

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



ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної роботи

На тему: «Термодинамічний аналіз дросельної кінцевої ступені охолодження
кріогенної гелієвої установки»

Здобувача Танасенко Р.А.
(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

Танасенка Романа Анатолійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи	Термодинамічний аналіз дросельної кінцевої ступені охолодження кріогенної гелієвої 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:	Робочі речовини гелій, азот, водень. Показники термодинамічної ефективності ступені – ККД, втрати від необоротностей, параметр оптимізації – тиск прямого потоку. Температура навколишнього середовища – 293 К. Кубічне рівняння стану
----------------------------	--

4. Перелік питань, які потрібно розробити:	Вступ. Види ступенів охолодження кріогенних установок. критерії енергетичної ефективності, термодинамічне забезпечення оптимізації. Обчислення оптимальних тисків прямого потоку для різних речовин. 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 _____ Танасенко Р.А.

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

(підпис)

Танасенко Р.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Грудка Б.Г.

(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

Танасенко Р.А.

(ПІБ)

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Виконано критичний огляд літературних джерел по декомпозиції кріогенних систем різного призначення. основі якого представлені можливі ступені остаточного гелієвих установок.

Складено розрахункова схема для термодинамічної розрахунку дросельної ступені остаточного охолодження. Використовуючи програмне забезпечення, розроблене на кафедрі кріогенної техніки ОНТУ, виконаний розрахунок оптимальних тисків прямого потоку для рефрижераторного і зріджувального режимів роботи кріогенних гелієвих установок.

Показано, що тиску прямих потоків, відповідні максимальної термодинамічної ефективності для обох режимів однакові. В якості критеріїв термодинамічної ефективності для зріджувального режиму обраний коефіцієнт зрідження, для рефрижераторного режиму - питома холодопродуктивність.

На прикладі чисельних розрахунків показано, що термодинамічний ККД дросельної ступені остаточного охолодження в зріджувальному режимі більше аналогічного критерію для рефрижераторного режиму.

Ключові слова: кріогенна система, дросельна ступінь остаточного охолодження, термодинамічна ефективність, термодинамічний ККД, ексергія.

ABSTRACT

A critical review of the literature on the decomposition of cryogenic systems for various purposes. based on which the possible stages of the final helium installations are presented.

The calculation scheme for thermodynamic calculation of the throttle stage of final cooling is made. Using the software developed at the Department of Cryogenic Engineering ONUT, the calculation of the optimal direct flow pressures for refrigeration and liquefaction modes of cryogenic helium plants.

It is shown that the pressures of direct flows corresponding to the maximum thermodynamic efficiency for both modes are the same. As the criteria of thermodynamic efficiency for the liquefaction mode the liquefaction coefficient is chosen, for the refrigeration mode - specific refrigeration capacity.

The example of numerical calculations shows that the thermodynamic efficiency of the throttle stage of the final cooling in the liquefaction mode is greater than a similar criterion for the refrigeration mode.

Keywords: cryogenic system, throttle stage of final cooling, thermodynamic efficiency, thermodynamic efficiency, exergy.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТТЯ СТУПЕНІ ОХОЛОДЖЕННЯ ДЛЯ КРІОГЕННИХ СИСТЕМ.....	10
1.1. Види ступенів охолодження кріогенних установок	11
1.2. Аналіз ступенів охолодження кріогенних систем	14
2. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТЕРМОДИНАМІЧНОГО АНАЛІЗУ	17
2.1. Постановка завдання	17
2.2. Визначення ексергії потоків робочих тіл	20
3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КРІОГЕННИХ РЕЧОВИН	23
4. ТЕРМОДИНАМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ДРОСЕЛЬНОЇ СТУПЕНІ ОСТАТОЧНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ	35
5. Охорона праці.....	78
5.1. Техніка безпеки при роботі з гелієм	44
5.2. Випробування системи на щільність	47
5.3. Розрахунок вентиляції приміщення	47
5.4. Розрахунок штучного освітлення	50
5.5. Розрахунок системи заземлення	51
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ.	55
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	56
ДОДАТОК А.....	58
ДОДАТОК Б.....	69

