	4,2	4,5	5
q_0 , (кДж/кг);	383,96	356,77	340,44	334,48	325,07
q_v , (кДж/м^3);	1221,24	1134,764	1082,82	1063,86	1033,937
$w_a^{кнс}$, (кДж/кг);	25,01	41,31	50,28	53,44	58,29
$w_a^{квс}$, (кДж/кг);	62,13	45,89	37,064	33,921	29,08
$\lambda^{кнс}$	0,90271	0,89	0,8773	0,869	0,8581
$\lambda^{квс}$	0,84123	0,87817	0,90052	0,907867	0,91215
Q_0 , (кВт)	1168,36	1073,566	1009,89	982,737	943,139
$M_a^{кнс}$,(кг/с)	3,0429	3,0091	2,966	2,938	2,901
$M_a^{зм}$,(кг/с)	0,853	0,666	0,545	0,4997	0,43
$M_a^{квс}$,(кг/с)	4,2579	3,8856	3,649	3,5548	3,418
h_3, (кДж/кг);	598,66	614,7	624,326	627,599	632,43
$V_o^{кнс}$,(м^3/с)	0,9568	0,946	0,9325	0,9237	0,9121
$V_o^{квс}$,(м^3/с)	0,78260	0,5074	0,395	0,3611	0,3141
$V_h^{кнс}$ (м^3/с)	1.059	1,062	1,0628	1,0629	1,063
$V_h^{квс}$ (м^3/с)	0,930304	0,5779	0,43886	0,39774	0,3442
$\frac{V_h^{квс}}{V_h^{кнс}}$	0,8784	0,543	0,413	0,374	0,323

Розв'язання задачі уніфікації подано у графічній формі (рис.2.7)

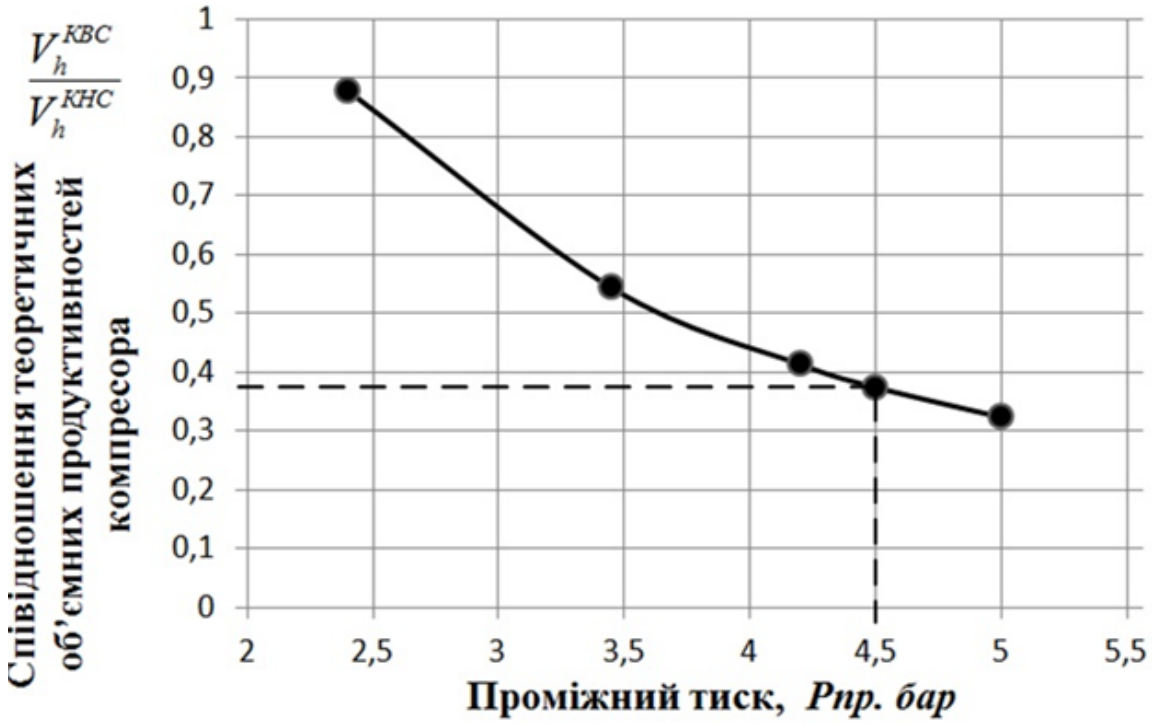

Рисунок.2.7 – Співвідношення теоретичних об'ємних продуктивностей компресора в залежності від проміжного тиска

Аналіз результатів показав (рис.2.7), що існує режим роботи установки якому відповідає співвідношення відомого конструктивного значення об'ємної продуктивності обох ступенів компресора: $\frac{V_h^{квс}}{V_h^{кнс}} = 0,37$.

Це відношення відповідає проміжному тиску: $P_{пр} = 4,5$ бара.

Визначимо енергетичну ефективність установки повторного зрідження з урахуванням рішення задачі уніфікації.

Для розрахунку будимо використовувати дані таблиці (2.6-2.8) і математичну модель теплового розрахунку установки.

Адіабатна потужність циліндра нижнього ступеня компресора:

$$N_a^{кнс} = M_a^{кнс} \cdot w_{кнс} = 2,9381 \cdot 53,44 = 157,01, кВт. \quad (2.38)$$

Адіабатна потужність циліндра верхнього ступеня компресора:

$$N_a^{квс} = M_a^{квс} \cdot w_{квс} = 3,5548 \cdot 33,921 = 120,58 \ кВт. \quad (2.39)$$

Індикаторний ККД циліндра нижнього ступеня компресора:

$$\eta_i^{кнс} = \lambda_w^{кнс} + b \cdot (t_8) = 0,869 + 0,0025 \cdot (-21,45) = 0,8153 \quad (2.40)$$

Індикаторний ККД циліндра верхнього ступеня компресора:

$$\eta_i^{квс} = \lambda_w^{квс} + b \cdot (t_{пр}) = 0,90886 + 0,0025 \cdot (19,268) = 0,9568 \quad (2.41)$$

Індикаторна потужність нижнього ступеня компресора:

$$N_i^{кнс} = \frac{N_a^{кнс}}{\eta^{кнс}} = \frac{157.01}{0,8153} = 192,57, кВт. \quad (2.42)$$

Індикаторна потужність циліндра верхнього ступеня компресора:

$$N_i^{квс} = \frac{N_a^{квс}}{\eta^{квс}} = \frac{120,58}{0,9568} = 126,02 \ кВт \quad (2.43)$$

Потужність тертя нижнього ступеня компресора:

$$N_{тр}^{кнс} = V_h^{кнс} \cdot p_{imp} = 1,0629 \cdot 50 = 53,14, кВт \quad (2.44)$$

Потужність тертя циліндра верхнього ступеня компресора:

$$N_{тр}^{квс} = V_h^{квс} \cdot p_{imp} = 0,397 \cdot 50 = 19,83, кВт. \quad (2.45)$$

Ефективна потужність нижнього ступеня компресора:

$$N_e^{кнс} = N_{тр}^{кнс} + N_i^{кнс} = 53,14 + 192,57 = 245,71, кВт. \quad (2.46)$$

Ефективна потужність циліндра верхнього ступеня компресора:

$$N_e^{квс} = N_{тр}^{квс} + N_i^{квс} = 19,83 + 126,02 = 145,85, кВт. \quad (2.47)$$

Співвідношення витрат робочої речовини за ступенями компресора:

$$a = \frac{M_a^{кнс}}{M_a^{кнс}} = \frac{3,5548}{2,938} = 1,209.$$

Теоретичний коефіцієнт перетворення:

$$COP_a = \frac{q_0}{w_{кнс} + a \cdot w_{квс}} = \frac{334,48}{53,44 + 33,921 \cdot 1,2091} = 3,54 \quad (2.48)$$

Дійсний коефіцієнт перетворення:

$$COP_д = \frac{Q_0}{\Sigma N_e} = \frac{982,737}{245,71 + 145,85} = 2,50 \quad (2.49)$$

Ступінь термодинамічної досконалості машини:

$$\eta_{стс}^{\partial} = \frac{COP_{\partial}}{COP_{Л}} = \frac{2,55}{5,55} = 0,45 \quad (2.50)$$

Теплове навантаження на конденсатор:

$$Q_к = Q_0 + \Sigma Ne = 982,737 + 391,56 = 1374,297 кВт \quad (2.51)$$

2.3.2 Перевірний розрахунок пластинчастого вантажного конденсатора

Теплове навантаження на конденсатор визначимо виходячи з теплового розрахунку установки повторного зрідження (рів.2.51).

