

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



ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної роботи

На тему: «Моделювання термодинамічних характеристик процесу розширення газу в детандері кріогенної установки»

Здобувача Паніч А.І.
(прізвище, ініціали)

4 курсу ЕН-142 групи

Керівник доц. Грудка Б.Г.
(посада, прізвище та ініціали)

Консультанти: проф. Морозюк Л.І.
(посада, прізвище та ініціали)

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від _____ 2026 р., протокол № _____

Завідувач кафедри КТ _____ **Юрій СИМОНЕНКО**

Одеса - 2026 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНСТИТУТ ХОЛОДУ, КРІОТЕХНОЛОГІЙ ТА ЕКОЕНЕРГЕТИКИ ІМ. В.С. МАРТИНОВСЬКОГО

Кафедра	Кріогенної техніки
Ступінь вищої освіти	Бакалавр
Спеціальність	142 «Енергетичне машинобудування»
Освітня програма	Холодильні машини, установки і кондиціонування повітря»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КТ

д.т.н., проф. Симоненко Ю.М

«__» ____ 2026 року

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

Паніча Андрія Ігоровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи	Моделювання термодинамічних характеристик процесу розширення газу в детандері кріогенної установки
----------------	--

керівник роботи	к.т.н., доц. Грудка Богдан Геннадійович (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
-----------------	--

затверджені наказом вищого навчального закладу	від 31 жовтня 2025 року № 613-03
--	----------------------------------

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи	01 червня 2026 року
--	---------------------

3. Вихідні дані до роботи:	Установка для виробництва зрідженого діоксиду вуглецю, температури зрідження -20 і -45 °С, масова витрата CO ₂ в технологічному процесі 1 кг/с. У верхньому каскаді використати дві природні робочі речовини: аміак і пропан.
----------------------------	---

4. Перелік питань, які потрібно розробити:	Вступ. Створення розрахункової схеми детандеру. Розробка термодинамічної моделі детандеру. Розробка алгоритмів термодинамічних розрахунків процесів розширення газів у детандерах. Аналітичне дослідження особливостей ексергетичного ККД детандеру. Вибір рівняння стану робочої речовини. Розробка питань економіки та охорони праці, результати і висновки роботи, список використаної літератури
--	--

5. Перелік графічного матеріалу:	Презентація Power Point (10 слайдів)
----------------------------------	---------------------------------------

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

7. Дата видачі завдання 01.12.2025

Керівник _____ доц. Грудка Б.Г.
Завдання прийняв до виконання _____ Паніч А.І.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вивчення технічного завдання	5 днів	
2	Огляд і аналіз літератури	30 днів	
3	Розробка математичної моделі об'єкта	10 днів	
4	Адаптація методів дослідження до практичного застосування	15 днів	
5	Теплові і конструктивні розрахунки елементів об'єкта	10 днів	
6	Розробка креслень і графічних моделей	20 днів	
7	Аналіз результатів досліджень	8 днів	
8	Оформлення пояснювальної записки	5 днів	
9	Обговорення та затвердження результатів роботи	5 днів	
10	Підготовка матеріалів роботи до захисту	5 днів	

Здобувач-дипломник _____ Паніч А.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Грудка Б.Г.
(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 _____ Паніч А.І.
(ПІБ) (підпис)

АНОТАЦІЯ

Дипломна робота присвячена дослідженню особливостей процесів розширення газів в детандерах кріогенних установок. Зокрема це стосується загально прийнятого на практиці поняття ексергетичного ККД детандера. В роботі доведено, що це поняття відображає не ексергетичний баланс розглянутої машини, штучний показник, що застосовується для розрахунків процесів у детандері.

В роботі створені блок-схеми алгоритмів розрахунків розширень газу и детандері. Вони вирізняються різними постановками задач. У звичайному детандері визначеною вузловою точкою є стан газу на вході в детандер, а гелієвого детандера – на виході з нього. Ця різниця суттєво змінює алгоритми розрахунків.

Розглянуте програмне забезпечення, яке створено на кафедрі кріогенної техніки, що застосовується для моделювання процесів розширення чистих речовин у детандері.

Ключові слова: кріогенна система, моделювання, термодинамічні властивості, ККД детандера, ексергія.

ABSTRACT

Qualification work is devoted to the study of the peculiarities of the processes of gas expansion in the expanders of cryogenic plants. In particular, this applies to the generally accepted in practice the concept of exergetic efficiency of the expander. The paper proves that this concept does not reflect the exergetic balance of the considered machine, the artificial indicator used for calculations of processes in the expander.

The block diagrams of algorithms for calculating gas expansions and expanders are created in the work. They differ in different problem statements. In a conventional expander, the defined nodal point is the state of the gas at the inlet to the expander, and the helium expander at the outlet. This difference significantly changes the calculation algorithms.

The software created at the Department of Cryogenic Engineering, which is used to model the processes of expansion of pure substances in the expander, is considered.

Key words: cryogenic system, modeling, thermodynamic properties, expander efficiency, exergy.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ПРОЦЕСИ В ПОРШНЕВИХ ГЕЛІЄВИХ ДЕТАНДЕРАХ.....	15
2. РОЗРАХУНОК ПРОЦЕСІВ В ДЕТАНДЕРАХ	20
2.1. Способи подання ККД детандера	20
2.2. Порівняння різних термодинамічних показників детандера	25
3. ПОСТАНОВКИ ЗАВДАННЯ І АЛГОРИТМИ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ ПРОЦЕСІВ В ДЕТАНДЕРАХ	29
3.1. Термодинамічна модель детандера	29
3.2. Алгоритм розрахунку процесу в детандері при відомих термодинамічних параметрах перед ним.....	30
3.3. Алгоритм розрахунку процесу в детандері при відомих термодинамічних параметрах після нього.....	33
4. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОБОЧИХ ТІЛ	36
5. ОХОРОНА ПРАЦІ	44
5.1. Техніка безпеки при роботі з гелієм	44
5.2. Випробування системи на щільність	48
5.3. Розрахунок вентиляції приміщення	48
5.4. Розрахунок штучного освітлення	50
5.5. Розрахунок системи заземлення	51
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ.....	56
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	57
ДОДАТОК А.....	58

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16								
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата									
Розраб	Паніч А.І.				Моделювання термодинамічних характеристик процесу розширення газу в детандері кріогенної установки				Литера	Арк.	Архи.		
Пров	Грудка Б.Г.								у		6	76	
									ЕН-142				
Н. Контр.	Грудка Б.Г.												
Утв													

ВСТУП

Кріогенна техніка - це галузь техніки, пов'язана з досягненням і практичним використанням кріогенних температур [1-4]. Кріогеніка включає в себе дослідження, розвиток і застосування кріогенної техніки. Слово «кріогенний» в перекладі з грецького означає «продукує холод», але в даний час цим терміном визначають не просто процеси, пристрої, дослідження в області температур нижче температури навколишнього середовища, а тільки лише такі, які пов'язані з отриманням температур нижче 120 К.

До середини ХХ століття низькі температури отримували в основному при дослідженні властивостей різних газів, отриманні їх в рідкому і твердому станах. З 50-х років ХХ століття інтерес дослідників торкнувся і безпосередніх отримання наднизьких температур. В даний час в імпульсній режимі отримані температури близько 10-8 К, в стаціонарному - близько 10-3 К.

Історія низькотемпературної техніки почалася в ХVІІІ столітті, саме в той час передова наукова думка торкнулася проблеми охолодження. Великий російський вчений М. В. Ломоносов в середині ХVІІІ століття писав: «Перша і нижня температурна область починається від самого нижнього градуси тепла, або що те саме - від найбільшого градусу холоднечі, який поки не показаний. Вона закінчується при температурі починається замерзання води ... ».

Наступний крок у розвитку кріогеніки як науки відбулося в 1877 році науковими працями інженера Кайете. Луї-Поль Кайете (1832-1913) - французький гірський інженер, який працював на чавуноливарному заводі. Спочатку Кайете досліджував ацетилен, намагаючись його перевести в рідкий стан. Прилад складався з товстостінної скляної трубки, в якій досліджуваний газ стискався стовпчиком ртуті, на яку, в свою чергу, чинила тиск вода, накачують водяним насосом. Під час одного з дослідів ще при тиску, при якому ацетилен не міг бути зріджений, зірвало запірний водяний кран і вода під тиском стисненого газу частково вилилася з установки.

Одночасно в трубці з'явився туман, який Кайете спочатку порахував Сконденсована домішками в ацетилені, наприклад, водою. Повторивши

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		7

«невдалий» досвід з ретельно очищеним ацетиленом, слідчий отримав той же результат - туман в трубці. Кайете зрозумів, що це не домішки, а сам ацетилен ожіжаючого при низькому тиску. Так був відкритий метод охолодження газу при його розширенні з віддачею зовнішньої роботи, тобто його установка була прообразом детандера, правда, працюють одноразово.

Зріджений водень і отримати його у вигляді рідини вдалося в 1898 році англійському фізику Джеймсу дьюар. Надалі кріогеніка стала розвиватися за трьома напрямками: перший - це прагнення якомога ближче підійти до абсолютного нуля; друге - досліджувати процеси і властивості речовин, що мають місце в низькотемпературної області; третє - завдання промислового використання результатів, досягнутих в перших двох напрямках.

Дослідником і інженером, який пішов третім шляхом, був німецький вчений Карл фон Лінде. У 1872 році він працює ординарним професором в Мюнхенському політехнікумі і займається створенням надійних холодильних машин, наприклад, в 1875 році йому вдалося довести до промислового виробництва спроектовану їм аміачну компресорну холодильну машину. Не припиняючи займатися розробкою і виробництвом холодильних машин, Лінде починає в 1890 році дослідження з метою створення установок скраплення і поділу повітря. Він розумів, що методи, які використовували його попередники, засновані на одноразовому використанні охолоджує суміші і випарного охолодження, не годяться для вирішення поставлених завдань, необхідно переходити до безперервного циклу, подібної до тої, що застосовується в аміачних парокомпресорних холодильних машинах. Ідея про каскаді декількох холодильних машин була їм відкинута, він знайшов інше рішення, об'єднавши ідею Сіменса про регенерації з комбінованим компресорним циклом.

У нижній частині циклу Лінде запропонував використовувати дросель та випарне(або дросель і збірник рідини в ожіжительном режимі), а у верхній - рекуперативний теплообмінник і компресор з кінцевим холодильником. З тих пір цей цикл зайняв міцне становище в кріогенної техніки і носить ім'я Лінде.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		8

У 1895 році отримав патент на створення ожіжителя повітря англійський інженер Вільям Хемпсон, причому він отримав його на два тижні раніше, ніж Лінде. Але ідеї Лінде і Хемпсона відрізнялися. Перш за все, у Хемпсона не було чіткої вказівки на те, яким чином розширювати газ в циклі. Друга відмінність полягала в конструкціях рекуперативних теплообмінників, і тут ідея Хемпсона виявилася кращою: у теплообміннику Лінде зворотний потік повітря проходив уздовж трубок в кільцевому зазорі, а в теплообміннику Хемпсона - поперек трубок в міжтрубному просторі. В останньому випадку трубки турбулізованим потік, завдяки чому теплообмінник Хемпсона був компактніше і легше теплообмінника Лінде. Виходячи з того, що Лінде і Хемпсон запропонували схожі цикли майже одночасно, іноді регенеративний дросельний цикл називають ім'ям Лінде - Хемпсона. Лінде не вступав в дискусії щодо пріоритету заявлених циклів, він зосередився на вдосконаленні очищення повітря від шкідливих для його зрідження домішок, зниження масогабаритних характеристик установок, і головне - на ідеї поділу повітря після зрідження, отриманні кисню та азоту.

Різну випаровуваність кисню та азоту з рідкого повітря від-метил вперше в 1892 році Д. Дьюар. Першу промислову установку для отримання газоподібного кисню першим створив в 1902 році К. Лінде. В установці після рекуперативного трьохпоточна теплообмінника він запропонував колону одноразової ректифікації.

У 1907 році К. Лінде запропонував колону дворазовою ректифікації, яка і зараз, через століття, застосовується у всіх промислових повітророздільних установках. Звичайно, вона була кілька вдосконалена, але основна ідея збереглася: процес поділу йде в дві стадії, спочатку в нижній колоні отримують чистий рідкий азот і повітря, збагачене киснем, потім у верхній колоні отримують кисень і газоподібний азот. У колоні дворазовою ректифікації як нагрів, що забезпечує освіту пара, так і конденсація, що забезпечує наявність рідини в колоні, реалізуються без підведення і відведення тепла ззовні. Теплообмінний апарат, який би з'єднав обидві колони і називається конденсатором-випарником, служить конденсатором для азоту, забезпечуючи постачання рідиною обох колон, і випарником для кисню, забезпечуючи наявність потоку пара у верхній колоні.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
						9
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Тільки тиску повинні бути різними: в нижній колоні 0,5-0,6 МПа, у верхній - 0,13-0,15 МПа для забезпечення процесу конденсації. Тиск в нижній колоні підтримується при цьому автоматично: якщо воно знизиться, то конденсація припиниться і утворився надлишок газоподібного азоту сам підніме тиск.