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18								
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата									
Розраб	Танасенко Р.А.				Термодинамічний аналіз дросельної кінцевої ступені охолодження кріогенної гелієвої установки				Литера	Арк.	Аркш.		
Пров	Грудка Б.Г.								у		6	76	
									ЕН-142				
Н. Контр.	Грудка Б.Г.												
Утв													

ВСТУП

Кріогеніка - область науки, що охоплює дослідження, розвиток і застосування кріогенної техніки. Кріогенна техніка-це область техніки, пов'язана з досягненням або практичним використанням кріогенних температур. Кріогенні температури - температури від 120 К і нижче.

Дату народження кріогеніки прийнято вважати жовтень 1877 року, коли Л. Кайтс і Р. Піктс перші здійснили процес зрідження газоподібного кисню.

Протягом тривалого часу кріогенна техніка була предметом вивчення порівняно невеликого кола вчених і лише до сорокових років нашого століття вона вийшла за стіни лабораторій; в наші дні застосування кріогенної техніки є одним з найважливіших напрямів технічного прогресу. Металургія і хімія, енергетика і електроніка, біологія і медицина, ракетна техніка і космонавтика, ядерна фізика та техніка експерименту у всіх зростаючих масштабах використовують кріогенне устаткування і кріогенні продукти.

В кінці 60-х років були розпочаті роботи з технічного використання надпровідності. Застосування надпровідних пристроїв відкривало широкі можливості для значного поліпшення характеристик електротехнічного, енергетичного та іншого обладнання.

В середині 60-х років серійно випускалися для отримання рідкого гелію зріджувальні установки Г-2, Г-8, Г-45, посудину СГ-10 для зберігання рідкого гелію, рефрижераторних установка К-2 продуктивністю 600 Вт на температурному рівні 20 К. К теперішнього часу освоєно серійний випуск універсального кріогенного гелієвого обладнання для проведення лабораторних і напівпромислових досліджень надпровідних пристроїв: кріогенних гелієвих установок холодопродуктивністю від 1,5 до 1500 Вт на температурному рівні 4,2 К і 4000 Вт, на температурному рівні 15-20 К, а також кріогенних гелієвих рефрижераторних і зріджувальних установок продуктивністю 40 і 90 л / год рідкого гелію; транспортних судин рідкого гелію ємністю від 10 до 100 л і цистерн до 10 м³, гелієвих криостатів ємністю 0,3 м³ для досліджень надпровідних пристроїв.

До початку 70-х років в кріогенної техніки остаточно сформувався напрям - мікрокріогеніка, завданнями якої є створення малогабаритних систем охолодження. Мікрокріогеніка розвивається в основному в зв'язку з потребою

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

промисловості в кріогенних мікрорефріжераторах для охолодження чутливих елементів електронних пристроїв.

Гелій був виявлений Ж. Жансеном і Д. Локнер в 1868 році при вивченні складу сонячної речовини спектральним методом. На землі гелій виявлений Рамзаєм через 27 років. Об'ємний вміст гелію в атмосфері Землі дуже мало. Основний спосіб отримання газоподібного гелію - виділення його з природного газу, в якому частка гелію набагато більше ніж в повітрі. В даний час для отримання гелію з сирого природного газу застосовують метод

низькотемпературної ректифікації. Гелій має два стабільних ізотопи: гелій-3 (^3He) і гелій-4 (^4He), у яких масові числа рівні відповідно 3 і 4. Наїбілье поширений в природі ізотоп гелію ^4He . Він зустрічається в атмосфері і в земних надрах в складі природних газу.