У процесі змішування працюють 3 установки повторного зрідження паралельно, тому розділимо загальне навантаження на 3 конденсатора і отримаємо теплове навантаження на один теплообмінний апарат:

Теплове навантаження на конденсатор : $Q_к = 1374,297 / 3 = 458,099 кВт$

Температура конденсації- $t_к = 41^0 C$;

Конденсатор охолоджується забортною водою.

Температура води на вході в апарат- $t_{вх} = 35^0 C$.

Температура води на виході з апарату- $t_{вих} = 38^0 C$.

Робоча речовина суміш пропану 51% і бутану 49%.

Геометричні характеристики пластин:

Ширина - a = 260мм.

Висота -b = 800мм.

товщина пластини- δ = 0.6мм;

Крок між пластинами- u = 3 мм.

Загальна кількість пластин в апараті шт. – $n = 200$

Характеристика теплообмінної поверхні:

Теплообмінна поверхня однієї пластини:

$f1п = a \cdot b = 0.260 \cdot 0.800 = 0.208 м^2$.

Живий перетин однієї пластини:

$$f1к = a \cdot (u - \delta) = 0.260 \cdot (3 - 0.6) \cdot 10^{-3} = 6.24 \cdot 10^{-4} м^2 . \quad (2.52)$$

Логарифмічний температурний напір в конденсаторі:

$\theta_1 = t_к - t_{вх} = 41 - 35 = 6^0 C$;

$\theta_2 = t_к - t_{вих} = 41 - 38 = 3^0 C$

$$\theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln \frac{\theta_1}{\theta_2}} = \frac{3}{\ln((41-35/(41-38))} = 4.33^0 C \quad (2.53)$$

Теплофізичні властивості води при її середній температурі:

$t_{ср.ТН} = \frac{t_{вх.} + t_{вих.}}{2} = \frac{35+38}{2} = 36.5^0 C$

$\mu = 727.4 \cdot 10^{-6}\ Па \cdot с$ коефіцієнт динамічної в'язкості;

$\nu = 0.732 \cdot 10^{-6}\ м^2/с$ коефіцієнт кінематичної в'язкості;

$\lambda = 62.65 \cdot 10^{-2}\ Вт/м \cdot К$ -коефіцієнт теплопровідності;

$\rho = 993.95\ кг/м^3$ - густина води;

$C_p = 4.174\ кДж/м \cdot К$ - теплоємність води;

$Pr = 4.865$ - критерій Прандтля;

Масова витрата води:

$$M_{т.н.} = \frac{Q_k}{C_p \cdot \Delta t} = \frac{458,009}{4.174 \cdot (38-35)} = 36.57\ кг/с; \quad (2.54)$$

Об'ємна витрата води:

$$V_{теп} = \frac{M_{теп}}{\rho_{теп.}} = \frac{36.57}{993.95} = 0.036798\ м^3/с \quad (2.55)$$

Швидкість руху води:

$$w_{теп.} = \frac{2 \cdot V_{теп}}{f_{1.к} \cdot n/2} = \frac{2 \cdot 0.036798}{6.24 \cdot 10^{-4} \cdot 100} = 1,17 м/с \quad (2.56)$$

n-кількість пластин в апараті;

Еквівалентний діаметр каналу:

$$d_{екв} = \frac{4 \cdot f_{1.к}}{П_{1.к}} = \frac{4 \cdot 6.24 \cdot 10^{-4}}{2(0.260 + (3-0.6) \cdot 10^{-3})} = 4.76 \cdot 10^{-3} м \quad (2.57)$$

Критерій Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{w_{теп} \cdot d_{екв.}}{\upsilon} = \frac{1.179 \cdot 4.76 \cdot 10^{-3}}{0.732 \cdot 10^{-6}} = 7669,6 \quad (2.58)$$

Критерій Нуссельта

$$Nu = 0.021 \cdot (\mathrm{Re})^{0.8} \cdot \mathrm{Pr}^{0.43} = 0.021 \cdot (7669,67)^{0.8} \cdot 4.865^{0.43} = 53.142 \quad (2.59)$$

Визначаємо коефіцієнт тепловіддавання з боку води:

$$\alpha_{т.н.} = \frac{N_u \cdot \lambda}{d_{екв.}} = \frac{53,142 \cdot 62.65 \cdot 10^{-2}}{4.76 \cdot 10^{-3}} = 6995,208 \quad (2.60)$$

Щільність теплового потоку з боку води:

$$q_{т.н} = \alpha_{т.н.} \cdot \theta_{т.н.} \quad (2.61)$$

Щільність теплового потоку в апараті визначимо графоаналітичним методом.

$t_{\text{ст}} - t_{\text{води}} = \theta_{х.л}$. Задаємося різницею температур між температурою води в каналах і температурою стінки пластини $\theta_{х.л} = 2$.

Щільність теплового потоку з боку води:

$q_{т.н} = \alpha_{т.н.} \cdot \theta_{х.л.} = 2 \cdot 6995,2 = 13990,41$ Вт / м^2.

Визначаємо коефіцієнт тепловіддавання з боку суміші при конденсації пари в каналах:

$$\alpha_a = 0.2 \cdot \alpha_{R(mix)} \cdot Re^{0.12} \cdot \mathrm{Pr}^{-0.33} \quad (2.62)$$

Площа живого перерізу одного каналу:

$$f_{1.к.} = a \cdot (u - \delta) \cdot n / 2 = 0.260 \cdot (3 - 0.6) \cdot 10^{-3} \cdot n = 6.24 \cdot 10^{-4} \cdot n / 2 = 0.0624 \text{ м}2 \quad (2.63)$$

Витрата агенту: з теплового розрахунку(рів 2.26, табл. 8):

$M^{квс}{}_a = \frac{3,5548}{3} = 1,1849\, кг/с$;

Швидкість пари на вході в канал з верхнього ступеня компресора (розділ 4):

$$V_p = M^{квс}{}_a \cdot \nu_4 = 1,1849 \cdot 0,049 = 0.05806\, м^3/с \quad (2.64)$$

$$\omega = \frac{V_p}{f_{1.к}} = \frac{0.05806}{6.24 \cdot 10^{-4} \cdot n/2} = \frac{93.04}{100} = 0.9304 м/с ; \quad (2.65)$$

Теплофізичні властивості робочої речовини (C_3H_8 (R290)+ C_4H_{10}) (рідини) при температурі конденсації $t_к = 41^0 C$;

$g = 9.8 м/с^2$

$r = 303.94 кДж/кг$ -схована теплота пароутворення;

$\lambda = 0.092625 Вт/м \cdot К$ -коефіцієнт теплопровідності рідини;

$\upsilon = 0.205 \cdot 10^{-6} м^2/с$ - коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини;

$\upsilon^{//} = 0.4232 \cdot 10^{-6} м^2/с$ - коефіцієнт кінематичної в'язкості пари;

$\rho = 509,48 кг/м^3$ - густина рідкої суміші ;

$P_r = 3.03$ -критерій Прандтля;

$\mu = 104,56 \cdot 10^{-6} Па \cdot с$ - коефіцієнт динамічної в'язкості рідини.