Ще одним талановитим вченим і інженером був француз Клод, він почав займатися зрідження повітря з 1896 року. У своєму циклі він після компресора і рекуперативного теплообмінника ділив потік на дві частини: одна прямувала на детандер, де розширювалася, знижуючи свою температуру, інша йшла через теплообмінник противотоком до детандерна потоку, після чого дросселировалась і зріджується. Продуктивність установки була 25 л / год по рідкому повітря, т. Е. Більше, ніж ожіжителя Лінде, продуктивність якого була 8 л / год. Детандер в циклі Клода виконував роль пароконпресорної холодильної машини в удосконаленому циклі Лінде, але холодильна машина вимагає витрати енергії на її функціонування, а детандер, навпаки, повертає частину роботи, витраченої на стиск. Надалі Клод і Лінде використовували в своїх установках досягнення один одного: Клод застосовував колону дворазовою ректифікації, а Лінде використовував працездатний детандер, розроблений Клодом.

У 1908 році Клод виділив з-під кришки конденсатора-випарника неон-гелієву суміш і частково розділив її низькотемпературної адсорбції при температурі рідкого повітря на активованому вугіллі. Лінде же в 1915 році створює першу установку для виробництва, поряд з киснем, аргону, який проводився ректифікацією аргонової фракції, що відбирається з верхньої колони.

В ряду тих, хто вніс вагомий вклад в криогенну техніку, слід зазначити двох талановитих німецьких винахідників та інженерів П. Гейландта і М. Френкла. Пауль Гейландт в 1908 році запатентував зріджувач повітря, який реалізує важко-детандерна цикл, але на відміну від Клода, високого тиску. Повітря на детандер відбирався при температурі навколишнього

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
						10
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

середовища, що дало можливість змащувати детандер маслом і не ізолювати циліндр детандера.

Цей цикл дозволив згодом створити повітророзподільну установки, які перевершували системи Клода по ефективності. М. Френкл в 1925 році подав заявку на Повітророзподільну установку з перемикаються регенераторами з металевою насадкою. Ці апарати призначалися як для регенеративного теплообміну, так і для осушення і очищення повітря в установках.

До середини минулого століття кріогенна техніка вийшла за стіни лабораторій, і в наш час її застосування є важливим напрямком технічного прогресу в самих різних галузях народного господарства. Металургія і хімія, енергетика і електроніка, ракетна техніка і медицина, біологія та космонавтика, ядерна фізика та техніка експерименту все більше використовують кріогенне устаткування і продукти.

В даний час практичне використання мають низькі температури, починаючи з 0,3 К, адже саме до таких температур необхідно охолодити чутливі елементи космічних радіотелескопів. Діапазон від 0,3 до 165 К пов'язаний з практичним використанням багатьох промислових газів, які широко застосовуються в металургійній і хімічній промисловості, авіації, ракетобудуванні, оборонної промисловості, біології, медицині, електроніці, будівництві, енергетиці. У цьому ж температурном діапазоні лежать вирішення багатьох завдань по криостатировання, застосування мікрокриогенної техніки.

Останнім часом значно розширився діапазон температур, які використовуються для зберігання біоматеріалів, продуктів харчування. За останні 40 років намітився значний приріст виробництва основних технічних газів: кисню - більше ніж в 5 разів, азоту - більш ніж в 40 разів, аргону - більш ніж в 7 разів. У кілька разів за останнє десятиліття зросло виробництво рідкісних газів - гелію, неону, криптону, ксенону.

Кріогеніка вже досить давно знайшла широке застосування в біології та медицині. Для консервації та довготривалого зберігання крові та її складових, кісткового мозку, тканин застосовуються кріогенні технології. Більш високих

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
						11
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

температур, що представляють вже область помірного холоду, для подальшого відновлення їх функцій при відігріванні. З 70-х років кріогеніка застосовується в медицині для проведення кріохірургічних операцій, що дозволяє прискорити загоєння рани і скоротити післяопераційний період, а також для проведення кріодеструкції новоутворень (після нагрівання відповідають області до 42 ° С струмами НВЧ).

З недавнього часу стала розвиватися кріотерапія, зокрема, застосовуються кріосауни з азотними температурами (-180 ... -130 ° С) для реабілітації людини після ряду захворювань і взагалі активізації внутрішніх захисних сил організму. Рішення всіх цих завдань вимагало створення спеціального обладнання, такого, наприклад, як апарати програмного заморожування, кріогенні посудини і резервуари, кріохірургічні зонди.

Кріогеніка може застосовуватися в харчовій промисловості для швидкісного заморожування харчових продуктів, перевезення швидкопсувних вантажів. Кріогенна техніка безпосередньо пов'язана з виробництвом, транспортуванням, зберіганням та використанням промислових газів, в тому числі рідкісних, завдяки досягненням кріогеніки, за допомогою технічних газів були розроблені нові високі технології, в тому числі для електронної промисловості, енергетики, хімії.

Розвиток космічної галузі взагалі неможливо уявити без кріогеніки, адже її досягнення використовуються там дуже широко - від виробництва сучасних приладів і засобів космічного зв'язку до забезпечення руху як супутників і космічних кораблів, так і ракет-носіїв.

Кріогенна техніка може допомогти також і в рішенні енергетичної проблеми. Зараз увагу світової спільноти звернуто на пошуки заміни традиційних видів палив: нафти, вугілля, природного газу. Однією з можливостей заміни є використання водню. З початку ери освоєння космосу рідкий водень використовується як паливо для ракет-носіїв. Це висококалорійне і екологічно чисте паливо, адже продуктом його згоряння є вода. Уже зараз рідкий водень

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		12

застосовується в дослідних зразках автотранспорту, можливо його застосування в авіації та інших галузях.

Останнім часом з'явилися і нові області застосування кріогенної техніки в енергетиці, в числі яких створення і доведення до промислового використання екологічно чистіших термоядерних реакторів на He3 , застосування рідкого метану в авіації, очищення повітря від радіоактивних продуктів за допомогою адсорбції і ректифікації при переробці відходів ядерних палив (наприклад, Kг-85). Крім того, в даний час ведуться роботи по дослідженню нових поколінь енергетичних і транспортних установок, що реалізують принципово нові моделі силових взаємодій.

Бурхливий розвиток цивілізації на нашій планеті поставило на передню план проблему захисту навколишнього середовища, яка з кожним роком стає все гостріше. Не викликає сумнівів, що в зв'язку з цим роль ряду промислових газів, таких, як метан, водень, гелій, пропан, бутан, озон, неон, буде неухильно зростати і кріогенна техніка може внести вклад в справу захисту середовища проживання людини. Кріогеніка має пряме відношення до виробництва озону, за допомогою якого можна вирішити проблему очищення стічних вод шляхом їх озонування. Досягнення кріогеніки використовуються для очищення шкідливих газових викидів, зокрема, для низькотемпературної конденсації аміаку, оксидів азоту, вуглецю, низькотемпературної сорбції шкідливих домішок, десублімації домішок в умовах низьких температур.

Кріогенна техніка використовується в самих різних галузях сучасного виробництва. Кріогеніка стала засобом для створення нових способів отримання енергії, матеріалів і технологій, необхідних людині. З усією визначеністю можна сказати, що в міру вдосконалення техніки і технології отримання низьких температур, у міру розвитку існуючих і відкриття нових способів отримання холоду роль кріогенної техніки буде неухильно зростати.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		13

У даній роботі основна увага приділена розгляду гелієвих детандерів, так як для цієї області кріогенних температур найбільш яскраво проявляються переваги детандерів в порівнянні з іншими елементами, які використовуються в процесах внутрішнього охолодження.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		14

1. ПРОЦЕСИ В ПОРШНЕВИХ ГЕЛІЄВИХ ДЕТАНДЕРАХ

Так як в кріогенних гелієвих установках в основному використовуються поршневі детандери, то далі розглядаються процеси і конструктивні особливості такого типу детандерів. Ідея створення машин для охолодження газу при адіабатному розширенню виникла ще на початку XIX століття. Але тільки в 1902 - 1904 рр. французьким ученим Жаком Клодом був створений перший працездатний поршковий детандер. Детандер Клода працював на повітрі при тиску 4,0 МПа, попередньо охолоджену до температури (133 - 138 К) і призначався для кисневих установок середнього тиску.

У 1907 - 1915 рр. в Німеччині Гейляндт розробив і здійснив установку для зрідження повітря з поршковий розширювальної машиною високого тиску. У детандер поступало повітря при тиску приблизно 16,0 МПа і температурі, близької до температури навколишнього середовища.

Перший гелієвий низькотемпературний поршковий детандер був створений в 1934 році видатним радянським вченим, академіком П.Л. Капицею. Роботи Клода, Гейляндта, Капіци про поршневі детандер з'явилися початком широкого застосування їх в кріогенної техніки.

Розширення газу в поршковому детандере відбувається за рахунок прямого зміни його обсягу в результаті руху поршня в циліндрі й характеризується робочим процесом (робочої діаграмою), яка показує зміну тиску газу в циліндрі при зміні його об'єму (або в залежності від ходу поршня).

Принцип роботи поршневого детандера і основні його елементи пояснюються на рис. 1, де представлені теоретична діаграма робочого процесу і схематично основні елементи поршневого детандера.

Основними елементами поршневого детандера є: 1 - циліндр; 2 - поршень; 3 - робочий об'єм; 4, 5 - клапани впускний і випускний разом з приводом клапанів або механізм газорозподілу; 6 - поршневе ущільнення; 7 - шток; 8 - крейцкопф; 9 -

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
						15
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

шатун; 10 - кривошип; 11 - генератор для відбору потужності. Елементи з 7 по 11 називають також механізмом руху поршневого детандера.

Закриття і відкриття клапанів в поршневих детандерах, як правило, здійснюється примусово, від спеціального механізму - приводу клапанів. У сукупності клапани і їх привід називаються механізмом газорозподілу. Однак є детандери і без клапанного газорозподілу. Їх замінюють спеціальні вікна або отвори, які в необхідні моменти перекриваються і відкриваються при русі поршня або іншого механізму. Тому під механізмом приводу клапанів або механізмом газорозподілу будемо розуміти клапани і їх привід або систему отворів, вікон і клапанів в циліндрі і поршні машини.

Ізоентропійним або ідеальне розширення газу, а поршневому детандере можна реалізувати тільки в разі, якщо в ньому відсутнє шкідливе простір, теплообмін газу з навколишнім середовищем, гідравлічний опір в клапанах і забезпечується повне розширення газу в межах заданих тисків. Такий детандер можна назвати ідеальним. Робочий процес ідеального детандера представлений діаграмою, зображеної на рис. 1

Він складається з трьох окремих процесів: 1'-2' - процесу наповнення, який протікає при постійному початковому тиску і постійній початковій температурі. Поршень в цей час рухається вправо, збільшуючи робочий об'єм; 2'-4' - ізоентропійного розширення від і до кінцевих тиску і температури, поршень продовжує рух вправо; 4'-5' - процесу виштовхування розширеного і охолодженого газу при постійних кінцевих тиску і температури, поршень в цей час рухається в зворотному напрямку. При ідеальному процесі впускний клапан відкривається в момент, відповідній на діаграмі точці 1', і закривається в момент, відповідній точці 2'. Розширення газу в процесі 2'-4' відбувається при закритих клапанах. Випускний клапан відкривається в момент, відповідній точці 4', після чого поршень 2 починає рух в зворотному напрямку і виштовхує розширений і охолоджений газ з циліндра через відкритий випускний клапан в трубопровід. У момент, відповідний точці, випускний клапан закривається і одночасно

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		16

відкривається впускний клапан, після чого робочий процес ідеального детандера повторюється.