Гелій відрізняється від всіх інших газів поряд властивостей. Він не має потрійний точки, в якій інші речовини можуть існувати одночасно в трьох станах. Гелій при атмосферному тиску залишається рідким аж до температури абсолютного нуля. При атмосферному тиску рідкий гелій кипить при температурі 4,2 К. Твердим гелій стає при тиску вище 2,5 МПа.

При параметрах вище критичних ($P = 0,23\text{ МПа}$, $T = 5,2\text{ К}$) гелій існує як газ. Температура інверсії гелію приблизно 40 К, тому при дроселюванні при температурі навколишнього середовища гелій нагрівається. Отже, для зрідження гелію в процесі дроселювання необхідно здійснити його попереднє охолодження до температури меншою верхньої точки інверсії.

Густина гелію не велика, питома теплоємність дуже значна. Газоподібний гелій має високу теплопровідність і є хорошим теплоносієм. Його широко застосовують в кріогенній техніки як кріоагент, оскільки він нейтральний і не горить, а отже безпечний в зверненні.

В сучасних зріджувач робочий прогрес відбувається в результаті ефекту дроселювання гелію при початковому тиску 2-2,5 МПа, а також використання в нижній сходинці охолодження парорідинного детандера. Попереднє охолодження стисненого гелію здійснюється спочатку рідким азотом або рідким воднем, а потім за рахунок роботи одного або декількох детандерів.

Зріджувач гелію з попередніми водневим охолодженням, незважаючи на простоту технологічної схеми, мають досить обмежене застосування внаслідок підвищеної вибухонебезпечності рідкого водню.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		8

У 1934 році П.Л.Капица запропонував новий тип зріджувача гелію, в якому попереднє охолодження рідким воднем було замінено охолодженням за рахунок роботи поршневого детандера. Надалі зріджувач подібного типу знайшли широке застосування.

Основні показники, що характеризують ефективність роботи - χ - коефіцієнт зрідження і $l_{уд}$ - питомі витрати енергії в циклі.

Все гелієві установки (не дивлячись на різноманітність існуючих циклів) мають певне число однотипних елементів або ступенів: ступінь компресора, ступінь із зовнішнім охолодженням, ступінь з розширенням газу в детандере, ступінь з розширенням газу в дросельному пристрої або парожідкостная детандере. У ступені компресора для стиснення газу використовують поршнєві, гвинтові і відцентрові компресори. В установках великої продуктивності (понад 100 л / ч) доцільно застосовувати детандери турбінного типу.

Широку номенклатуру випуску гелієвих зріджувач і рефрижераторів мають провідні виробники криогенного обладнання: "Лінде" (Німеччина), "Зульцер" (Швейцарія), "Мітсубіші" (Японія), "Аір Ликвид" (Франція), "Кріодженік Технолоджи" (США).

Крім великих установок фірми також виготовляють комбіновані установки продуктивністю від 10 до 100л / год. Один і той же вакуумний блок найчастіше використовується для установок як малої (менш 10 л / год), так і середньої (від 30 до 40 л / год) продуктивності. Всі сучасні криогенні гелієві установки автоматизовані, що дозволяє обслуговуючому персоналу обмежуватися контролем їх роботи.

Більшість установок будується для роботи на температурному рівні $\approx 4,5\text{ K}$, однак рефрижераторні установки можуть працювати на більш високих (12 -120 K) і на більш низьких ($\approx 1,8\text{ K}$) температурних рівнях охолодження.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		9

1. ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТТЯ СТУПЕНІ ОХОЛОДЖЕННЯ ДЛЯ КРІОГЕННИХ СИСТЕМ

Декомпозиція є метод дослідження складного технічного об'єкта, що полягає в його умовному розбитті на ряд підсистем. Мета декомпозиції - замінити дослідження всієї системи в цілому рішенням простіших завдань для складових її підсистем. Вона є складовою частиною блочно-ієрархічного принципу в автоматизованому проектуванні [1].