Критерій Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{w \cdot d_{екв.}}{\upsilon^{//}} = \frac{0.9304 \cdot 4.76 \cdot 10^{-3}}{0.4232 \cdot 10^{-6}} = 10463,31 \quad (2.66)$$

Коефіцієнт тепловіддавання з боку суміші, яка конденсується :

$$\alpha_{Rmix} = 0.725 \cdot \sqrt[4]{\frac{(g \cdot r \cdot \rho^2 \cdot 1000 \cdot \lambda^3)}{\mu \cdot \theta_a \cdot b}} = 0.725 \sqrt[4]{\frac{9.8 \cdot 303.94 \cdot 10^3 \cdot 0.09262^3 \cdot 509,48^2}{104,55 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_a \cdot 0.8}} = 1193,52 \cdot \theta_a^{-0.25}$$

(2.71)

Для каналів, виконаних з пластин, середній коефіцієнт тепловіддавання на 30% вище

$$\text{тоді: } \alpha_{Rmix} = 1193,52 \cdot \theta_a^{-0.25} \quad (2.67)$$

$\alpha_a = 0.2 \cdot \alpha_{Rmix} \cdot Re^{0.12} \cdot \mathrm{Pr}^{-0.33}$

$$\alpha_a = 0.2 \cdot 1193,52 \cdot \theta_a^{-0.25} \cdot 10463.31^{0.12} \cdot 3.03^{-0.33} = 502.74 \cdot \theta^{-0.25} \quad (2.68)$$

Питомий тепловий потік: $q = 502,74 \cdot \theta_a^{0.75}$

Переймаючись значенням θ_a і $\theta_{тн}$ будуємо графіки залежності питомого теплового потоку віднесеного до поверхні пластин.

Таблиця2.9 – Розрахункові щільності теплового потоку з боку суміші і води

θ_a	0.5	0.75	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
$\theta_{тн}$	0.5	0.75	1	–			3	3.5	4
q_a	298,93	405,171	502,74	681,4	845	995.	1146	1286	1421
$q_{тн}$ $F_{вн}$	3497,6	5246,406	6995	1092	1399	17488	20985	24483	27980

Використовуючи графоаналітичний метод розрахунку, визначаємо розрахункову щільність теплового потоку апарату:

$q_f = 22023$ Вт / м^2·

Тепловіддавальна поверхня апарата:

$$F = \frac{n}{2} \cdot f_{1n} = 0.208 \cdot 100 = 20.8 \text{ м}^2. \quad (2.69)$$

Дійсне теплове навантаження на апарат:

$$Q = q \cdot f_{1.к} = 17548 \cdot 20.8 = 458099 \text{ Вт} \quad (2.70)$$

2.4 Термодинамічний аналіз процесів стиснення і конденсації компонентів які не змішуються методом заміни процесів із сумішами еквівалентними процесами з чистими компонентами

Математична модель, представлена в розділі 2.3, є універсальною для оцінки будь-яких зворотних термодинамічних циклів (застосування холодильного обладнання та теплових насосів).

При аналізі таких термодинамічних циклів неможливо врахувати всі фактори, що впливають на зміну параметрів системи (наприклад, додаткове тепловіддавання до/від компонентів і трубопроводів, можливі витоки чистих робочих тіл із суміші тощо). Такі фактори призводять до фізико-хімічної неоднорідності вантажу (робочої речовини).

Пропонується універсальну математичну модель для суміші замінити математичними моделями циклів із чистими компонентами при їх власних парціальних тисках, тобто. використовувати принцип еквівалентування. Еквівалентування передбачає збереження параметрів у вузлових точках термодинамічного циклу до еквівалентування та після нього.

Результати можуть надати інформацію про джерела та наслідки, спричинені змінами робочих параметрів.

Еквівалентнування в цілому призводить до зниження складності розв'язуваної задачі та створення спрощеної моделі кожного компонента. Це також дозволяє підвищити наочність одержуваних результатів [27]. Використання моделі еквівалентування, безумовно, призводить до деяких відмінностей в отриманих результатах. У цьому дослідженні вихідною інформацією для реалізації методу еквівалентування є дані про фактичні параметри роботи установки повторного зрідження газу (рис. 2.3 та рис.2. 4).

Робочою речовиною в установці є газова суміш пропану та бутану з масовою концентрацією 51%/49%. Це зеотропна суміш; тому процеси у двофазній зоні (конденсація та випаровування) не ізотермічні. Температурний глайд суміші

становить близько 15 К (рис. 2.5-2.6). У цій суміші бутан є висококиплячим компонентом (RH компонент), а пропан є низькокиплячим компонентом (RL компонент).

Аналіз термодинамічного циклу та синтез еквівалентної схеми проводиться з еквівалентними процесами, що протікають із чистими компонентами при стисканні та конденсації. Компоненти суміші в елементах еквівалентної схеми здійснюють термодинамічні процеси за власних парціальних тисків і температур суміші. Масові витрати компонентів розраховані на 1 кг робочої суміші.

Побудовані цикли в (T-s) діаграмі будуть реалізовуватися в конструктивній схемі еквіваленті (рис.2.9).

Обов'язковою умовою при заміні процесу із сумішами еквівалентними процесами є ідентичність початкових і кінцевих параметрів.

Компоненти суміші в теплообмінних апаратах будуть конденсуватися і кипіти при власних парціальних тисках.

Побудуємо цикли в (T-s) діаграмі і визначимо параметри в вузлових точках циклу, уявляючи, що кожен компонент суміші окремо здійснює процеси стиснення та конденсації , має власний тиск кипіння і конденсації, але за умови, що температури всмоктування і конденсації кожного компонента дорівнюють температурі суміші (рис.2.8).

Конструктивна схема еквівалент розділення суміші представлено на рис.2.9. Після танка газова суміш надходить у напівнепроникний фільтр **(ППФ)**, де компоненти суміші поділяються.

Для розрахунку використовуємо дані отримані в розділі 2.2.

На підставі закону Дальтона і закону Рауля (рів.211-2.15) визначимо парціальний тиск кожного компонента в суміші, знаючи загальний тиск суміші.

$P_0^{mix} = 1,35$ бар-тиск кипіння суміші;

$P_{пр}^{mix} = 4,5$ бар-проміжний тиск суміші;

$P_к^{mix} = 9,39$ бар-тиск конденсації суміші;

$\psi_{C_3H_8} = 0,88$ - об'ємна концентрація газової суміші пропану;

$\psi_{C_4H_{10}} = 0,11$- об'ємна концентрація газової суміші бутану;

$P_0^{C_3H_8} = 1,19$ бар - тиск кипіння пропану ;

$P_{пр}^{C_3H_8} = \psi_{C_3H_8} \cdot P_{пр}^{mix} = 0,88 \cdot 4,5 = 3,39$ - проміжний тиск пропану;

$P_к^{C_3H_8} = \psi_{C_3H_8} \cdot P_к^{mix} = 0,88 \cdot 9,39 = 8,26$ - тиск конденсації пропану;

$P_0^{C_4H_{10}} = 0,16$ бар-- тиск кипіння бутану;

$P_{пр}^{C_4H_{10}} = \psi_{C_4H_{10}} \cdot P_{пр}^{mix} = 0,11 \cdot 4,5 = 0,495$ - проміжний тиск бутану;

$P_к^{C_4H_{10}} = \psi_{C_4H_{10}} \cdot P_к^{mix} = 0,11 \cdot 9,39 = 1,039$ - тиск конденсації бутану.