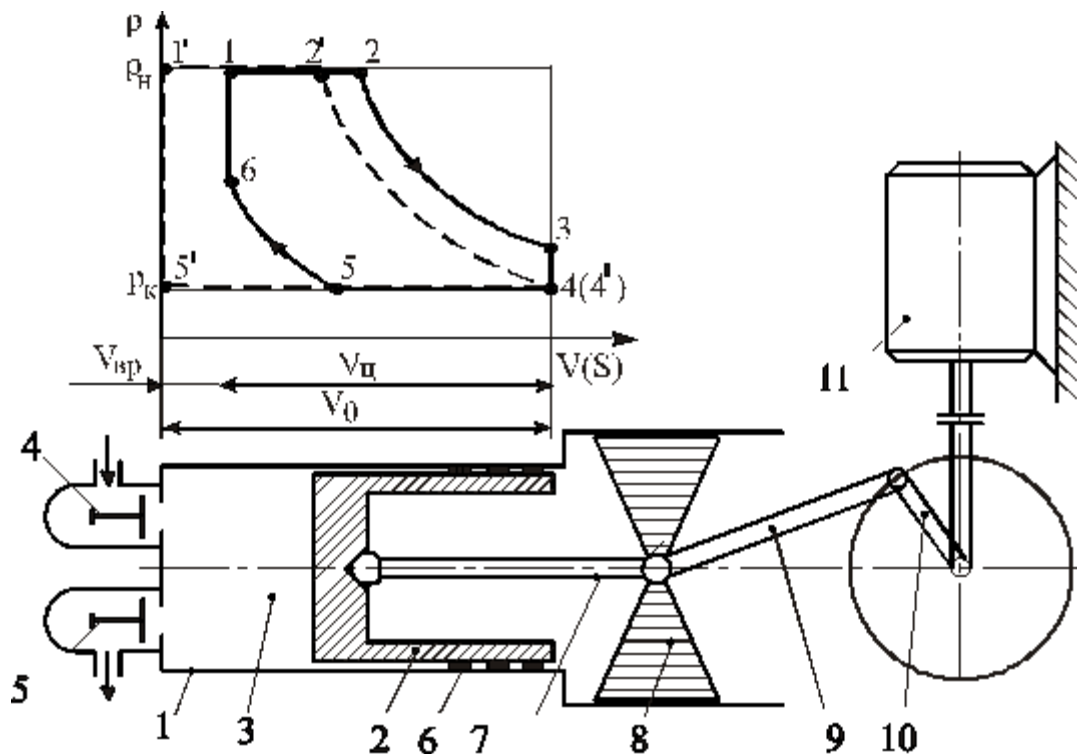


Рис. 1. Теоретична діаграма робочого процесу і основні елементи поршневого детандера: 1 - циліндр; 2 - поршень; 3 - робочий об'єм; 4 - впускний клапан; 5 - випускний клапан; 6 - поршневе ущільнення; 7 - шток; 8 - крейцкопф; 9 - шатун; 10 - кривошип; 11 - генератор для відбору потужності

Реальні процеси в поршковому детандере істотно відрізняються від ідеального. На рис. 1 показана також теоретична діаграма клапанного поршневого детандера, що має шкідливий обсяг, який від обсягу, описуваного поршнем, становить від 4 до 12% в клапанному детандері, а саме:

$$V_{\text{вп}} = (0,04 - 0,12)V_{\text{ц}}$$

Повний робочий об'єм дорівнює сумі

$$V_0 = V_{вр} + V_{ц}$$

Описуваний обсяг поршнем визначається внутрішнім діаметром циліндра d і ходом поршня S .

$$V_{ц} = \frac{\pi d^2}{4} S$$

Теоретична діаграма включає в себе шість окремих процесів (рис. 1). Це процеси: 1 - 2 наповнення циліндра стисненим газом при початковому тиску, коли впускний клапан відкритий; 2 - 3 - розширення стисненого газу від початкового тиску до проміжного, коли обидва клапани закриті; 3 - 4 - процес вихлопу газу при відкритому в т.3 випускному клапані; 4 - 5 - виштовхування розширеного газу в трубопровід при відкритому випускному клапані; 5 - 6 - зворотного підтискання після закриття в т.5 випускного клапана і 6 - 1 впуску стисненого газу в циліндр, коли в т.6 відкривається впускний клапан. Моменти відкриття і закриття клапанів визначає привід клапанів, який має найрізноманітнішу конструкцію. Він забезпечує чітке відкриття або закриття клапанів в необхідні моменти часу для найбільш ефективної роботи детандера.

Холодопродуктивність детандера чисельно дорівнює роботі розширення газу.

Поршневе ущільнення в детандере служить для зменшення витоків стисненого газу, і може бути змащувати або не змащувати. Механізм руху детандера забезпечує поступальний рух поршня. Він включає шток 7, що сполучає поршень 2 з крейцкопфом 8, який знімає нормальні зусилля на циліндр, що виникають від руху кривошипно-шатунного механізму 9 і 10, і електричний генератор 11, який перетворює механічну енергію механізму руху в електричну. В результаті внутрішня енергія робочого тіла при його розширенні через поршень передається механізму руху, а його механічна енергія при обертанні генератора перетворюється, в даному випадку, в електричну, яка передається в електричну

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
						18
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

мережу. Однак величина внутрішньої енергії, що передається механізму руху, в значній мірі визначається робочою діаграмою, яка, в свою чергу, залежить від конструкції механізму газорозподілу. Механізм газорозподілу визначає спосіб газорозподілу і багато в чому конструкцію і ефективність роботи поршневих детандерів.

З цього класифікацію поршневих детандерів зручніше проводити за способом їх газорозподілу. Залежно від способу газорозподілу поршневі детандери можна розділити на три основні групи:

1. Детандер з клапанним газорозподілом, що мають впускний і випускний клапани, які в свою чергу, можна поділити на:

- детандери із зовнішнім приводом клапанів;
- детандери з внутрішнім приводом клапанів;
- детандери з автоматичними клапанами;

2. Детандер з безклапанним газорозподілом, мають впускні і випускні вікна;

3. Детандер зі змішаним газорозподілом, що мають впускний клапан і випускні вікна, або навпаки, впускні вікна і випускний клапан.

Кожен з перерахованих способів газорозподілу має свої переваги і недоліки і характеризується своєю теоретичною і робочою діаграмою.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		19

2. РОЗРАХУНОК ПРОЦЕСІВ В ДЕТАНДЕРАХ

2.1. Способи подання ККД детандера

Коефіцієнт корисної дії (ККД) є одним їх найбільш поширених понять, що використовуються на етапах термодинамічної розрахунку і аналізу ефективності процесів і циклів енергетичних пристроїв. У літературі є велика кількість публікацій, присвячених визначенню його величини для систем різного призначення, включаючи низькотемпературні установки. Для кріогенних і холодильних установок питання їх ексергетичного аналізу досить повно відображені в монографіях [1 - 3]. Однак, не існує універсальної формулювання для ККД, яка, зокрема, враховувала б особливості схеми установки або окремих процесів в ній. Крім того, ККД є критерієм ефективності при використанні ексергетичного методу термодинамічного аналізу. Дана обставина привела до появи ряду актуальних проблем пов'язаних з цим показником. Серед них можна виділити слід завдання [4]:

-Існування принципової можливості використання ексергетичного ККД для дослідження ефективності будь-якої системи.

-Аналіз відомих способів визначення величини даного критерію з метою обґрунтування вибору одного з них.

-Встановлення взаємозв'язку ексергетичної ККД всієї системи і складових її підсистем.

-Дослідження наявності екстремумів розглянутого показника як функції термодинамічних параметрів установок.

Частина з перерахованих вище завдань вирішена для конкретних кріогенних установок або їх елементів. В роботі [5] аналітично доведено, що при наявності екстремумів у ексергетичного ККД і іншого критерію, наприклад холодопроизводительности установки, положення оптимуму розглянутих цільових функцій повинні відрізнятися. Дослідження теплообмінного апарату як джерела економії витрат в простому дросельному циклі [6] дозволили вивчити

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
						20
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

вплив даної економії на величину ексергетичного ККД апарату при різних способах визначення цього ККД.

До елементів кріогенної установки, що становлять особливий інтерес для досліджень особливостей ексергетичного ККД, відноситься детандер. Дана обставина обумовлена низкою причин, до яких відносяться методологічні неточності, пов'язані з поняттями для цієї машини [7], помітний внесок детандера в термодинамічну ефективність всієї установки [8], а також наявність різних можливостей визначення ККД детандера [9].

Мета цієї роботи полягає в аналізі існуючих визначень ККД детандера і порівнянні, що випливають з цих визначень, чисельних величин цього ККД як функцій параметрів циклів для різних кріогенних систем.

Розрахункова схема детандера Д зображена на рис. 2.1. На ній використані такі умовні позначення: G - витрата робочого тіла, L_д - енергія у формі роботи, що виробляється детандером.

$$\eta_s = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}. \quad (2.1)$$

У вираженні (2.1) символом h позначена мольная (питома) ентальпія. Вузлова точка 2s характеризує стан робочого тіла при його ізоентропном розширенні в детандере від початкового тиску p₁ до тиску на виході з детандера p₂.

З енергетичного балансу детандера випливають смисли чисельника і знаменника дробу в рівність (2.1). Різниця (h₁-h₂) являє собою дійсну мольну (питому) величину енергії l_д, отриману в детандере, тобто

$$l_d = h_1 - h_2. \quad (2.2)$$

Знаменник дробу в правій частині рівності (2.1) визначає максимальну енергію, яка може бути отримана в результаті процесу розширення речовини в детандере від початкового стану 2.1 до тиску p₂. Таким чином, різниця

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		21

знаменника і чисельника можна розглядати як втрати енергії ds , відповідні показником η_s . Зі співвідношення (2.1) безпосередньо випливає, що

$$d_s = h_2 - h_{2s}. \quad (2.3)$$

Інший спосіб знаходження втрат від незворотності процесу в детандере полягає в застосуванні ексергетичного методу термодинамічної розрахунку [1] і заснованого на ньому балансу. Процедура складання даного балансу не є формалізованою і передбачає використання обов'язкового припущення щодо корисності енергетичного потоку l_d . Якщо цей потік є корисним, то ексергетичний баланс записується у вигляді

$$e_1 = e_2 + l_d + d_e^I, \quad (2.4)$$

де e - ексергія матеріального потоку робочого тіла, d_e - ексергетичної втрати від незворотності. Верхній індекс I вказує на корисність отриманої в детандере енергії.

При використанні рівності (2.4) достатнім є облік тільки фізичної складової ексергії, тому вираз для розрахунку ентальпії в i -ой вузловій точці має вигляд

$$e_i = T_{oc}(s_{oc} - s_i) - (h_{oc} - h_i), \quad i = 1, 2. \quad (2.5)$$

У виразах (2.5) символом s позначена мольная (питома) ентропія речовини, T - абсолютна температура. Нижній індекс oc означає, що розглядається його термодинамічної властивість визначається при тиску і температурі навколишнього середовища.

На підставі співвідношень (2.4) і (2.5) формули для розрахунку ексергетичної втрат d_e^I і формальної записи для ексергетичного ККД η_e^I трансформуються до виду

$$d_e^I = e_1 - e_2 - l_d = T_{oc}(s_2 - s_1) - (h_2 - h_1) - (h_1 - h_2) = T_{oc}(s_2 - s_1). \quad (2.6)$$

$$\eta_e^I = \frac{e_2 + l_d}{e_1} = \frac{T_{oc}(s_{oc} - s_2) - (h_{oc} - h_2) + (h_1 - h_2)}{T_{oc}(s_{oc} - s_1) - (h_{oc} - h_1)} = \frac{T_{oc}(s_{oc} - s_2) - (h_{oc} - h_1)}{T_{oc}(s_{oc} - s_1) - (h_{oc} - h_1)}. \quad (2.7)$$

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		22

Фраза "формальна запис виразу (2.7)" означає, що воно знайдено з балансу (2.4) як відношення виходять з детандера потоків ексергії до вхідних в нього таких потоків.

Якщо отримана в детандере енергія L_d корисно не використовується, тобто розглядається як втрата, рівняння його ексергетичного балансу набуває вигляду

$$e_1 = e_2 + d_e^{\text{II}}, \quad (2.8)$$

де верхній індекс II тут і далі належить до ексергетичним показниками елемента Д, енергетичний потік якого L_d є втратою.

Зі співвідношення (2.8) випливають такі рівності для визначення значень d_e^{II} і η_e^{II}

$$d_e^{\text{II}} = e_1 - e_2 = T_{oc}(s_2 - s_1) + (h_1 - h_2), \quad (2.9)$$

$$\eta_e^{\text{II}} = \frac{e_2}{e_1} = \frac{T_{oc}(s_{oc} - s_2) - (h_{oc} - h_2)}{T_{oc}(s_{oc} - s_1) - (h_{oc} - h_1)}. \quad (2.10)$$

Як відомо, енергетичні потоки апріорі, є втратами при складанні ексергетичної балансів автоматично включаються в доданок d_e . Для детандера з порівняння рівності (2.9) і (2.8) з урахуванням співвідношення (2.2) слід

$$d_e^{\text{II}} - d_e^{\text{I}} = l_d. \quad (2.11)$$

Наявність в правій частині рівності (2.11) величини L_d пояснюється тим фактом, що потік з детандера представляє собою організовану форму енергії, для якої значення ексергії і енергії збігаються.

Основний висновок, який впливає з аналізу розрахункових співвідношень для знаходження однойменних значень показників втрат від незворотності d і ККД, полягає в тому, що всі вони відрізняються між собою.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		23

Отже, різними є і чисельні значення величин, розраховані за цими співвідношеннями. Можна пояснити незбіжні формули для d_e і η_e в різних випадках необхідністю обов'язкового обліку корисності енергії, отриманої в детандері.

При цьому формула (2.1) взагалі непридатна для такого обліку, так як незрозуміло, до якого з можливих припущень щодо корисності енергії L_d дана формула відноситься. Перетворення рівності (2.2) до вигляду

$$d_s = (h_1 - h_{2s}) - (h_1 - h_2) \quad (2.12)$$

дає підставу трактувати втрату d_s як різниця потоків енергії, а не ексергії, в формі роботи детандера для двох різних процесів в ньому, мають однакове початкове стан і закінчуються при однаковому тиску.

Основними вимогами, що пред'являються до поняття "термодинамічний ККД" η , є [1]:

1. Величина η задовольняє нерівностям $0 < \eta \leq 1$
2. Рівності $\eta = 1$ завжди відповідає ідеальний варіант, при якому втрати від незворотності дорівнюють нулю.
3. Втрати від незворотності дорівнюють різниці знаменника і чисельника дробу вирази для розрахунку значення η .
4. Величина ККД повинна розглядатися як функція величин матеріальних або інших енергетичних потоків даної системи.

Неважко встановити, що перші три умови з наведеного вище списку вимог до η виконуються як для η_s , так і для двох форм представлення значень η_e .