Використання декомпозиції передбачає структурний аналіз даної системи. Багато в чому ефективність даного методу залежить від наявності в схемі структурно стійких груп елементів і алгоритмів рішення для них відповідних завдань. Для кріогенних установок основи їх структурного аналізу викладені в статтях [2 - 4] і узагальнені в монографії [5]. Однак, для сучасного рівня проектування, коли необхідне застосування в ньому формалізованих підходів, актуальним є подальший розвиток структурного аналізу кріогенних систем.

Якщо на термодинамічній рівні розглядати ієрархію кріогенної системи у порядку зростання складності завдання, то вона видається ланцюжком вузлова точка - елемент - ступінь охолодження - схема установки. Варіант формалізації вузловий точки розглянуто і запропоновано його реалізація в роботі [6]. При цьому для термодинамічної розрахунку і аналізу виявилось необхідним класифікувати ці точки по виду пов'язаних з ними енергетичних потоків. Природним далі було формально визначити елемент кріогенної установки як безліч вузових точок різного типу [7]. В останній роботі був створений образ елемента-предка, необхідний при використанні об'єктно-орієнтованого програмування.

Подальшим об'єктом дослідження в наведеній вище ланцюжку є ступінь охолодження. Дане поняття досить часто зустрічається в літературі по низькотемпературної техніки. Крім згаданих вище робіт [2 - 5] слід виділити результати визначення оптимальної кількості цих ступенів для зріджувальних установок на різних температурних рівнях охолодження [8]. Відомо аналітичний розв'язок задачі знаходження температур включення для каскадних детандерних ступенів охолодження, отримане П.Л. Капицею [9]. У той же час багато питань, пов'язаних з ними залишається нез'ясованими і навіть не поставленими. В першу чергу це стосується визначення ступеня охолодження.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
						10
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

1.1. Види ступенів охолодження кріогенних установок

При декомпозиції кріогенних систем поряд зі ступенем охолодження застосовуються також терміни "блок" і "вузол". Прикладами цього є: блок комплексного очищення повітророздільної установки (ПРУ), блок охолодження кріогенної гелієвої установки, вузол теплообміну ПРУ, вузол ректифікації ПРУ.

Серед усіх цих понять найбільш чітко визначення є для блоку. В даному технічному сенсі під блоком розуміється група елементів, що знаходяться в єдиному корпусі або закріплених на одній основі. Тобто блок відображає конструктивну особливість цієї групи і може бути використаний, перш за все, для опису схеми установки, а не для її аналітичного дослідження. Хоча при декомпозиції кріогенної установки застосування цього поняття є цілком правомірним.

Формулювання для вузла як виділеного безлічі елементів в спеціальній літературі по кріогеніка відсутня. Виходячи з аналізу практичного застосування цього поняття, можна уявити вузол як групу переважно однотипних елементів, що мають певне призначення.

В роботі [5] термін "ступінь" розглядається як синонім слова "підсистема". Власне цим і обмежуються всі методологічні питання, пов'язані з даним терміном. У той же час дефініція ступені охолодження повинна містити, принаймні, вказівку на об'єкт, який охолоджується в ній. Якщо мати на увазі термомеханічний спосіб охолодження, то аналіз наявних в літературі видів ступенів кріогенних установок вказує на те, що для переважної більшості випадків в них відбувається зниження температури одного або декількох прямих (стислих) потоків основних робочих тіл, що мають тиск циклу. Однак, відомі випадки, коли зниження температури має місце в детандере, включеному в зворотний потік. Наприклад, це спостерігається в ВРУ, призначеної для виділення газоподібного азоту. Тому під об'єктом охолодження в загальному треба розуміти основне робоче тіло кріогенної системи.