Визначимо параметри в вузлових точках циклу, за умови що кожен компонент здійснює цикл окремо при своїх тисках

$P_0^{C_3H_8} = 1,19$ бар $\Rightarrow t_0^{C_3H_8} = 1,19^0 C$; $P_{пр}^{C_3H_8} = 3,96$ бар $\Rightarrow t_{пр}^{C_3H_8} = 1,19^0 C$;

$P_к^{C_3H_8} = 8,26$ бар $\Rightarrow t_к^{C_3H_8} = 1,19^0 C$.

Таблиця 2.10 –Термодинамічні параметри вузлових точок циклу якій працює на низькокиплячому компоненті **RL** (R290- C_3H_8).

№ точки	**1р**	**2р**	**3р**	**3р/**	**4р**	**5р**	**6р**	**7р**
Р, бар	1,19	3,96	3,96	3,96	8,26	8,26	9,39	9,39
t, ^0C	-6,7	35,8	32,07	31,07	59,2	57,812	57,812	41
h, кДж/кг	578,3	640,7	633,9	632,13	672,71	669,85	666,77	633,35

На рис. 2.8b представлено цикл поведінки низькокиплячого компонента (**RL**) в діаграмі (T-s), якби цей компонент стискався самостійно в компресорах низького і високого ступенів до тиску конденсації суміші.

Проаналізуємо процеси поведінки низькокиплячого компонента.

Низькокиплячій компонент всмоктується в компресор низького ступеня з температурою всмоктування суміші $t_1^{mix} = -6,7^0 C$, але при своєму тиску кипіння $P_0^{C_3H_8} = 1,19$ бар, який нижче тиску всмоктування суміші $P_0^{mix} = 1,35$ бар.

Компонент **RL** стискається в компресорі низького ступеня до свого проміжного тиску $P_{пр}^{C_3H_8} = 3,96$,бар відмінного від проміжного тиску суміші $P_{пр}^{mix} = 4,5$ бар. Температура в кінці стиснення становить $t_2^{RL} = 35,8^0 C$, але температура при аналогічному стисканні суміші становить $t_2^{mix} = 32,07^0 C$, для виконання умови рівності температур на початку і в кінці процесу стискання, нам необхідно охолодити пар при постійному тиску в теплообміннику **ОХЛ1** точка (**3р**).

У компресорі високого ступеня пар стискається до свого тиску конденсації $P_к^{C_3H_8} = 8,26$ бар процес **(3р/-4),** при цьому температура кінця стиснення складає $t_4^{RL} = 59,2^0 C$, температура кінця стиснення суміші нижче цієї температури $t_4^{mix} = 57,8^0 C$, тому пар необхідно охолодити в теплообміннику **ОХЛ2** до температури кінця стиснення суміші.

Після компресора суміш надходить в конденсатор тиск конденсації суміші становить: $P_к^{mix} = 9,39 бар$ Тиск низькокиплячого компонента **RL** : $P_к^{RL} = 8,26$ бар, він нижче, тому **RL** необхідно стиснути до тиску суміші. Стиснення здійснюється в ізотермічному компресорі **ІКМ.** Температура конденсації суміші становить: $t_к^{mix} = 41^0 C$. Для виконання умови сталості температури нам необхідно **RL** охолодити в теплообміннику **ОХЛ3** до температури конденсації суміші.

В результаті чого можна побачити, що **RL** в конденсаторі буде знаходиться в стані перегрітої пари.

Це свідчить про те, що якщо буде спостерігатися витік через нещільності в з'єднаннях, то відходити буде низькокиплячій компонент, тобто пропан.

Таблиця 2.11 –Термодинамічні параметри вузлових точок циклу який працює на висококиплячому компоненті **RH** (R600- C_4H_{10}).

№ точки	**1b**	**2b**	**3b**	**3b/**	**4b**	**5b**	**6b**	**7b**	**8b**	**9b**
P, бар	0,16	0,495	0,495	0,495	1,039	1,039	6,05	6,05	9,39	9,39
t, ^0C	-6,7	21,7	32,07	31,07	50,3	57,812	57,8	57,8	57,8	41
h, $кДж/кг$	579,39	624,25	641,8	640,	672,7	686,38	667,1	343	343,1	299,6

На рисунку 2.8*а* представлено цикл поведінки висококиплячого компонента (**RH**) в діаграмі (T-s), якби цей компонент стискався самостійно в компресорах низького і високого ступеня до тиску конденсації суміші.

Проаналізуємо процеси поведінки висококиплячого компонента.

Компонент **RH** всмоктується в компресор низького ступеня з температурою всмоктування суміші $t_1^{mix} = -6,7^0C$, , але при своєму тиску кипіння $P_0^{C_3H_8} = 0,16$ бар, який набагато нижчий тиску всмоктування суміші $P_0^{mix} = 1,35$ бар.

Компонент **RH** стискається в компресорі низького ступеня до свого проміжного тиску $P_{пр}^{C_3H_8} = 0,495$,бар відмінного від проміжного тиску суміші $P_{пр}^{mix} = 4,5$ бар. Температура в кінці стиснення становить $t_2^{HL} = 21,7^0C$, але температура при аналогічному стисканні суміші становить $t_2^{mix} = 32,07^0C$, для виконання умови рівності температур на початку і в кінці процесу стискання, нам необхідно підігріти пар при постійному тиску в теплообміннику-нагрівачу (**НАГР1**) точка (**3b**).

У компресорі високого ступеня пар стискається до свого тиску конденсації $P_к^{\mathbf{RH}} = 1,0329$ бар – процес **(3b/-4),** при цьому температура кінця стиснення складає $t_4^{\mathbf{RH}} = 50,303^0C$, температура кінця стиснення суміші вище цієї температури $t_4^{mix} = 57,8^0C$, тому пар необхідно підігріти в теплообміннику-нагрівачу2 (**НАГР2**) до температури кінця стиснення суміші.

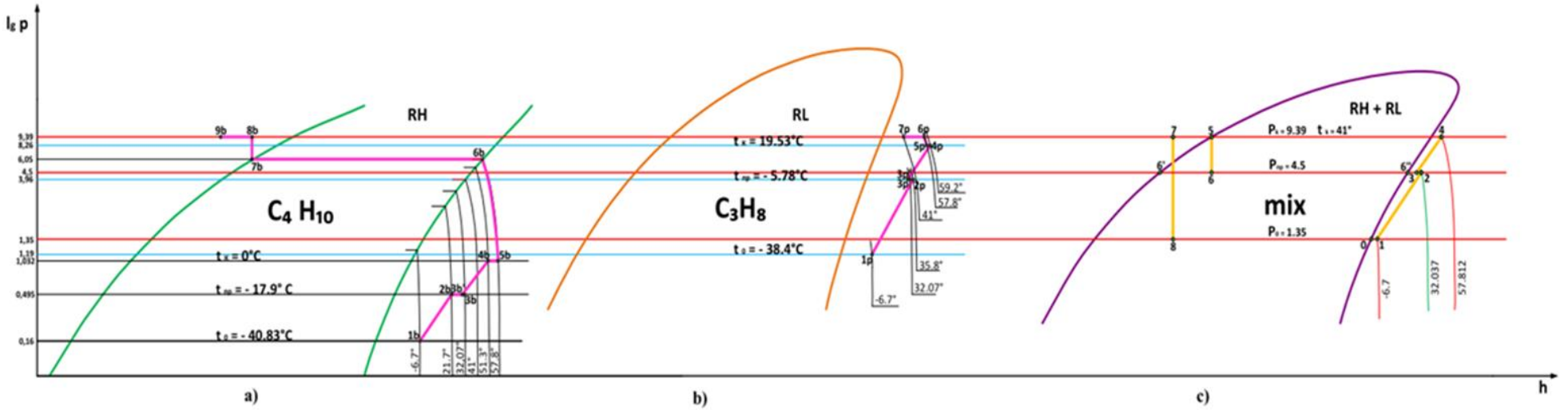

Рисунок 2.8 – Процеси, що відбуваються з робочими речовинами в схемах еквівалентах в порівнянні з основними процесами, що відбуваються в суміші в діаграмі (lg p-h).