Четвертий пункт, як показано раніше, не виконується для показника η_s . З цієї причини його не можна ототожнювати з ККД. Він вдало використовується для термодинамічної розрахунку процесу в детандере, але не може бути застосований при термодинамічній аналізі цього процесу. У разі ідеального детандера вузлові точки 2 і 2s збігаються. Це дає підставу для твердження про те, що зі збільшенням значення η_s зросте термодинамічна ефективність детандера.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		24

2.2. Порівняння різних термодинамічних показників детандера

В даному розділі роботи приводяться і аналізуються розглянуті вище термодинамічні показники детандерів за умов, відповідних їх використання в циклах кріогенних систем різного призначення. Термодинамічні властивості робочих тіл при математичному моделюванні процесів в детандере визначалися за допомогою програми, створеної В.М. Тараном [10].

На практиці застосовуються два алгоритму розрахунку процесу в детандере, що відрізняються вибором вихідних даних. Для обох випадків рівняння процесу задається значенням ККД η_s . У першому з цих алгоритмів вважаються відомими температура T_1 і тиск p_1 речовини перед детандером, а також величина тиску p_2 після детандера. У другому алгоритмі, використовуваному головним чином для розширення гелію, вихідними є значення T_1 , p_2 , а також тиск p_1 . За складністю другий алгоритм значно перевершує перший, так як крім звернення до програми [10] вимагає проведення ітераційних обчислень. Далі в цій роботі розрахунок процесу в детандере проводився за першим алгоритмом.

Спочатку дослідження процесу в детандере здійснювалося для циклу високого тиску на азоті, в якому початкова температура $T_1 = 293$ К, тобто дорівнювала температурі навколишнього середовища. При цьому фіксувалися значення $\eta_s = 0,75$, $p_2 = 0,12$ МПа. Варьйруемой змінної було тиск p_1 .

Результати розрахунків з цими вихідними даними представлені в таблиці 1. У ній стовпці $\delta\eta_e^I$, $\delta\eta_e^{II}$ відповідно характеризують відносні зміни ексергетичної ККД η_e^I і η_e^{II} від заданого значення η_s .

З таблиці 1 випливає, що підвищення тиску p_1 супроводжується зростанням величини отриманої енергії l_d , При цьому також зростають втрати від незворотності d_e^I , d_e^{II} , а також ексергетичної ККД η_e^I , η_e^{II} . Як і слід було очікувати, величина η_s не збігаються ні з одним з можливих значень η_e^I або η_e^{II} , підкоряючись нерівностям $\eta_e^{II} < \eta_s < \eta_e^I$.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
						25
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1. Ексергетичної показники процесів в детандере при різних початкових тисках процесів і прийнятої корисності отриманої роботи L_d

p_1 , МПа	l_d ,	d_e^I , Дж/мол ь	η_e^I	d_e^{II} , Дж/мол ь	η_e^{II}	$\delta\eta_e^I$	$\delta\eta_e^{II}$
10	4311	1437	0.8720	5748	0.4879	0.1399	-0.5371
11	4335	1445	0.8739	5780	0.4957	0.1418	-0.5131
12	4356	1452	0.8757	5808	0.5026	0.1435	-0.4922
13	4375	1458	0.8772	5833	0.5088	0.1450	-0.4739
14	4392	1464	0.8786	5856	0.5145	0.1464	-0.4577
15	4408	1469	0.8799	5878	0.5196	0.1476	-0.4433
16	4423	1474	0.8811	5898	0.5244	0.1488	-0.4303
17	4438	1479	0.8822	5917	0.5287	0.1498	-0.4186
18	4452	1484	0.8832	5936	0.5327	0.1508	-0.4080
19	4465	1488	0.8841	5954	0.5364	0.1517	-0.3983
20	4478	1493	0.8849	5971	0.5398	0.1525	-0.3895

З таблиці 2.1 випливає, що підвищення тиску p_1 супроводжується зростанням величини отриманої енергії l_d , При цьому також зростають втрати від незворотності d_e^I , d_e^{II} , а також ексергетичної ККД η_e^I , η_e^{II} . Як і слід було очікувати, величина η_s не збігаються ні з одним з можливих значень η_e^I або η_e^{II} , підкоряючись нерівностям $\eta_e^{II} < \eta_s < \eta_e^I$.

Для визначення останніх двох стовпців в таблиці 2.1 використані співвідношення

$$\delta\eta_e^I = \frac{\eta_e^I - \eta_s}{\eta_e^I}, \delta\eta_e^{II} = \frac{\eta_e^{II} - \eta_s}{\eta_e^{II}}. \quad (2.13)$$

Аналіз даних таблиці 2.1 показує, що різниця між величинами $\delta\eta_e^I$ і $\delta\eta_e^{II}$ зменшується з ростом тиску p_1 .

Дослідження взаємозв'язку між різними видами ККД як функцією температури робочого тіла перед детандером виконувалося для діапазону T_1 , характерного для циклу середнього тиску на нормальному водні. В якості вихідних даних приймалися: $T_{ос} = 293$ К, $p_{іс} = 0,1$ МПа, $\eta_s = 0,75$, $p_1 = 6$ МПа,

$p_2 = 0,12$ МПа. Результати відповідних розрахунків відображені в таблиці 2, схожою за структурою з таблицею 2.1.

Аналіз даних цих таблиць свідчить про те, що енергія l_d є монотонно зростаючою функцією, як температури, так і тиску перед детандером. При цьому, на відміну від зазначених в таблиці 1 особливостей взаємозалежностей між ККД η_e^I , η_e^{II} зі значенням η_s , якийсь закономірності між для цих трьох показників в разі варіювання температури T_1 встановити не вдалося. Ще одне якісне розходження між даними представлених таблиць полягає в тому, що при певних температурах мають місце рівності $\eta_e^I = \eta_s$, $\eta_e^{II} = \eta_s$.

Таблиця 2.2. Ексергетичної показники процесів в детандере при різних початкових температурах цих процесів і відсутності корисності отриманої роботи l_d

T_1 , К	l_d , Дж/моль	d_e^I , Дж/моль	η_e^I	d_e^{II} , Дж/моль	η_e^{II}	$\delta\eta_e^I$	$\delta\eta_e^{II}$
50	388,7	1785	0,900	2173	0,879	0,167	0,147
60	548,0	2514	0,847	3062	0,814	0,114	0,078
70	702,4	3227	0,790	3929	0,744	0,050	-0,008
80	853,4	3665	0,748	4518	0,689	-0,002	-0,088
90	1004,0	3867	0,721	4871	0,649	-0,039	-0,155

Також необхідно відзначити, що ККД η_e^I , η_e^{II} є монотонно зростаючими функціями тиску p_1 і монотонно зменшуються функціями температури T_1 .

Пояснення цих тенденцій полягає в тому що зростання величини T_1 наближає її значення до $T_{ос}$, тобто супроводжується зменшенням ексергії робочого тіла. Навпаки, збільшення тиску p_1 віддаляє його від значення $p_{нс}$, збільшуючи енергію речовини.

Основний результат, який впливає з даних досліджень, полягає у встановленні методичної некоректності використовуваного на практиці поняття

"ізоентропний (адіабатний) ККД" детандера. Воно не може характеризувати термодинамічний ККД з кількох причин.

По-перше, ця величина не враховує фактор корисності детандера, що зазвичай призводить до різних значень ексергетичної ККД, отриманим в результаті термодинамічної аналізу схеми установки і його прийнятої величини при розрахунку процесу розширення робочого тіла в детандері. Зрозуміло, що при наявності такої відмінності в якості ККД має вибиратися значення ККД детандера, певне з ексергетичного аналізу.

По-друге, аналітично показано, що різниця знаменника і чисельника в дробі вирази для розрахунку η_s не рівняється енергетичним втратам. Така рівність є обов'язковою вимогою до ККД, що впливають з ексергетичного аналізу.

По-третє, аналіз термодинамічної ефективності процесу в детандері за допомогою показника η_s здійснюється порівнянням реально протікає процесу і відповідного йому ідеального випадку. Повністю результати такого порівняння можуть збігатися тільки для ідеального детандера.

При ексергетичній аналізі детандера розглядається тільки один реальний процес, що усуває зазначений вище недолік показника η_s .

Виявлені неточності не дають можливості використовувати термін ККД для прийнятого поняття η_s , так як воно призводить до методичних проблем. Зокрема, вони проявляються в процесі навчання студентів. Більш точним буде з методичної точки зору доцільно вживати для даної величини вираз "рівняння процесу", використовуючи для нього рівність, що впливає зі співвідношення (2.1). В даний час даний показник з успіхом в основному і застосовується для термодинамічної розрахунку процесу в детандері.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		28

3. ПОСТАНОВКИ ЗАВДАННЯ І АЛГОРИТМИ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ ПРОЦЕСІВ В ДЕТАНДЕРАХ

3.1. Термодинамічна модель детандера

Термодинамічна модель в загальному випадку являє собою систему рівнянь і нерівностей, що відображають закони термодинаміки, а також містять додаткові вихідні термодинамічні параметри. До її складу обов'язково входять наступні залежності:

- рівняння енергетичного балансу;
- рівняння матеріального балансу робочих тіл;
- рівняння процесів в даному об'єкті;
- додаткові вихідні дані.

Для даної розрахункової термодинамічна модель має вигляд: схеми, зображеної на рис. 2.1,

Рівняння енергетичного балансу

$$G_1 \cdot h_1 = G_2 \cdot h_2 + L_D, \quad (3.1)$$

де G , h - відповідно витрата робочого тіла і його питома (мольна) ентальпія, L_D - робота, отримана в детандере. З рівності (3.1) впливає вираз для визначення величини L_D після проведення термодинамічної розрахунку процесу в детандере. Нижній індекс у натуральному вираженні (3.1) визначає номер вузловий точки.

Рівняння матеріального балансу

$$G_1 = G_2. \quad (3.2)$$

Рівність (3.2) передбачає, що робочим тілом є чиста речовина, що має місце в даній роботі, оскільки в ній розглядається гелій.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		29

$$\eta_s = \text{const.} \quad (3.3)$$

Як показано в розділі 2 цієї роботи, величину ізоентропного ККД η_s коректно розглядати як характеристику процесу в детандере.

Необхідно відзначити, що дана термодинамічна модель не залежить від виду розглянутого детандера, тобто є він поршнеvim або турбо машиною. Вид детандера багато в чому визначається конкретним значенням величини η_s .

Для однозначного розрахунку термодинамічної моделі детандера необхідно додатково поставити три рівності. На практиці, як правило, задаються тиску перед p_1 і після p_2 детандера, а також температура T_1 або T_2 . Залежно від вибору цих додаткових даних істотно за складністю відрізняються алгоритми вирішення задач термодинамічної розрахунку процесу в детандері.

3.2. Алгоритм розрахунку процесу в детандері при відомих термодинамічних параметрах перед ним

У даній постановці завдання вважаються відомими величини G_1 , p_1 , p_2 , T_1 , η_s . Алгоритм її вирішення зводиться до виконання наступних кроків:

1. За заданим значенням p_1 , T_1 обчислюються термодинамічні функції (v_1 , h_1 , s_1) в точці 1, де v_1 , s_1 - відповідно питомі (молярний) величини обсягу і ентропії. На даному етапі використовується підпрограма розрахунку властивостей гелію за відомими значеннями тиску і температури (процедура PT).

2. Проводиться розрахунок ентальпії h_{2s} в точці 2s, використовуючи умови $p_{2s} = p_2$, $s_{2s} = s_1$. На даному етапі використовується підпрограма розрахунку властивостей гелію за відомими значеннями тиску і ентропії (процедура PS).

3. По знайденому значенням h_{2s} і заданій величині η_s , використовуючи формулу

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
						30
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

$$\eta_s = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}, \quad (3.3)$$

зі співвідношення

$$h_2 = h_1 - \eta_s \cdot (h_1 - h_{2s}) \quad (3.4)$$

обчислюється ентальпія h_2 .

4. По заданому значенню p_2 , і розрахованої за формулою (3.4) ентальпії h_2 обчислюються термодинамічні функції (v_2 , h_2 , s_2) в точці 2. На даному етапі використовується підпрограма розрахунку властивостей гелію за відомими значеннями тиску і ентальпії (процедура PH).

5. За формулою

$$L_D = G_1 \cdot (h_1 - h_2) \quad (3.5)$$

визначається повна робота, отримана в детандері.

Блок-схема наведеного вище алгоритму представлена нижче на рис. 3.1.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		31

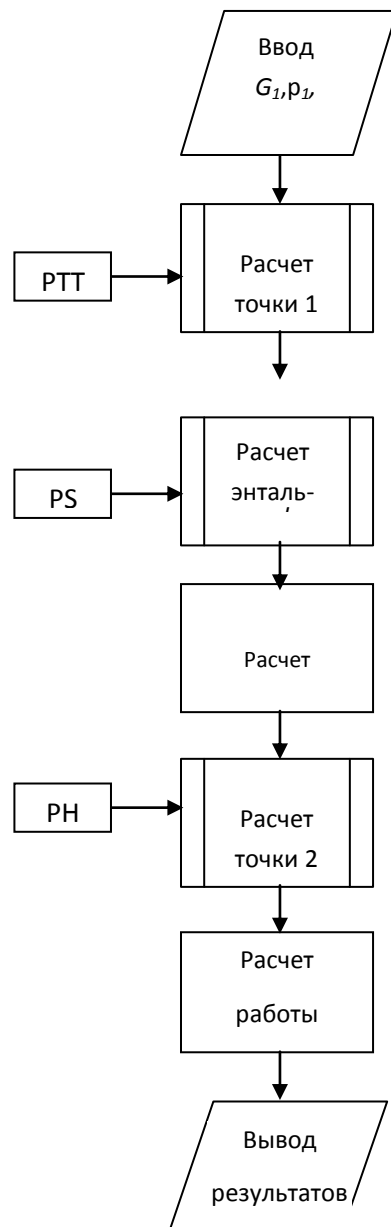


Рис. 3.1. Алгоритм розрахунку детандера при відомій точці 1

3.3. Алгоритм розрахунку процесу в детандері при відомих термодинамічних параметрах після нього

Даний алгоритм є найбільш поширеним при термодинамічній розрахунку схем кріогенних гелієвих установок. У даній постановці завдання вважаються відомими величини G_1 , p_1 , p_2 , T_2 , η_s . При цьому вихідні термодинамічні дані

приймають такі орієнтовні значення: $p_1 = 0,12..0,13$ МПа, $p_2 = 2,5..3,5$ МПа, $T_2 = 10..13$ К.