Структура всієї системи охолодження робочих тіл, згідно [5], може бути представлена у вигляді схеми, зображеної на рис. 1.1. На ньому через СПО і СОО відповідно позначені ступінь попереднього і ступінь остаточного охолодження.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		11

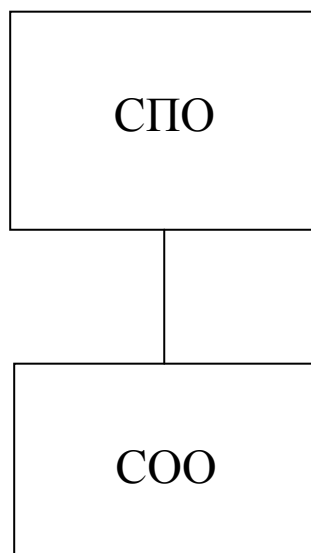


Рис. 1.1. Схема ступені охолодження

Виділення СОО є обґрунтованим, оскільки не всяка ступінь охолодження може бути використана в цій якості. В СОО досягається найнижча температура в установці. Обов'язкова умова для цього полягає в необхідності реалізації в ній процесу внутрішнього охолодження робочого тіла.

Відмінність між СОО і СПО також полягає в тому, що якщо перша є єдиною шаблоном, то СПО може включати в себе кілька ступенів охолодження. Тому правильніше було б застосовувати для розшифровки СПО множину, тобто уявити її як ступені попереднього охолодження. У той же час безліч СПО може бути і порожнім, як наприклад, в простому дросельному і простому детандерна циклах.

Як показує аналіз відомих розглянутих ступенів, кожна з них містить хоча б один теплообмінний апарат. Останній факт викликає певні методологічні труднощі. Наприклад, в літературі використовується поняття ступені зовнішнього охолодження для варіанта, зображеного на рис. 1.2. У ньому зниження температури прямого потоку робочого тіла (процес 4-5) здійснюється за рахунок зовнішнього по відношенню до основного циклу джерела (ванна проміжного охолодження).

1.2 Аналіз ступенів охолодження кріогенних систем

Найвиразніше ступені охолодження можуть бути виявлені для рефрижераторних і зріджувальних кріогенних систем. При структурному аналізі газороздільних установок є багато проблем в їх декомпозиції, починаючи з розподілу елементів між ступенем охолодження робочого тіла і ступенем використання ефекту охолодження, описаної в роботі [5]. Однак і в установках цього типу існують стійкі групи елементів, які відносяться до східців охолодження.

Для систематизації та аналізу ступенів використовувалися цикли промислових кріогенних установок на гелевий, водневий і азотний температурні рівні, повітророзподільних установок і дросельних мікрокриогенної систем на сумішах речовин. При цьому головним чином розглядалися схеми, що використовують ефекти процесів дроселювання і детандірованія, з яких були виділені для дослідження вісімнадцять різних ступенів, включаючи чотири варіанти зовнішнього охолодження.

Вся ця сукупність може бути умовно розділена на дві групи, що відрізняються видом охолодження. Такими групами є: ступені внутрішнього і ступені зовнішнього охолодження, де зовнішнє охолодження розглядається по відношенню до основного циклу. Такий поділ стало можливим, оскільки не було виявлено ступенів, одночасно містять елементи, що реалізують обидва види охолодження. Проте, теоретично такий випадок уявити можна. У свою чергу підсистеми з внутрішнім охолодженням можуть бути класифіковані за ознакою можливості їх використання в якості СОО.

На рис. 1.3 зображені найбільш типові ступені внутрішнього охолодження. Рис. 1.3а і 1.3б являють собою основу відповідно простих дросельного і детандерна циклів. На рис 1.3с показана ступінь охолодження циклу низького тиску. Схема 3d застосовується в циклах ВРУ середнього тиску, схема 1.3е - в циклі з проміжним дроселюванням. Підсистема 1.3f є складовою частиною циклу середнього тиску.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
						14
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Ступінь охолодження може бути представлена як СОО, якщо прямий потік в ній закінчується елементом, що забезпечує процес внутрішнього охолодження. Дана умова є необхідною для штучного отримання кріогенних температур. На рис. 1.3 прямі потоки позначені стрілками вниз, тобто нижнім елементом за цими потокам повинен бути або дросель або детандер. Із зображених на даному рисунку ступенів варіанти 1.3а - 1.3d можуть вживатися як СОО, а схеми 1.3е, 1.3f - немає.