a) процеси з бутаном; b) процеси з пропаном; c)процеси з сумішшю

Після компресора суміш надходить в конденсатор тиск конденсації суміші становить: $P_к^{mix} = 9,39 бар$ тиск компонента – **RH** $P_к^{RH} = 1,0039$ бар, нижче, тому RH необхідно стиснути до тиску суміші при постійній температурі суміші Стиснення здійснюється в ізотермічному компресорі **ІКМ.** Ця температура відповідає тиску $P_1^{RH} = 6,054$ бар, при цьому тиску компонент RH конденсується.

В конденсаторі**(КД).** Для того щоб отримати необхідний тиск суміші необхідно підвищити тиск компонента **RH**, цей процес здійснюється в ізотермічному насосі **(ІН).**

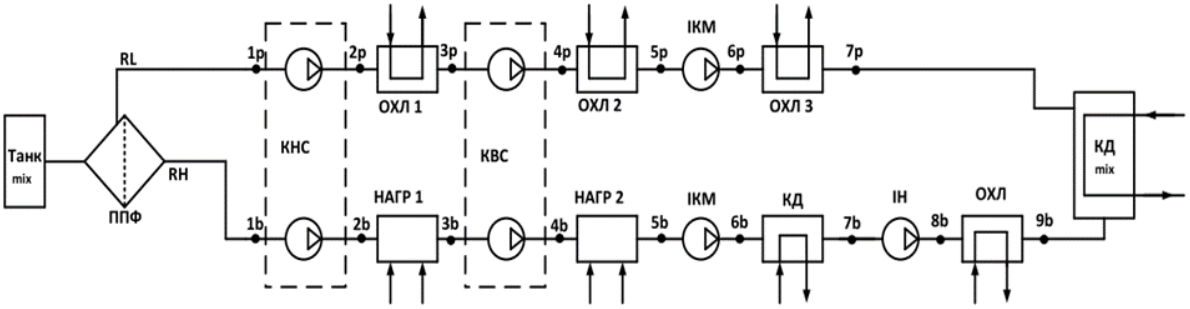

Рисунок 2.9 – Схема еквівалент процесів розділення сумішей

Температура на виході з насоса не відповідає температурі конденсації суміші, тому компонент **RH** необхідно охолодити в охолоджувачі **ОХЛ.**

В результаті чого можна побачити, що компонент **RH** в конденсаторі буде знаходиться в стані переохолодженої рідини.

Далі окремі компоненти суміші надходять в основний конденсатор **(КДmix).**

Дігамми (T-s) рис 2.8. наочно показують оцінку циклу при проведенні математичних розрахунків і поведінку окремих компонентів в процесах із сумішами.

Визначимо роботу стиснення в циклах для окремих компонентів суміші і порівняємо отримані результати з адіабатною роботою, отриманою в процесі стиснення суміші (п.2).

Питома робота стиснення компонента RL:

$$w_{\mathbf{RL}}^{кнс} = X_{\mathbf{RL}} \cdot \left(h_{2p} - h_{1p}\right) = 0,51 \cdot \left(640,7 - 578,3\right) = 31,82 \text{ , } кДж / кг . \quad (2.71)$$

$$w_{\mathbf{RL}}^{квс} = X_{\mathbf{RL}} \cdot a \cdot \left(h_{4p} - h_{3'p}\right) = 0,51 \cdot 1,2 \cdot \left(672,71 - 632,9\right) = 24,3 \ кДж / кг . \quad (2.72)$$

Питома робота стиснення компонента RH:

$$w_{RH}^{кнс} = X_{RH} \cdot \left(h_{2b} - h_{1b}\right) = 0,49 \cdot \left(624,25 - 579,39\right) = 21,98 \ кДж / кг . \quad (2.73)$$

$$w_{RH}^{квс} = X_{RH} \cdot a \left(h_{4b} - h_{3'b}\right) = 0,49 \cdot 1,2 \cdot \left(672,54 - 640,11\right) = 19,06 \ кДж / кг . \quad (2.74)$$

Тоді адіабатна робота, яка витрачена при стисненні суміші складе:

$$w_{mix} = w_{RH} + w_{\mathbf{RL}} = w_{\mathbf{RL}}^{кнс} + w_{RH}^{кнс} + w_{\mathbf{RL}}^{квс} + w_{RH}^{квс} = 31,82 + 21,98 + 22,6 + 19,06 = 96,8 \ кДж / кг \quad (2.74)$$

Значення адіабатної роботи стиснення отриманої в результаті теплового розрахунку циклу суміші (п.2) становить:

$$w_a^{mix} = w_{кнс} + a \cdot w_{квс} = 53,44 + 1,207 \cdot 33,921 = 94,382 кДж / кг . \quad (2.75)$$

Розбіжність розрахункових значень адіабатної роботи стиснення (ур.2.74) і (ур.2.75), не перевищує 2,5%. Отриманий результат довів правомірність використання методу еквівалентування під час аналізу реальних систем перетворення енергії, які працюють із компонентами, що не змішуються.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Змішування пропану і бутану на суднах LPG сьогодні є звичайною практикою, оскільки дозволяє враховувати ринкові та кліматичні умови країн-імпортерів зрідженого газу, що швидко змінюються. Така практика порушує низку питань, пов'язаних з безпекою суден та експлуатаційною надійністю установки повторного зрідження. Для аналізу проблем в роботі були використані дані моніторингу вантажних операцій з експлуатації судна «LEGACY» при змішуванні пропану та бутану в танках.

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

1. Використовуючи положення теорії сумішей, у роботі визначено параметри суміші та її компонентів. Отримані результати підтверджуються даними моніторингу вантажних операцій. Проведено енергетичний аналіз установки повторного зрідження, що працює на зеотропній суміші. Визначено робочі параметри компонентів установки щодо зрідження газу, а також продуктивність та енергоефективність системи.

2. Оптимальний проміжний тиск суміші при вирішенні завдання уніфікації склав 4,5 бар. При такому тиску спостерігається максимальна енергетична ефективність установки повторного зрідження, при заданих конструктивних характеристиках двоступеневого компресора.

3. Зміни параметрів роботи призводять до відповідних відхилень характеристик установки зрідження та відхилення режиму роботи від проектних характеристик з порушенням надійності роботи системи. Для контролю параметрів установки запропоновано метод еквівалентування режиму, що встановився, шляхом заміни процесів зі сумішами процесами з чистими компонентами.