Основні труднощі, пов'язана з реалізацією цього алгоритму, обумовлена нелінійною системою рівнянь, що має місце в термодинамічній моделі детандера, при спробі визначити температуру T_1 . Для вирішення даного завдання необхідно застосувати ітераційний метод, який зводиться до виконання наступних етапів алгоритму:

1. Здійснюється введення вихідних даних $G_1, p_1, p_2, T_2, \eta_s$.
2. За заданим значенням p_2, T_2 обчислюються термодинамічні функції (v_2, h_2, s_2) в точці 2. На даному етапі використовується підпрограма розрахунку властивостей гелію за відомими значеннями тиску і температури (процедура РТ).
3. З умов $s_{1\max} = s_2, p_{1\max} = p_1$ визначається величина $T_{1\max}$, рівна максимально можливій температурі гелію перед детандером відповідна $\eta_{s\max} = 1$. На даному етапі використовується підпрограма розрахунку властивостей гелію за відомими значеннями тиску і температури (процедура РS).
4. З умов $h_{1\min} = h_2, p_{1\min} = p_1$ визначається величина $T_{1\min}$, рівна максимально можливій температурі гелію перед детандером відповідна $\eta_{s\min} = 0$. На даному етапі використовується підпрограма розрахунку властивостей гелію за відомими значеннями тиску і температури (процедура РН).
5. В результаті реалізації етапів 3, 4 встановлюється максимально можливий діапазон ізоляції коренів T_1 і η_s . Звуження цього діапазону можна проводити різними способами (половинного ділення, золотого перетину, чисел Фібоначчі і ін. [11]), вибираючи один з коренів T_1 або η_s . В даному алгоритмі використаний метод половинного ділення, тобто ітерационная формула для температури T_1 і має вигляд

$$T_1^i = \frac{T_1^{\min} + T_1^{\max}}{2}, i = 1, 2, \dots \quad (3.6)$$

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		33

6. Після визначення величини T_{1i} проводиться розрахунок процесу в детандере при відомих p_1 , p_2 , T_{1i} згідно розглянутому вище алгоритму для заданих вихідних даних перед детандером. В результаті обчислюється значення η_{si} . Далі перевіряється виконання нерівностей

$$\eta_s^{\min} < \eta_s < \eta_s^i, \quad (3.7)$$

$$\eta_s^i < \eta_s < \eta_s^{\max}. \quad (3.8)$$

7. При виконанні нерівності (3.7) покладається. Якщо справедливим є нерівність (3.8), то приймається $\eta_{si+1} = \eta_{s\min}$ і $T_{1i+1} = T_{1\min}$.

8. Здійснюється перехід до пункту 5 цього алгоритму.

9. Умовою закінчення ітераційного процесу може бути вибрано виконання одного з нерівностей

$$T_1^{\max} - T_1^{\min} \leq \delta T_1, \quad (3.9)$$

$$\eta_s^{\max} - \eta_s^{\min} \leq \delta \eta_s, \quad (3.10)$$

де δT_1 , $\delta \eta_s$ - необхідні точності визначення температури T_1 і ККД η_s .

10. Розрахунок роботи, отриманої в детандері за формулою (3.5).

На рис. 3.2 зображена блок-схема викладеного вище алгоритму розрахунку процесу в детандері.

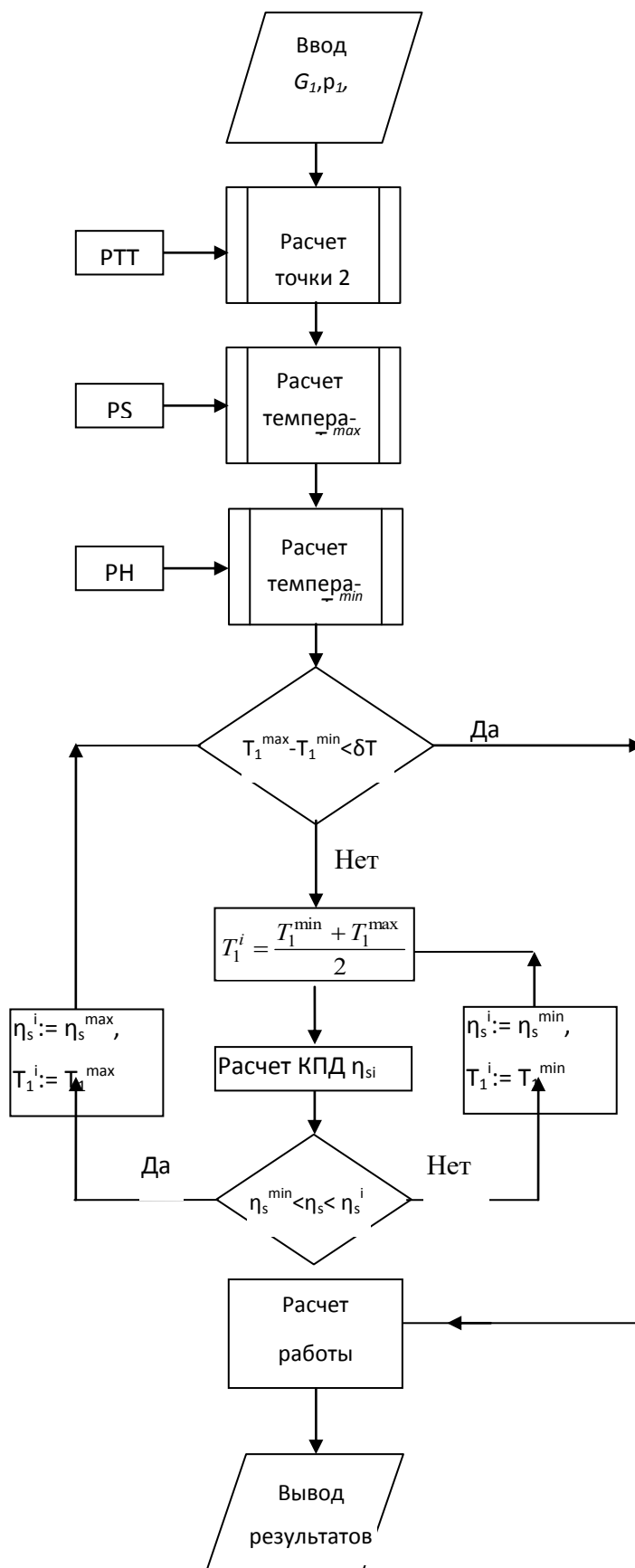


Рис. 3.2. Алгоритм розрахунку детандера при відомій точці 2

4. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОБОЧИХ ТІЛ

Часто використовувані в практичних розрахунках кубічні рівняння стану ван-дер-ваальського типу являють собою розумний компроміс між простотою і точністю, хоча вони не в змозі надійно відтворити P , V , T -залежність в широкому інтервалі зміни щільності. Пряме обчислення питомої обсягу в однофазній області при заданих тиску і температурі дає можливість проводити більшість термодинамічних розрахунків на їх основі аналітично, не вдаючись до ітераційним процедурам. Однак, застосування кубічних рівнянь стану для пошуку наближених рішень створює певні обчислювальні труднощі, основними з яких є наявність тривіальних коренів і помилкових значень похідних.

Існує велика кількість модифікацій рівняння Ван-дер-Ваальса (ВВ)

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{V^2}, \quad (4.1)$$

найбільш вдалим серед яких вважається рівняння Редліха-Квонг (РК)

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{T^{0.5}V(V + b)} \quad (4.2)$$

і його наступні удосконалення в формі Вільсона (РКВ) і Соаве (РКС)

$$P = RT \left(\frac{1}{(V - b)} - \frac{a(T)}{V(V + b)} \right). \quad (4.3)$$

Крім наведених вище єдиних видів рівнянь стану (ЕУС) запропоновано, по крайній мере, кілька десятків кубічних форм рівняння стану, найпоширеніші серед яких відомі як рівняння Пенг-Робінсона і Мартіна. Є ряд узагальнених робіт по дослідженню кубічних рівнянь стану в найбільш загальній формі, в яких проводиться зіставлення якості опису термічних властивостей в газоподібному стані і в критичній точці чистих речовин по найбільш точним з існуючих кубічних рівнянь стану. Також розроблені рівняння, призначені в основному для

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		36

розрахунку тільки окремих термодинамічних функцій. Наприклад, рівняння Лі-Ербара-Едмістера створено "головним чином для визначення ентальпій і констант фазового рівноваги вуглеводневих сумішей, а не волюметричних властивостей".

Основний висновок, який випливає з аналізу літературних даних, полягає в тому, що для кращих типів кубічних ЕУС характерна приблизно однакова похибка розрахунку P , V , T - властивостей в однофазній області, в умовах фазового рівноваги, в критичній точці. Тому важко очікувати надалі, що знову розроблена модифікація кубічного ЕУС дає можливість істотно поліпшити якість опису всього набору термодинамічних властивостей, в який входять як термічні, так і калорические величини.

Виходячи з цього висновку, завдання аналізу якості кубічних рівнянь стану можна проводити на окремих видах цих рівнянь. У зв'язку з відсутністю в літературі результатів перевірки даних рівнянь стану щодо здійсненності всіх основних вимог, що пред'являються до ЕУС, ця задача розглянута стосовно моделям ВВ, РК, РКВ, РКС. Основний упор при цьому зроблений на чисті криогенні речовини.

Вирази для коефіцієнтів і температурних функцій рівнянь стану (4.1) - (4.2), виражених через критичні тиск P_c і температуру T_c зведені в таблицю 4.1.

Рівняння ВВ і РК дуже рідко використовуються для термодинамічних розрахунків циклів і процесів криогенної техніки. Їх аналіз, який буде проводитися в подальшому, має на меті дослідження можливості застосування даних моделей для пошуку початкових наближень, для визначення максимальних похибок ЕУС і для якісних оцінок можливих рішень. Навпаки, рівняння стану РКВ і РКС знаходять широке поширення в практичних розрахунках, особливо для циклів на багатокомпонентних робочих тілах.

Підгінні параметри k , m обчислюються з експериментальних даних по парорідкісні рівноваги чистих речовин з умови найкращого (в сенсі мінімуму суми квадратів відхилень) задоволення правилом Максвелла для парорідкісні

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		37

рівноваги чистих речовин. Виконане аналітичний розв'язок задачі знаходження коефіцієнта k для моделі РКВ призводить до вираження

$$k = \frac{\sum_{i=1}^N \left[RT_{si} \left(\ln \frac{V_{Gi}}{V_{Li}} + 4,934 \ln \frac{V_{Gi}(V_{Li} + b)}{V_{Li}(V_{Gi} + b)} - P_{si}(V_{Gi} - V_{Li}) \right) \right]}{4,934 R \sum_{i=1}^N (T_c - T_{si}) \ln \frac{V_{Gi}(V_{Li} + b)}{V_{Li}(V_{Gi} + b)}} \quad (4.4)$$

де V_{Gi} - обсяги рідкої і парової фаз, температура і тиск насичення в i -ої дослідної точці, відповідно.

Таблиця 4.1. Параметри кубічних форм ЄРС

Модель ЄРС	B	A
ВВ	$0,125 \frac{RT_c}{P_c}$	$0,4219 \frac{(RT_c)^2}{P_c}$
РК	$0,08664 \frac{RT_c}{P_c}$	$0,4275 \frac{R^2 T_c^{2,5}}{P_c}$
РКВ	$0,08664 \frac{RT_c}{P_c}$	$4,934 \left[1 + k \left(\frac{T_c}{T} - 1 \right) \right] \cdot b$
РКС	$0,08664 \frac{RT_c}{P_c}$	$4,934 \frac{T_c}{T} \left(1 + m \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_c}} \right) \right)^2 \cdot b$

Для отримання стійких значень k , як показує досвід, досить обмежитися числом досвідчених точок в умовах рівноваги рідина-пар N , рівним 5-7.

Обчислення параметра m з рівняння РКС зводиться до вирішення кубічного рівняння

$$\sum_{i=1}^N \left\{ RT_i \left[\ln \frac{V_{Gi}}{V_{Li}} + \frac{a(T_i)}{b} \ln \frac{V_{Gi}(V_{Li} + b)}{V_{Li}(V_{Gi} + b)} \right] - P_{si}(V_{Gi} - V_{Li}) \right\} \cdot \sum_{i=1}^N T_i^2 \left(1 + m \left(1 - \sqrt{\frac{T_i}{T_c}} \right) \right) \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{T_i}{T_c}} \right) = 0,$$

$$\text{де } \frac{a(T_i)}{b} = 4,934 \frac{T_c}{T_i} \left[1 + m \left(1 - \sqrt{\frac{T_i}{T_c}} \right) \right]^2.$$

З рівняння (4.3) випливає

$$\frac{a(T)}{b} = \left(1 + \frac{1}{b\rho}\right) \left(\frac{1}{1 - b\rho} - Z\right), \quad (4.5)$$

де ρ - щільність речовини, Z - коефіцієнт стисливості.