Ще однією ознакою, за яким можуть відрізнятися ступені внутрішнього охолодження є число елементів, що реалізують цей вид охолодження. На практиці цей ступінь містить не більше двох, причому різних, таких елементів. Необхідно відзначити, що будь-яка з виявлених ступенів з двома елементами внутрішнього охолодження може бути використана в якості СОО.

Однією з початкових проблем, пов'язаних зі ступенями охолодження, є їх ідентифікація. В принципі вона може бути проведена двома способами. Перший полягає в привласненні ступені імені, що містить вказівку на елементи внутрішнього охолодження. Прикладами такого підходу можуть служити: "дросельний ступінь", "детандерний ступінь", "дросельно-детандерний ступінь". Однак, як показує аналіз виявлених ступенів, ці імена можуть бути використані через їх неоднозначності лише в науковій літературі з одночасною посиланням на конкретну схему. Дійсно, схеми 1.3а і 1.3е є дросельними, а схеми 1.3с, 1.3d - дросельно-детандерна ступенями. Серед всіх встановлених ступенів найбільше число, що дорівнює п'яти, підпадає під поняття детандерних.

Другий спосіб ідентифікації орієнтований на комп'ютерну технологію. Тому логічне ім'я ступені повинно бути формалізована, що передбачає його унікальність і структурованість. За основу при її іменуванні доцільно взяти певні вище ознаки класифікації. Була зроблена спроба скласти ім'я ступені, що враховує такі особливості:

- Ставлення ступені до виду внутрішнього або зовнішнього охолодження.
- Можливість використання її в якості ступені остаточного охолодження.
- Порядок розташування елементів по прямим та зворотнім потоками.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
						15
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