4. Метод дозволив здійснити внутрішній контроль параметрів кожного компонента суміші як самостійної робочої речовини. Енергетичний аналіз

циклів-еквівалентів підтвердив результати розрахунків характеристик дійсної установки, розбіжність у розрахунках не перевищує 2,5%.

5. Внутрішній контроль показав, що низькокиплячий компонент або його власний парціальний тиск вищий за атмосферний і ймовірність його виходу при не щільності вище, а тиск у куполі танка визначається концентрацією низькокиплячого компонента.

6. Метод еквівалентування скорочує шляхи до створення належної стратегії управління роботою установки повторного зрідження для адаптації до змін робочих умов експлуатації.

ОХОРОНА ПРАЦІ

Робота на судах повинна проводитися відповідно до вимог, правил, інструкцій з охорони праці, правил технічної експлуатації суден, інструкцій заводів-виготовлювачів з обслуговування встановлених на судні механізмів, устаткування та пристроїв, технологічних карт, а також документів щодо безпечної експлуатації механізмів, устаткування та пристроїв . Кожен член екіпажу судна повинен бути навчений безпечним способам обслуговування механізмів і пристроїв, що знаходяться в його завідуванні. З метою підтримки в порядку і справності технічні засоби судна, пристрої та засоби боротьби за живучість, обладнання та постачання, індивідуальні та колективні засоби захисту, технічна документація, інструменти, приладдя, а також приміщення розподіляються розпорядчим документом по завідування серед членів екіпажу судна. Будь-які роботи на судні виконуються тільки з дозволу керівника роботи.

Під час шторму вихід, переміщення і роботи на відкритій палубі судна допускаються тільки за розпорядженням капітана. При цьому переміщення повинні відбуватися групою в складі не менше двох осіб з обов'язковим застосуванням рятувальних жилетів, захисних касок і запобіжних поясів зі страхувальними кінцями.

При ремонті двигунів, допоміжних механізмів, електрообладнання, пристроїв і установок повинно бути відключено подається на них харчування (або приводні системи), а на пусковому пристрої цих механізмів і в інших місцях, звідки можливо здійснити пуск (розподільні щити (далі - РЩ), пульти управління, пости керування, рубки), повинні бути вивішені таблички з написом: "Не вмикати - працюють люди". Зняття таблички з таким написом допускається виключно особою, яким вона вивішена. Запуск механізмів (пристроїв) на судні повинен проводитися відповідно до інструкції по експлуатації механізмів (пристроїв) після попередження осіб, що знаходяться поблизу, про майбутній пуск, а також при відсутності на механізмах (пристроях) сторонніх предметів.

Пуск головних двигунів судна, пов'язаний з проверненням гребних гвинтів, при стоянці судна в порту допускається після огляду забортного простору за кормою на предмет відсутності там плавзасобів і людей.

Освітленість робочих місць на судні повинна відповідати вимогам діючих санітарно-епідеміологічних правил і нормативів.

Вимоги, до установок повторного зрідження і охолодження, для перевезення зріджених газів визначаються правилами морського регістру.

На судні має бути передбачено використання не менше двох установок регулювання тиску і температури вантажу, які могли б бути задіяні при будь-якому режимі експлуатації судна. Продуктивність кожної задіяної на судні системи повинна відповідати максимально можливої в нормальній експлуатації інтенсивності випаровування вантажу з усіх танків при максимальній розрахунковій температурі навколишнього середовища, і тиску в вантажний ємності не вище MARVS.

Система охолодження повинна складатися з однієї або декількох установок, здатних підтримувати необхідні тиск і температуру вантажу при максимальній розрахунковій температурі навколишнього середовища. Крім основної повинна передбачатися резервна установка (установки) системи охолодження холодопродуктивністю не менше продуктивності найбільшої установки. Резервна установка повинна включати компресор з приводним двигуном, систему управління і з усією необхідною арматурою для забезпечення роботи незалежно від звичайних установок.

Повинен бути передбачений резервний теплообмінний апарат, якщо основний теплообмінний апарат установки не має надлишкової поверхні теплообміну, що дорівнює принаймні 25% найбільшої необхідної.

Для резервного теплообмінного апарату незалежні трубопроводи не обов'язкові. Якщо поряд з системою охолодження передбачаються інші засоби регулювання тиску і температури вантажу, резервування установки є в кожному випадку предметом спеціального розгляду Регістром.

При одночасному перевезенні двох і більше охолоджених вантажів, які взаємно нерозчинні в умовах перевезення, але при змішуванні виділяють пари, що створюють додатковий тиск, системи охолодження є предметом спеціального розгляду з метою запобігання можливості змішування цих вантажів.

Не допускається розміщення установки повторного зрідження в загальному машинному приміщенні. Якщо установка повторного зрідження розташована в закритому приміщенні, то це приміщення: розглядається як машинне приміщення категорії А; повинно бути обладнане штучної автономної вентиляцією, що забезпечує не менше 30 повітрообміні на годину виходячи із загального обсягу приміщення і використовує не менше двох вентиляторів, які забирають повітря з газобезпеки просторів; прийомні отвори вентиляторів повинні бути обладнані пристроями, що перешкоджають потрапляння вологи і сторонніх предметів; повинно бути обладнане системою виявлення газу.

Вимоги охорони праці при роботах в замкнутих, важкодоступних, погано вентильованих приміщеннях

Все замкнуті, важкодоступні і погано вентильовані приміщення (далі - замкнуті приміщення) на судні (вантажні трюми, паливні та баластні танки і цистерни, насосні і компресорні відділення, простір подвійного дна, кофердамом, сухі відсіки, коробчасті кили, фекальні танки, подпалубне коридори, приміщення для зберігання балонів зі стисненими газами, акумуляторні приміщення, канатні ящики, приміщення газогенераторної станції інертних газів, приміщення зберігання вуглекислоти та інших газів, призначених для пожежогасіння або інертіз ації) становлять небезпеку в зв'язку з нестачею в атмосфері цих приміщень кисню (менше 20%) або наявністю займистих або токсичних газів

Протипожежний захист наливних суден

З усіх видів аварій на танкерах вибухи і пожежі найбільш небезпечні, так як в деяких випадках вони супроводжуються людськими жертвами і пов'язані з величезними руйнуваннями і часто закінчуються загибеллю танкера і вантажу. Якщо вибух або пожежа на танкері відбувається під час стоянки в порту, то можуть постраждати також стоять поруч з аварійним суду і портові споруди. Ці обставини змушують судновласника використовувати на танкерах новітні засоби попередження вибухів і пожеж.

Основними причинами вибухів і пожеж на танкерах є: зіткнення суден, що йдуть з вантажем, в баласті і полубалл астірованних;

іскри, що утворилися при падінні магнієвих протекторів в порожні або промиваються танки;

відкритий вогонь, іскри від електрообладнання в НЕ вантажних приміщеннях, заповнена газом при навантаженні, дегазації, аварії;

розряди статичної електрики, іскри з газовипускних труб танкерів або обслуговуючих їх судів.

При зіткненні завантаженого нафтопродуктами танкера виникає пожежа як на самому судні, так і на розлилися по поверхні води нафтопродуктах. При зіткненні порожніх, полубалластірованних і навіть балластірованних судів відбуваються, як правило, вибухи.

Все наливні судна мають загальну конструктивну протипожежний захист, як і будь-які вантажні судна, в тому числі зі знаком Р.

Відмінною особливістю протипожежного захисту танкерів є коффердампая ізоляція наливних відсіків від машіноо.котельіих відділень, суховантажних трюмів і житлових приміщень, а на суднах, що перевозять вантажі першого розряду, - і від відсіків для суднових запасів палива.