Розраховані з (4.4) значення розглядаються далі в якості достовірних.

Порівняння температурних функцій різних кубічних рівнянь стану показало їх дивно гарний збіг між собою в інтервалі наведених температур (0,6-1,4), що дає підставу поширити деякі висновки на будь-які форми кубічних ЕУС.

Аналіз результатів показує, що, як і слід було очікувати, модель ЕУС в формі (4.3) не може адекватно описувати термодинамічну поверхню. Це випливає з того, що значення $\frac{a(T)}{b}$ визначені при однаковій температурі, істотно залежать від величини тиску.

Моделі РКВ і РКС дають найбільш достовірні результати при низьких і помірних тисках в інтервалі температур по Q ($Q = T_c/T$) від 0,8 до 1,4, тобто в тій області, де визначалися параметри k , m . В інтервалі $Q \in (0,5; 1,7)$ розглянуті види ЕУС забезпечують практично однакову точність по термічним властивостям речовин. При температурах близьких до потрійний точці речовини застосування обох моделей призводить до значних похибок. Цей же висновок справедливий і для області високих тисків (близько 50 МПа) при $Q > 0,8$. Модель РКС володіє кращими екстраполяційними властивостями в області високих тисків і температур.

Для n - компонентної суміші кубічні рівняння стану зберігають свій вигляд, але з коефіцієнтами a_m , b_m обумовленими прийнятими правилами комбінування. Зокрема, для рівняння РКВ значення a_m , b_m розраховуються з виразів

$$b_m = \sum_{i=1}^N z_i b_i, \quad (4.6)$$

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		39

$$a_m = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n z_i z_j a_{ij}, \quad (4.7)$$

де z_i – мольна доля i -го компонента

$$a_{ij} = \theta_{ij} a_{ii} + \theta_{ji} a_{jj},$$

$$\theta_{ij} = 1 - \theta_{ji}, \quad \theta_{ij} = 0,5 \quad \text{при } i=j.$$

У разі відсутності експериментальних даних по фазовому рівноваги бінарної суміші, параметр перехресної взаємодії a_{ij} розраховується за формулою:

$$a_{ij} = \sqrt{a_i a_j}. \quad (4.8)$$

У відповідність з цими правилами комбінування для розрахунку термодинамічних властивостей n -компонентної суміші необхідно мати інформацію про параметр θ_{ij} ($i \neq j$), характеризує різномірне взаємодія в бінарній системі. зазвичай значення θ_{ij} ($i \neq j$), визначаються з умови найкращого задоволення досвідченим даними по парорідкісній рівноваги бінарних сумішей.

В якості критерію використовується умова мінімуму одного з двох функціоналів

$$F_1 = \sum_{k=i,j}^M \sum_{l=1}^M [f_{Lk}(P_l, T_l, x_l, \theta_{ij}) - f_{Gk}(P_l, T_l, y_l, \theta_{ij})]^2 = \min; \quad (4.9)$$

$$F_2 = \sum_{l=1}^M \left[\frac{x_l - x_l^p(P_l, T_l, \theta_{ij})}{x_l} \right]^2 = \min; \quad (4.10)$$

де k - номер компонента суміші;

M - число досвідчених точок;

f_{Lk}, f_{Gk} - летючості k -ого компонента відповідно в рідкій і паровій фазах;

x_l, y_l - рівноважні склади низькокиплячого компонента в l -ній дослідній точці;

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		40

x_l^p - розраховане за рівнянням РКВ відносний вміст низькокиплячого компонента в рідкій фазі.

Умова (4.9) можливо використовувати лише при наявності складів обох рівноважних фаз. Аналіз показує, що для отримання стійких значень θ_{ij} досить п'яти експериментальних точок. величини θ_{ij} розраховані з умов (4.9), (4.10) практично збігаються для помірних тисків і відрізняються до 10% при наявності розшарування в рідкій фазі.

Конкретні розрахунки показують, що навіть невеликі варіації значень θ_{ij} можуть приводити до зміни типу фазових діаграм, особливо в районі рівноваги рідина-рідина. Вельми чутливим до точності визначення θ_{ij} є хід критичної кривої рідина-пар.

Гарне узгодження з досвідом при визначенні θ_{ij} з умови (4.9) досягається для області помірних тисків. Критерій (4.10) доцільно використовувати для розрахунків при низьких температурах, особливо в області обмеженою смесіміст рідини. З урахуванням цих рекомендацій можна вважати, що рівняння РКВ надійно описує різні типи фазових рівноваг і критичних кривих, підтвердженням чому є результати досліджень.

Через відсутність експериментальних даних по фазовому рівноваги бінарних сумішей значення θ_{ij} розраховані лише приблизно для трьох десятків сумішей, що застосовуються в холодильній і криогенній техніки. Тому виникає задача найближчого знаходження параметра θ_{ij} на підставі даних про чисті компонентах.

Аналогічне завдання вирішується при визначенні потенційних параметрів різнорідного взаємодії через відповідні характеристики взаємодії в чистих речовинах. Так як $\theta_{ii} = \theta_{jj} = 0,5$ то розробка комбінаційних правил виду $\theta_{ij} = f(\theta_{ii}, \theta_{jj})$ позбавлена сенсу.

Величини θ_{ij} розраховані з умови (4.2), тому ці значення параметра слід використовувати для не розшаровується систем. Крім того, як показують

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		41

розрахунки, занижені значення θ_{ij} спостерігаються для сумішей, утворених фреонами.

Апроксимаційні вираз для обчислення θ_{ij} , отримане за методом найменших квадратів має вигляд

$$\theta_{ij} = 0,5 + 0,3325 \left(1 - \frac{T_{ci}}{T_{cj}} \right) + 0,1193 \left(1 - \frac{T_{ci}}{T_{cj}} \right)^2 \quad (4.11)$$

Значення параметра θ_{ij} , використані для отримання аналітичної залежності (4.11), наведені в таблиці 4.2.

Значення θ_{ij} , певні з (4.11) в першу чергу можуть бути рекомендовані для сумішей, утворених основними кріогенними речовинами між собою, а також з вуглеводнями і фреонами.

Розглянемо якість опису критичних параметрів чистих речовин за допомогою кубічних моделей (4.10) - (4.11). Критичні умови і рівняння стану дають можливість обчислити три величини в критичній точці. Двома з них, як випливає з таблиці 4.2, є параметри a і b . Так як ці параметри визначаються виходячи з експериментальних значень P_c и T_c , То третій невідомою величиною буде V_c .

Отже, для рівнянь стану (4.10) - (4.11) розрахункові та експериментальні значення критичних температур і тисків збігаються. Похибка розрахунку зручно знайти за виразом

$$V_c = \frac{Z_c R T_c}{P_c},$$

де в якості Z_c використовуються розрахункові значення коефіцієнта стисливості в критичній точці.

Таблиця 4.2. Значення параметра θ_{ij} , використані для отримання аналітичної залежності (4.11)

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		42

На підставі останнього нерівності неважко зробити висновок, що похибки розрахунку за рівняннями стану (4.10) - (4.11) обсягу і коефіцієнта стисливості в критичній точці однакові. У досліджуваних моделей значення Z_c не залежить від роду робочого тіла та є рівними 0,375 для рівняння ВВ, і 0,333 для рівнянь РК, РКВ, РКС.

За досвідченим даними Z_c змінюється в межах 0,24 - 0,32. Таким чином, відносна похибка обчислення V_c за моделями РК, РКВ, РКС знаходиться в діапазоні 4 - 394%. Для рівняння ВВ ця помилка становить від 17 до 56%.

Для заданої температури T_S найбільші відхилення тиску P_S від відповідних дослідних даних спостерігаються в області близькою до потрійний точці. При цих температурах парову фазу можна вважати ідеальним газом, тому і похибка обчислення обсягу тут велика. Відносно мала помилка визначення обсягу рідкої фази в цьому районі пояснюється слабкою залежністю V_L від тиску.

З підвищенням температури зменшується похибка знаходження тиску δP_S і, за винятком критичного району, обсягу парової фази.

Так як в критичній точці похибки δV_L і δ повинні збігатися, то можна зробити висновок, що помилка визначення обсягу парової фази різко зростає в малій околиці цієї точки. Через зростання абсолютних значень P_S з ростом

Смесь	T_{ci}/T_{cj}	θ_{ij}	Смесь	T_{ci}/T_{cj}	θ_{ij}
N2 - CH4	0,663	0,618	N2 - R14	0,555	0,656
N2 - C2H6	0,413	0,735	He-H2	0,158	0,906
N2 - C3H8	0,341	0,791	N2 - R12	0,328	0,732
CH4 - C2H6	0,623	0,630	N2 - R22	0,342	0,770
CH4 - C3H8	0,515	0,711	H2 - R14	0,146	0,891
C2H6 - C3H8	0,826	0,577	H2 - R13	0,110	0,945

температури стає більш істотним вплив δP_S на розрахунковий величину V_L , внаслідок чого збільшується похибка δV_L .

З огляду на прямій залежності між температурою і тиском в стані насичення зроблені висновки зберігатися і при використанні в якості незалежної змінної тиску P_S .

Моделі РКВ і РКС дають істотно кращі результати при розрахунку парожіdkостной рівноваги, ніж рівняння ВВ і РК, які, однак, перевищують похибку експериментальних даних.

Надалі для визначення властивостей гелію при розрахунку і аналізі циклів і процесів в кріогенних системах і їх елементах використано кубічну ЕУС Редліха-Квонга-Вільсона. Зокрема для нього розроблено програмне забезпечення, яке представлено в цій роботі.

До особливостей гелію як робоче тіло кріогенної установки відноситься те, що гелій є одноатомних інертною речовиною, що спрощує обчислення його калорических властивостей, маючи на увазі, що його ізобарна теплоємність в ідеальногазовом стані не залежить від температури і дорівнює $2,5R$.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		44

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Техніка безпеки при роботі з гелієм

Кріогенні гелієві установки відносяться до виробництв з підвищеною небезпекою. Тому до самостійної роботи на установці допускаються люди не молодше 18 років, що пройшли відповідні навчання та стажування не менше 1 місяця. Перевірка знань у обслуговуючого персоналу проводиться 1 раз в 12 місяців, а повторний інструктаж з техніки безпеки не рідше 1 разу на 3 місяці.

Тут ви швидко установках трубопроводи та апаратура повинні піддаватися випробуванням на міцність і щільність тиском 1,25 тах робочого, але не менше 0,2МПа і не менше 5 хвилин. Випробування проводяться до і після монтажу, після ремонту і перед пуском. Трубопроводи повинні бути оснащені: запірної, запірно-регулюючої апаратурою, приладами для вимірювання тиску і температури, показчиками рівня і запобіжними клапанами.

До арматурі також пред'являються вимоги щодо захисту від обмерзання і корозії, особливі вимоги по щільності, чистоті та герметичності.

Правила безпеки при роботі з гелієм обумовлені його фізико-хімічними властивостями. Через низькі температур в блоці зрідження відбувається вимерзання домішок на внутрішніх поверхнях апаратури і трубопроводів, що призводить до забивання і виходу з ладу. При неправильному поводженні з рідким гелієм можливі термічні опіки. Через високого тиску в системі і малої теплоти випаровування рідкого гелію велика небезпека порушення герметизації при місцевих перегревах, ударах і падіннях, що загрожує придбанням реактивної сили і забрудненням повітря в приміщенні. Звідси підвищена небезпека виходу установки з ладу, травматизму, задухи і термічних опіків.

При роботі з гелієм слід застосовувати шкіряні рукавиці і високі черевики, користуватися спеціальним одягом.

Апаратура, трубопроводи, арматура повинні виготовлятися з кольорових металів і високолегованих сталей.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		45

До обслуговування установки допускаються особи які пройшли виробничо-технічне навчання та мають посвідчення на право обслуговування повітророзподільних установок, які вивчили керівництво по експлуатації установки і порядок роботи.

Персонал зобов'язаний суворо дотримуватися правил техніки безпеки при експлуатації і технічному обслуговуванні установки.

Під час роботи біля установки повинен знаходитися тільки обслуговуючий персонал.

Експлуатація установки можлива тільки за умови, що в переробляється повітрі вміст вибухонебезпечних домішок не більше зазначених у формулярі на установку.

Слів рідкого повітря, збагаченого киснем, з блоку повинен проводитися в випарник. Категорично забороняється розкривати НЕ відігріти до плюсових температур апарати.

Не відкриваються або що не закриваються обмерзлі вентиля, обов'язково відігріти паром або повітрям. Забороняється користуватися при цьому ломами, трубками та іншими важелями, щоб уникнути зриву вентилів.

Ущільнення бавовняної набиванням, просоченого маслом, забороняється.

Для сальникової набивки необхідно вживати азбестовий шнур сухий, або просочений графітом, набивання АСТ, або фторопласт 4.

Біля блоку забороняється зберігання будь-яких горючих речовин: масел, бензину, жирів, а так само ганчірок.