Повітряні коффердамом, як правило, відокремлюють середню надбудову танкера від вантажної палуби і не дають можливості проникнути газам і парам вантажу через вантажну палубу в приміщення надбудови.

Водяні коффердамом, що проходять поперек судна, поділяють його на окремі ділянки і перешкоджають проникненню рідкого вантажу або його газів і парів з танків в суміжні. приміщення іншого призначення. Коффердамом, заповнені водою, перешкоджають поширенню пожежі як з боку вантажних танків, так і в протилежному напрямку. Вентиляційні пристрої водяних коффердамом є і свого роду демпферами, що поглинають пружну енергію мас води з боку відсіку при деформації газонепроникної коффердамом перебирання від вибуху або інших причин, а при впливі вогню заповнені водою коффердамом виконують роль випарної системи.

Функції кофердамом можуть виконувати і насосні відділення (аж до заповнення їх водою).

На танкерах над машинним відділенням розташовуються міцна рубка, що захищає машинокотельні шахти. Житлові приміщення для команди розміщуються в кормі вище верхньої вантажний палуби на 2 м, а службові приміщення - на 1 м.

Вантажні відсіки наливних суден влаштовані так, щоб гази і рідина не затримувалися в кишенях окремих конструкцій набору, т. Е. Частини набору корпусу (стрингери, бімси) мають отвори для стоку Грузії і виходу газів в подпалубне простору до газовідвідним трубах. Частини набору судна, що знаходяться в вантажних танках, щоб уникнути попадання в них вантажу і газу не виконуються зі сталі коробчатого профілю.

Особливу увагу на танкерах звертають на надійність кріплення трапів і трубопроводів в танках. Газовідвідні труби приєднані до самої верхньої частини кожного вантажного відсіку. Труби з декількох танків можуть бути об'єднані в одну або кілька магістралей. Вихідні кінці газовідвідних труб, сполучених з атмосферою, обладнані пламезупинюючими сітками. Труби, введені в загальну магістраль, мають свої вогнеприпинювачів, які розміщені так, щоб рідкий вантаж при будь-яких умовах плавання судна не потрапляв у них.

Розміщення комор і господарських приміщень в насосних відділеннях, а також в приміщеннях, суміжних з вантажними наливними відсіками, не допускається. Опалювальні котли та камбузні плити розміщують тільки в надбудові юта. Не допускається застосування опалювальних котлів, камбузних плит і іншого теплового обладнання, що працюють на вугіллі.

Всередині житлових приміщень, розташованих в кормі судна, а при наявності середньої надбудови - верб цій надбудові, передбачені закриті приміщення для куріння (курильні). Ці приміщення обмежені сталевими перегородками і палубами, а оздоблення та обладнання їх виконані з негорючих матеріалів.

Вантажні операції з небезпечними вантажами на наливних судах і газовозах

Процес вантажних операцій найбільш вибухонебезпечний, в зв'язку з чим до його початку проводять такі заходи.

Екіпаж сповіщають по радіотрансляції або іншими засобами про майбутню вантажний операції і правилах куріння на судні. Сторонні особи залишають судно. Поблизу трапа на причалі поміщається аншлаг про заборону куріння. Припиняють на судні роботи із застосуванням відкритого вогню. Робота механізмів і камбуза на цих судах може бути дозволена тільки при наявності справних іскрогасників на трубах і випускних колекторах.

Задраюють все закриття, включаючи ілюмінатори як з боку борту, з якого повинні проводитися вантажні операції, так і з боку вантажних танків. Закривають пробками бортові шпігати щоб уникнути стікання за борт пролилася вантажу.

Забезпечують можливість швидкої віддачі швартовів і готують аварійні буксирні троси з носа і корми, необхідні для швидкого відводу танкера при виникненні пожежі на причалі або на судні. Стояночна аварійна партія (група) повинна бути готова до збору за загально суднової тривозі.

Протипожежне майно і стаціонарні системи пожежогасіння приводять в готовність до негайної дії. На вантажних палубах повинні бути прокладені

рукавні лінії зі стволами і приготований інвентар, а поблизу з'єднань вантажних шлангів повинен бути запас піску.

Підготовка вантажний системи полягає: в закритті всіх забортних кінгстонах клапанів, з'єднаних з вантажною системою; в закритті кришок вхідних горловин, горловин для миття танків, вимірювальних отворів і оглядових вікон; у відключенні всіх невикористаних вантажних трубопроводів, в тому числі кормових.

Відкривають клапани вентиляційної системи.

Перевіряють справність приладів освітлення на вантажних палубах, вони повинні бути вибухобезпечного виконання. Поблизу вантажних палуб і місць, де можуть накопичуватися паронафтові гази, не повинно бути з'єднань електричного кабелю (при харчуванні танкера електроенергією з берега). Судно і вантажні шланги повинні бути надійно заземлені.

Судно повинне мати надійний зв'язок з береговою базою, звідки подається вантаж. Піднімають прапорний сигнал Б днем або включають ліхтар червоного кольору кругового освітлення в темний час доби з початком вантажний операції.

Після виконання зазначених заходів дозволяється прийом (передача) вантажних шлангів на танкери.

Після закінчення вантажний операції необхідно перевірити, щоб всі отвори танків, головні газові клапани вентиляції танків були надійно задраєно, а дихальні клапани і пламеудовітелі знаходилися в робочому стані.

При перекачуванні (прийомі) вантажу на несамохідні баржі та прийомі бункера з бункерувальників швартування суден до борту повинна здійснюватися за допомогою рослинних тросів. Швартови закріплюють так, щоб рослинні троси можна було швидко перерубати в разі пожежі на баржі або бункерувальники, а сталевий трос використовувати для їх відводу від борта після прибуття плавзасобів; для перерубания тросів на палубі повинні бути сокири. Баржі і бункеровальники негайно відводяться від борта по завершенні вантажний операції.

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

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).

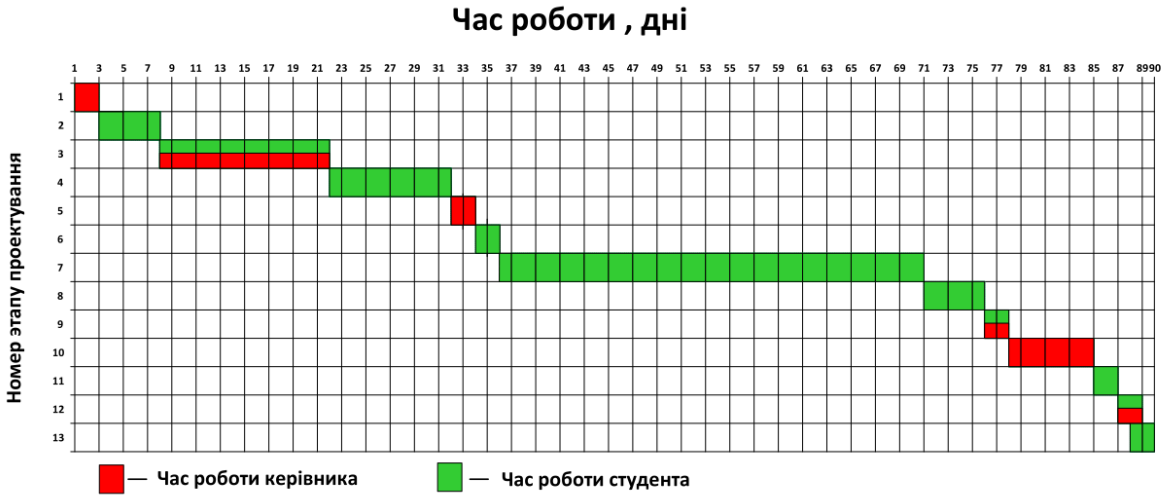

Рисунок 13 – Стрічковий графік виконання роботи

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:

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

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.

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

$З_{кер} = \frac{12800}{22} \cdot 29 = 16872,72$ гр – зарплата керівника;

$З_{ст} = \frac{2500}{22} \cdot 77 = 8750$ гр – зарплата здобувача.

Витрати на заробітну плату:

$\sum З = З_{кер} + З_{ст} = 16872,72 + 8750 = 25622,72$ гр.

Додаткова зарплата становить 15% від основної суми:

$З_{дод} = \sum З \cdot 0,15 = 25622,72 \cdot 0,15 = 3843,408$ гр.

Фонд оплати праці:

$Ф_{зп} = З_{дод} + \sum З = 20774,95 + 3116,24 = 23891,191$ гр.

Загальні прямі витрати

$\sum В_{пр} = Ф_{зп} + \sum В = 23891,191 + 2769,6 = 26660$ гр

Таблиця 11 – Необхідні витрати

Назва витратних позицій	Сума, гривень.	Відсоток
Матеріальні витрати, $\sum В$	2769,6	5
Витрати на заробітну плату, $Ф_{зп}$	23891,191	95
Загальна вартість, $\sum В_{пр}$	26660	

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Lee, D.-H.; Ha, M.-K.; Kim, S.-Y.; Shin, S.-C. Research of design challenges and new technologies for floating LNG. Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng. 2014, 6, 307–322. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
2. https://www.wlpga.org/wp-content/uploads/2018/10/The-role-of-LPG-in-shaping-the-energy-transition-2018.pdf
3. https://www.globenewswire.com/en/news-release/2023/09/22/2747808/0/en/Liquefied-Petroleum-Gas-LPG-Market-Size-380363-54-Billion-by-2031-at-CAGR-of-7-21-CAGR-which-is-Booming-Strong-Growth-in-the-Globe-till-2031.html.
4. IMO. International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC Code) 2008, MSC.5. Available online: https://puc.overheid.nl/nsi/doc/PUC_2389_14/7/ (accessed on 17 February 2022).
5. Barbara J. Finlayson-Pitts, James N. Pitts, HAPTER 16 - Applications of Atmospheric Chemistry: Air Pollution Control Strategies and Risk Assessments for Tropospheric Ozone and Associated Photochemical Oxidants, Acids, Particles, and Hazardous Air Pollutants/
6. https://owaysonline.com/cargo/containers/tankers/
7. Mc Guire J.J., White B., Liquefied gas handling principles on ships and in terminals, Witherby & Co, London 2000
8. Saputra, S., Supramono, D., 2019. Optimization of Propane Reliquefaction Cycle in LPG Plant. 2019 IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD), Jakarta, Indonesia, 28-30 June. pp. 1-6.
9. Nanowski, D. The comparison of theoretical to practical cargo loading rate of butane–analysis of LPG carrier reliquefaction plant. J. KONES Powertrain Transp. 2013, 20, 227–231. [Google Scholar] [CrossRef]

10. Tong, Z.; Zhou, B.; Zhu, J.; He, J.; Bao, J. Cold half pressure type of LPG ships and thermodynamic study of its reliquefaction system. J. Univ. Shanghai Sci. Technol. 2015, 37, 344–349. [Google Scholar]

11. Chien, M.H.; Shih, M.Y. An Innovative Optimization Design for a Boil-off Gas Reliquefaction Process of LEG Vessels. J. Pet. 2011, 47, 65–74. [Google Scholar]

12. Li, Y.; Jin, G.; Zhong, Z. Thermodynamic Analysis-Based Improvement for the Boil-off Gas Reliquefaction Process of Liquefied Ethylene Vessels. Chem. Eng. Technol. 2012, 35, 1759–1764. [Google Scholar] [CrossRef]

13. Berlinck, E.C.; Parise, J.A.R.; Pitanga, M.R. Numerical simulation of an ethylene re-liquefaction plant. Int. J. Energy Res. 1997, 21, 597–614. [Google Scholar] [CrossRef]

14. Nanowski, D. The Influence of Incondensable Gases on the Refrigeration Capacity of The Reliquefaction Plant During Ethylene Carriage by Sea. J. KONES Powertrain Transp. 2016, 3, 359–364. [Google Scholar] [CrossRef]

15. Gómez, J.R.; Gómez, M.R.; Garcia, R.F.; Catoira, A.D.M. On board LNG reliquefaction technology: A comparative study. Pol. Marit. Res. 2014, 21, 77–88. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]

16. Chibundo Princewill, Nwadinobi & Ubasom, Kanu & Ononogbo, Chibuike. (2023). Liquefied Petroleum Gas (LPG) Storage Tanks Boil-off Gas Generation and Management– Review. International Journal of Advanced Science and Engineering. 10. 3294-3303. 10.29294/IJASE.10.1.2023.3294-3303.

17. Suprapti, F., Susanto, S., Herdawan, D., & Anggoro, R. (2023). Optimization of Reliquefaction System on Gas Carrier to Maintain The Condition and Temperature of Cargo Tank. Dinamika Bahari, 4(1), 51-57. https://doi.org/10.46484/db.v4i1.351.

18. Vorkapić, Aleksandar, et al. "The analysis of the maintenance systems of a LPG carrier's liquefaction system main components." Pomorstvo, vol. 31, br. 1, 2017, str. 3-9. https://doi.org/10.31217/p.31.1.2. Citirano 14.05.2022.

19. Kwak, D.-H.; Heo, J.-H.; Park, S.-H.; Seo, S.-J.; Kim, J.-K. Energy-efficient design and optimization of boil-off gas (BOG) re-liquefaction process for liquefied natural gas (LNG)-fuelled ship. Energy 2018, 148, 915–929. [Google Scholar] [CrossRef]

20. Tan, H.; Shan, S.; Nie, Y.; Zhao, Q. A new boil-off gas re-liquefaction system for LNG carriers based on dual mixed refrigerant cycle. Cryogenics 2018, 92, 84–92. [Google Scholar] [CrossRef]

21. SIGTTO Liquefied Gas Handling Principles on Ships and in Terminals, (LGHP4) 4th Edition. ISBN: ISBN 13: 978-1-85609-714-7 (9781856097147), ISBN 10: 1-85609-714-5 (1856097145), Number of, July 2016 . P.– 568

22. VesselFinder. LEGACY, LPG Tanker, IMO 9893656. 2023. Available online: https://www.vesselfinder.com/vessels/details/9893656 (accessed on 8 September 2023).

23. McGuire, J.J.; White, B. Liquefied Gas Handling Principles on Ships and in Terminals; Witherby & Co.: London, UK, 2000. [Google Scholar]

24. Burckhardt Compression. LABY® COMPRESSORS. 2023. Available online: https://www.burckhardtcompression.com/solution/compressor-technologies/laby-compressor/ (accessed on 15 September 2023).

25. Yaws, C.L. Thermophysical Properties of Chemicals and Hydrocarbons, 2nd ed; William Andrew: Norwich, NY, USA; pp. 1–991.

26. Lemmon, E.W.; Bell, I.H.; Huber, M.L.; McLinden, M.O. Reference fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP); NIST Standard Reference Database 23. Version 10.0; National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, USA, 2018. [Google Scholar]

27. Tchoń, K. The method of equivalence in robotics. In Systems: Theory and Practice; Albrecht, R., Ed.; Advances in Computing Science; Springer: Vienna, Austria, 1998; Available online: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7091-6451-8_12 (accessed on 17 September 2023).