Категорично забороняється поблизу блоку куріння, застосування відкритого вогню, газових паяльних тарілок і т.д.

Запобіжні клапани повинні бути відрегульовані на відповідний тиск і запломбовані.

Ремонтні зварювальні роботи можуть проводитися тільки при непрацюючій установці з дозволом і під наглядом відповідального за її експлуатацію особи із застосуванням всіх необхідних запобіжних заходів. При проведенні цих робіт на установці не повинні знаходитися горючі матеріали або легко загоряються

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		46

предмети. Ремонт трубопроводів, по яких проходить газоподібний або рідкий повітря, збагачене киснем, за допомогою пайки або зварювання можна робити тільки після ретельної продувки їх азотом або очищеним від масла повітрям до повного видалення кисню.

Суворо забороняється забруднення агрегатів і їх частин.

Обслуговування агрегатів необхідно проводити тільки чисто не замасленими руками, оберігати вентиля, прокладки, накидні гайки, інструменти і одяг від забруднення маслом або жирами.

Інструмент, який використовується при обслуговуванні установки повинен мати блакитну смугу і знежирюють кожен раз при регламентних роботах.

Все манометри повинні бути справні, мати пломбу і перевірятися щорічно. Манометри необхідно оберігати від забруднень маслом і жирами.

Суворо забороняється підтягування фланцевих і нікельних з'єднань, що знаходяться під тиском. Пропусків в комунікаціях за допомогою вогню або тліючих предметів суворо забороняється. При замерзанні трубопроводів відігрівати їх дозволяється тільки зовні паром, або гарячою водою. Користуватися для цієї мети пальниками, паяльними лампами та іншими джерелами відкритого полум'я забороняється.

Схема установки забезпечує проточність конденсатора, щоб уникнути накопичення вибухонебезпечних домішок.

При експлуатації установки необхідно стежити за тим, щоб масло з маслосистем турбодетандеров не потрапляють в трубопроводи. Уважно і точно виконуйте всі вказівки "Керівництво по експлуатації турбодетандеров.

При експлуатації і ремонті електрообладнання необхідно строго дотримуватися "Правил пристроїв електрообладнання " і " Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів ". Всі ремонтні роботи повинні проводитися тільки при знятій напрузі на установці і відключених автоматах на щиті управління. Все монопріємнікі повинні бути обов'язково заземлені в загальний контур заземлення.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		47

Перед пуском установки в експлуатацію необхідно перевірити стан захисту обладнання від наповнення статичної електрики.

Загальні вимоги до приміщення, в якому експлуатується установка: категорія Д по будівельним нормам і правилам, ступінь вогнестійкості " II ", характеристика середовища приміщення для вибору електрообладнання - " нормальна " згідно " Правил улаштування електроустановок ".

5.2 Випробування системи на щільність

Випробування системи на щільність проводять пневматичним способом. Випробування відбувається при робочому тиску, і не рідше 1 разу на 2 роки, при повному відігріванні. Перевірку апаратів починають з теплообмінників. Окремо відчують детандерна фільтри, адсорбер, блоки осушування. При випробуваннях тиск протягом години не повинно знизитися більш ніж на 2%.

Випробування проводять 10% гелієво-повітряною сумішшю за допомогою детектора шукаємо.

Тиск повинен підвищуватися плавно з зупинками при проміжних тисках. Кількість зупинок і проміжних тисків встановлюється інструкцією, а якщо її немає, то при робочому тиску 0,5 МПа, зупинка робиться при 0,25 МПа. А при тиску 10 МПа і більше зупинки робляться через кожні 0,5 МПа. Время підвищення тиску повинно бути до 0,1 МПа - 15÷20 хвилин, від 0,1÷1 МПа - 60÷90 хвилин, від 1÷5 МПа - 60÷90 хвилин.

При максимальному робочому тиску посудину витримується не менше 3 годин.

5.3 Розрахунок вентиляції приміщення

Розмір приміщення цеху:

$$a \cdot b \cdot h = 12 \cdot 6 \cdot 4 = 288 \text{ м}^3$$

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
						48
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Продуктивність припливно-витяжної вентиляції визначається за формулою:

$$L = K \cdot V, \text{ м}^3 / \text{ч};$$

де:

K - коефіцієнт кратності, 1 / ч; (вибираємо по СніП для цього типу приміщень)

V- об'єм приміщення, м³;

Приплив k = 3 ч; Витрата припливу L = 3·288=893 м³

Витяжка k = 4 год; Витрата витяжки L = 4·288=1181 м³

Аварійна k = 6 ч; Аварійна витрата L = 6·288=1557 м³

Потужність вентилятора:

$$N = \frac{k \cdot L \cdot \Delta P_n \cdot 10^{-6}}{\eta_g \cdot \eta_n \cdot 3,6}, \text{ кВт}$$

k - коефіцієнт запасу 1,2;

η_v - ККД вентилятора;

η_n - ККД приводу.

Втрати тиску:

$\Delta P_n = 200 \div 400$ Па приймаємо $\Delta P_n = 300$ для відцентрових вентиляторів і системи повітропроводів;

$\eta_v = 0,75$ -ККД вентилятора, приймається за влучним висловом вентилятора;

$\eta_n = 0,95$ -ККД приводу при клинопасовій передачі.

Визначаємо потужність вентилятора:

припливного:

$$N = \frac{1,2 \cdot (3 \cdot 288) \cdot 300 \cdot 10^{-6}}{0,75_g \cdot 0,95 \cdot 3,6} = 0,135 \text{ кВт}$$

витяжного:

$$N = \frac{1,2 \cdot (4 \cdot 288) \cdot 300 \cdot 10^{-6}}{0,75_g \cdot 0,95 \cdot 3,6} = 0,180 \text{ кВт};$$

аварійного:

$$N = \frac{1,2 \cdot (6 \cdot 288) \cdot 300 \cdot 10^{-6}}{0,75_g \cdot 0,95 \cdot 3,6} = 0,27 \text{ кВт}.$$

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
						49
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

5.4 Розрахунок штучного освітлення

Правильно вибране освітлення на виробництві забезпечує нормальну трудову діяльність і впливає на збереження здоров'я робітників.

Освітленість органів управління і щитів КВП і А повинні бути 200 лк при висвітленні газорозрядними лампами розжарювання.

Світловий потік групи ламп світильника при люмінесцентних лампах:

$$\Phi_n = \frac{E_n \cdot S \cdot z \cdot 100}{N \cdot \eta};$$

де:

$S = 80 \text{ м}^2$ -площа освітлюваного приміщення;

$z = 1,15$ -коефіцієнт нерівномірності освітлення;

$k = 1,3$ -коефіцієнт запасу;

N -число світильників в приміщенні;

η -коефіцієнт використання світлового потоку ламп, залежить від показника приміщення;

E_n - нормативна мінімальна освітленість;

A і B - розміри приміщення: $A = 10 \text{ м}$, $B = 8 \text{ м}$;

$H_p = 2 \text{ м}$ - висота світильників над робочим місцем

$$L = H_p \cdot 1,4 = 2 \cdot 1,4 = 2,8 \text{ м}$$

Визначаємо необхідну кількість світильників:

$$n = \frac{A \cdot B}{L^2} = \frac{8 \cdot 10}{7.84} = 10.2 \text{ шт}$$

$$n = \frac{8 \cdot 10}{72} = 3,75 \text{ шт}$$

приймаємо: $n = 4$ шт.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
						50
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Для визначення коефіцієнта використання знаходиться показник приміщення:

$$\xi = \frac{A \cdot B}{H_p \cdot (A + B)};$$

$$\xi = \frac{8 \cdot 10}{10 \cdot (8 + 10)} = 0,4$$

визначаємо $\eta=26$ при $\xi=0,4$

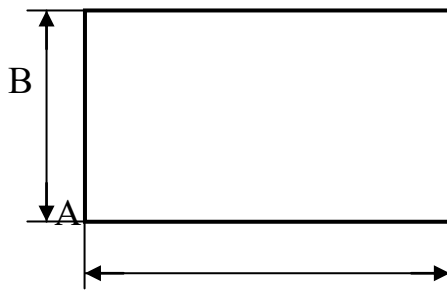
Світильник - вибухобезпечний.

$E_n=300$ лк.табл.3(стр.122)

$N=30$

$$\Phi_n = \frac{100 \cdot 300 \cdot 80 \cdot 1,15 \cdot 1,3}{30 \cdot 26} = 2538_{лм}$$

Вибираємо лампу АБ 80



5.5 Розрахунок системи заземлення

Метою даного розрахунку є підбір заземлювачів так, щоб опір їх було менше 4 Ом, для цього необхідно вибрати конструкцію заземлювача (контурний або виносної), це залежить від опору розтікання ґрунту, на якому знаходиться приміщення.

Визначення опору заземлювального пристрою:

У мережах до 1000 В опір захисного заземлення повинен бути менше 4 Ом.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		51

Визначаємо розрахункове значення питомої опору ґрунту. Воно визначається в залежності від кліматичного коефіцієнта, який лежить в межах (1,2 ... 2), вибираємо $\Psi=1,5$.

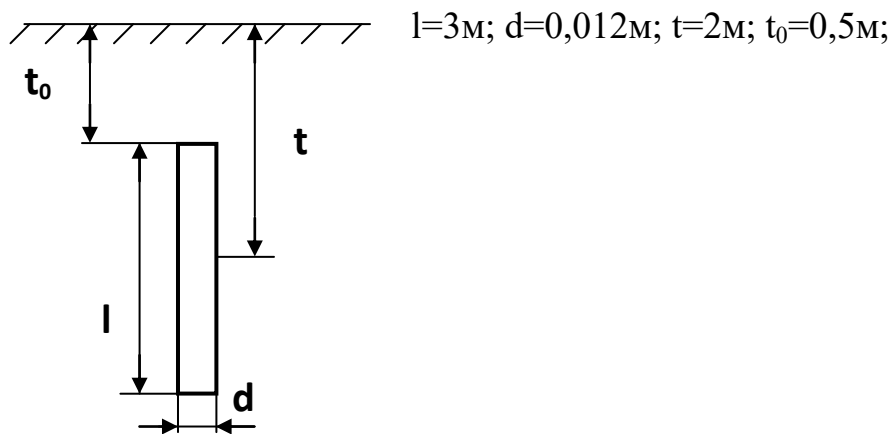
$$\rho_p = \rho_\phi \cdot \Psi;$$

де: ρ_ϕ -чорнозем ($\rho_\phi=30$ Ом/м);

$$\rho_p=30 \cdot 1,5=45 \text{ Ом/м};$$

Розраховуємо опір одного вертикального стержня:

$$R = \frac{\rho_p}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right);$$



Визначаємо опір заземлювального пристрою:

$$R = \frac{45}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left(\ln \frac{2 \cdot 3}{0,012} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2 + 3}{4 \cdot 2 - 3} \right) = 13,01 \text{ Ом};$$

Визначаємо кількість стрижнів заземлення:

$$n = \frac{R}{R_g};$$

де: $R_g = 4$ Ом допустимий опір вертикального заземлювача;

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		52

$$n = \frac{13,01}{4} = 3,25;$$

приймаємо: $n = 4$;

Визначаємо опір всіх вертикальних заземлювачів з урахуванням впливу їх один на одного. Коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів вибираємо $\eta=0,85$ по таблиці.19 стор.270;

$$R''_{об.} = \frac{R}{\eta \cdot n};$$

$$R''_{об.} = \frac{13,01}{0,85 \cdot 2} = 3,88$$

Отже, слід вибирати $\eta=0,8$ и $n=6$

$$R''_{об.} = \frac{13,01}{0,8 \cdot 6} = 2,71 \text{ Ом};$$

9.5.6.Сопротивление сполучної смуги:

$$R_{пол.} = \frac{\rho_p}{2\pi l_n \cdot \eta_{пол.}} \cdot \ln \frac{2 \cdot l_n^2}{b \cdot t_0};$$

де: l_n -довжина сполучної смуги;

$$l_n = (n - 1) \cdot l' + 50 \div 100;$$

$$l_n = (6 - 1) \cdot 6 + 50 \div 100;$$

$l' = 2 \cdot l = 2 \cdot 3 = 6 \text{ м};$ - расстояние между стержнями;

b - ширина смуги $0,02 \div 0,05 \text{ м};$

$\eta_{пол.}$ - коефіцієнт опору смуги;

$$R_{пол.} = \frac{45}{2 \cdot 3,14 \cdot 105 \cdot 0,055} \cdot \ln \frac{2 \cdot 105^2}{0,03 \cdot 0,5} = 0,95 \text{ Ом};$$

Загальний опір системи заземлення:

$$R_{общ.} = \frac{R''_{об.} \cdot R_{пол.}}{R''_{об.} + R_{пол.}};$$

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		53

$$R_{\text{общ}} = \frac{2,71 \cdot 0,95}{2,71 + 0,95} = 0,70 \text{ Ом}$$

Загальний опір системи заземлення $R_{\text{заг}}$ менше нормативного

$$R_{\text{заг}}^{\text{н}} = 0,70 \text{ Ом} < R_{\text{общ}}^{\text{н}} = 4 \text{ Ом}.$$

Безпечна робота установки

Для безпечної роботи установка забезпечена приладами для спостереження і реєстрації температур, тисків прямого і зворотного потоків, і чистоти газоподібного гелію.

До приладів спостереження за тиском і розрядженням на даній установці відносяться манометри, вакуумметри, датчики тиску з висновком сигналів на реєструючі пристрій.

До приладів спостереження за температурою відносяться термометри опору і термопари.

За чистотою газоподібного гелію стежить газоаналізатор.

Схемою автоматики передбачений захист компресорного та детандерна агрегатів, а також захист збірки рідкого гелію від переповнення.

Для безпечної роботи системи необхідно дотримуватися нормальний режим роботи.

Тиск і температура перед компресором не повинні перевищувати 0,1 МПа (1 кгс / см²) и 300 К відповідно

У блоці очищення від домішок необхідно дотримуватися наступні параметри: тиск рідкого азоту 0,1 МПа (1 кгс / см²) і температура рідкого азоту 77 К.

Тиск прямого потоку на вході в кріоблок не менше 2,5 МПа (25 кгс / см²) температура не більше 300 К.

За допомогою вакуумних насосів необхідно забезпечити розрядження всередині кріостату 0,1 ÷ 0,2 тор (13,33 ÷ 26,66 Па) и межстенном пространстве кріостата $1 \cdot 10^{-5}$ тор ($1,33 \cdot 10^{-3}$ Па) для забезпечення високовакуумної ізоляції, а

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		54

також для регенерації адсорбентів в блоці очищення і осушення $-1 \div 1 \cdot 10^{-1}$ тор (133,32÷13,33Па).

Чистота газоподібного гелію не нижче 99,985%.

Рівняння процесів робочих тіл

Прямий потік: $p_3 = p_2 - \Delta p_m$. (2.1)

Зворотний потік: $p_1 = p_4 - \Delta p_n$. (2.2)

У рівностях (2.1), (2.2) величини Δp_m и Δp_n відповідно позначають втрати тиску по прямому і зворотному потокам робочих тіл.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
						55
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Складена розрахункова схема криогенного детандера, на основі якої отримана його термодинамічна модель. Дана модель містить матеріальний і енергетичний баланси детандера, а також рівняння його процесу.

2. Викладено алгоритм розрахунку процесу в детандері при заданих значеннях температури і тиску робочого тіла на його вході. Зображена блок-схема цього алгоритму.

3. Викладено алгоритм розрахунку процесу в гелієвому детандері при заданих значеннях температури і тиску робочого тіла на його виході. Зображена блок-схема цього алгоритму, що припускає використання ітераційну процедуру методом половинного ділення інтервалу ізоляції кореня.

4. Розглянуто ізоентропного ККД детандера як критерію його термодинамічної ефективності. Показано, що в загальному випадку даний показник не є ККД. З методологічної точки зору його значення краще вважати рівнянням процесу.

5. Описано термодинамічне забезпечення для розрахунку процесу в детандері. Зокрема, викладено використання для гелію трипараметричного кубічного рівняння стану Редліха-Квонг-Вільсона (РКВ). Наведено розрахункові співвідношення для обчислення ентальпії і ентропії, а також параметри рівняння РКВ для гелію.

6. Розглянуто програмне забезпечення для розрахунку процесу в детандере, що дає можливість реалізувати цей розрахунок в середовищі Delphi. Показана структура основних процедур, на основі яких проводиться визначення термодинамічних властивостей гелію при різних наборах незалежних змінних на етапах виконання алгоритмів розрахунків процесів в детандері.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		56

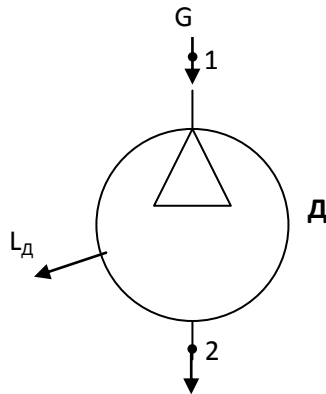
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Архаров А.М. Кріогенні системи. Т.2 Основи проектування апаратів, установок та систем. - М: Машинобудування, 1999.
2. V. L. Bondarenko, Yu. M. Simonenko. Cryogenic Technologies of Rare Gases Extraction: monograph. — Odesa : Astroprint, 2014. — 312 p.
3. В. М. Арсеньєв, В. М. Козін. Кріогенна техніка: основи теорії і розрахунку циклів кріогенних установок: навч. посіб.. — Суми : СумДУ, 2021. — 272 с.
4. Б. Г. Грудка, А. М. Басов. Повітророздільні установки : конспект лекцій. — Одеса : ОНАХТ, 2022. — 57 с.
5. М. Kravchenko. Air separation units for cryogenic products : lecture notes. — Odesa : ONAFT, 2022. — 73 p.
6. Castle W. F. Air separation and liquefaction: Recent developments and prospects for the beginning of the new millennium // International Journal of Refrigeration. – 2002. – Vol. 25. – P. 158-172.
7. М. Kravchenko. Cryogenic technology and low-temperature machines : lecture notes. — Odesa : ONAFT, 2022. — 105 p.
8. Alsultanny Y. A., Al-Shammari N. N. Oxygen Specific Power Consumption Comparison for Air Separation Units // Engineering Journal. —2014. —Vol. 18 (2). — P. 68–80.
9. Harald Klein, Philipp Fritsch, Patrick Haider Flexible Operation of Air Separation Units // ChemBioEng Reviews. —2021. —Vol. 8. —P. 1-19.
10. Kumar, M., Panda, D., Behera, S. K. & Sahoo, R. K. Experimental investigation and performance prediction of a cryogenic turboexpander using artificial intelligence techniques. // Applied Thermal Engineering. —2019. —P.15-29.
11. Sam, A. A. & Ghosh, P. Flow field analysis of high-speed helium turboexpander for cryogenic refrigeration and liquefaction cycles. // Cryogenics. —2017. —Vol. 82. —P. 5-13.
12. Дем'яненко Ю.І. Охорона праці під час роботи на установках розділення повітря. Навчальний посібник. – 2006.

ДОДАТОК А

РОЗРАХУНКОВА СХЕМА ДЕТАНДЕРА Д

На схемі, зображеної нижче, використані наступні умовні позначення: G - витрата робочого тіла, l_d - енергія у формі роботи, що виробляється детандером. Вузлові точки входу і виходу робочого тіла в детандере позначені відповідно номерами 1 і 2.



Термодинамічна модель детандера

матеріальний баланс

$$G_2 = G_1. \quad (1)$$

Енергетичний баланс

$$G_1 h_1 = G_2 h_2 + L_d, \quad (2)$$

де h_i - молярна (питома) ентальпія робочого тіла в i -й вузловій точці. З виразу (2) випливає загальне вираз для розрахунку величини l_d .

рівняння процесу

$$\eta_s = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} = \text{const}, \quad (3)$$

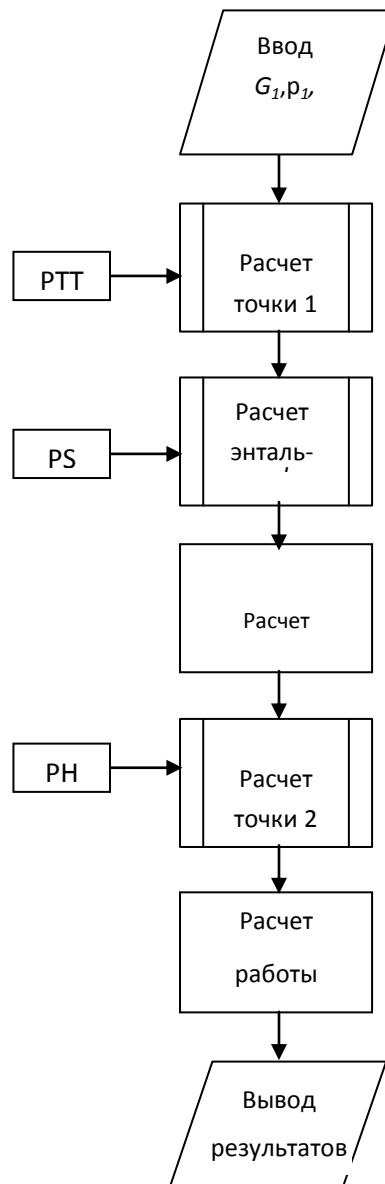
де η_s , h_{2s} - відповідно Адіабатний (ізоентропний ККД детандера) і ентальпія робочого тіла, яка визначається з співвідношення $s_{2s} = s_2$ при однаковому тиску p_1 .

Основне призначення детандера полягає в зниженні температури робочого тіла в процесі його адіабатного розширення.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		58

ЗВИЧАЙНИЙ АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСУ В ДЕТАНДЕРІ

Застосовується при розрахунках азотних, водневих та інших кріогенних систем. У даній постановці завдання відомими величини вважаються G_1 , p_1 , p_2 , T_1 , η_s , тобто фактично визначеним є стан робочого тіла на вході в детандер. Нижче представлена блок-схема алгоритму вирішення даного завдання.



РТ - підпрограма розрахунку термодинамічних властивостей за відомими значеннями тиску і температури.

PS - підпрограма розрахунку термодинамічних властивостей за відомими значеннями тиску і ентропії.

РН - підпрограма розрахунку термодинамічних властивостей за відомими значеннями тиску і ентальпії.

ТЕРМОДИНАМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСУ В ГЕЛІЄВОМУ ДЕТАНДЕРІ

Дане термодинамічне забезпечення складається з наступних складових:

- Термодинамічна модель детандера як елемента кріогенної системи. Рівняння даної моделі представлені на плакаті 1.
- Термодинамічна модель гелію як робоче тіло в детандері. Розгляд цієї моделі включає в себе опис термодинамічних особливостей гелію і використаного рівняння стану для обчислення рівноважних властивостей гелію.

Особливість гелію як робочого тіла в детандері

Що стосується аналізованої завдання основна особливість гелію полягає в тому, що він є одноатомних речовиною. Звідси випливає, що його ізохорно теплоємність в ідеально газовому стані $c_v^{id}=1,5R$, де R – газова стала. Таким чином, c_v^{id} не залежить від температури.

Модель рівняння стану гелію

У даній роботі в якості рівняння стану гелію обрана трипараметричної кубічна модель Редліха-Квонг-Вільсона (РКВ)

$$p = RT \left[\frac{1}{v-b} - \frac{a(T)}{v(v+b)} \right], \quad (1)$$

де $a(T)$, b — відповідно температурна функція і параметр рівняння стану. Функція $a(T)$ має вигляд

$$a(T) = 4.934 [1 + k(T_c / T - 1)] b, \quad (2)$$

де k – підгінним параметр, нижній індекс з означає відповідний критичний параметр речовини.

Нижче в таблиці наведено величини параметрів рівняння РКВ для гелію

T_c, K	p_c, MPa	$v_c, dm^3/mol$	$b, dm^3/mol$	k
5,20	0,22	0,0573	0,017	0,093

Вирази для обчислень значень ентальпій і ентропій за рівнянням РКВ:

Ентальпія

$$h(T, v) = RT \left[\frac{b}{v-b} - \frac{a(T)}{v+b} - \frac{T}{b} \cdot \frac{da(T)}{dT} \cdot \ln \left(\frac{v}{v+b} \right) \right] + h_{id}, \quad (3)$$

ентропія

$$s(T, v) = R \ln \left(\frac{v-b}{RT} \right) + R \left(\frac{a(T)}{b} + \frac{T}{b} \cdot \frac{da(T)}{dT} \right) \ln \left(\frac{v+b}{v} \right) + s_{id}. \quad (4)$$

У рівностях (3), (4) нижній індекс означає ідеальногазовое стан гелію.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
						60
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСУ В ГЕЛІЄВОМУ ДЕТАНДЕРІ

Програмне забезпечення містить підпрограми для розрахунку процесів і станів гелію в детандере, реалізовані в середовищі Delphi. До них відносяться процедури *PT*, *PH*, *PS*, використані при побудові блок-схем різних алгоритмів розрахунків процесів в гелієвих детандерах.

Поставлені і одержувані значення термодинамічних функцій містяться в масиві *prop*, що має уніфіковане розташування і розмірність його елементів:

pr [1] - тиск, бар;

pr [2] - молярний обсяг, дм³ / моль;

pr [3] - температура, К;

pr [4] - ентальпія, Дж / моль;

pr [5] - ентропія, Дж / (моль · К);

pr [6] - ексергія, Дж / (моль);

pr [7] - частка рідини.

Опис даних процедур має ідентичний вигляд

```
procedure namepr (var pr: prop; var d: real),
```

де *namepr* - ім'я підпрограми (*PT*, *PS* або *PH*), змінна *pr* є описаним вище масивом *prop*, змінна *d* визначає частку рідини гелію.

Для розрахунку парорідинної рівноваги чистої речовини при заданому значенні тиску або температури розроблена процедура *VLP*, що має наступний заголовок

```
procedure VLP(i:integer; var pr1, pr2:prop),
```

де *i* - цілочисленна змінна, яка визначає вид незалежної змінної (*i* = 1 тиск, *i* = 2 - температура); масиви *pr1*, *pr2* містять відповідно термодинамічні функції рідкої і парової фаз.

Властивості обраного робочого тіла, в даному випадку гелію, передаються в дані підпрограми через глобальні змінні. У загальному випадку є можливість застосувати дане програмне забезпечення для 36 чистих речовин, більшість з яких відноситься до криогенним або використовується в низькотемпературних установках.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.16	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		61