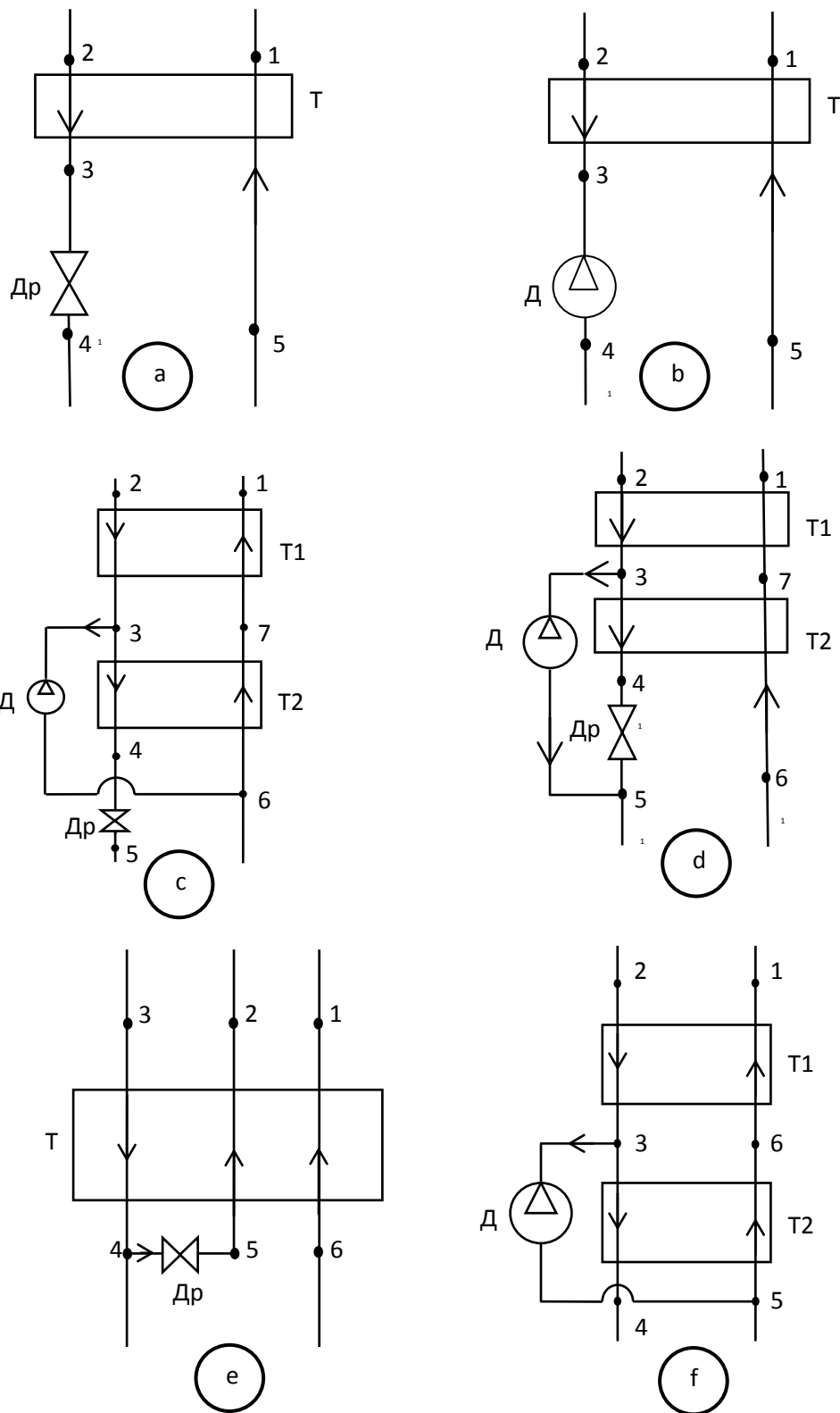


Рис. 1.3. Схеми дросельних і детандерних ступенів внутрішнього охолодження (Д - детандер, Др - дросель)

Дана спроба виявилася невдалою через збіг імен деяких ступенів, наприклад, зображених на малюнках 3с і 3d.

2. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТЕРМОДИНАМІЧНОГО АНАЛІЗУ

2.1. Постановка завдання

Термодинамічний аналіз являє собою метод термодинамічного дослідження технічних систем (як в цілому, так і по засобом їх декомпозиції) з метою отримання найбільш повної інформації про процеси перетворення енергії, що відбуваються в них.

Форми енергії, що беруть участь у всіх енергетичних перетвореннях, можуть бути зведені до двох видів: до першого, куди відносяться форми енергії, повністю перетворені в будь-які інші форми; до другого, куди відносяться ті форми, які не можуть бути в загальному випадку повністю перетворені в інші форми енергії

Енергія першого виду (наприклад, електрична, механічна, магнітна і ін.) В силу своєї зворотності, що не залежить від параметрів навколишнього середовища, може бути в межі повністю використана в технічних цілях. Всі форми енергії такого виду рівнозначні не тільки кількісно, але і якістю. Для аналізу таких технічних систем і їх елементів, всередині яких не накопичується і не витрачається енергія, без обмежень може бути застосовано рівняння

$$\sum W' = \sum W'', \quad (2.1)$$

де, $\sum W'$ и $\sum W''$ - суми відповідно підведених і відведених потоків енергії.

На основі балансу (2.1) складаються рівняння для обчислення безрозмірних коефіцієнтів, що характеризують різні системи перетворення енергії. Всі вони побудовані за формулою

$$\eta = \frac{\sum W_1}{\sum W_2}, \quad (2.2)$$

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
						17
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

де величина $\sum W_1$ і $\sum W_2$ показують суми потоків енергії, що розглядаються для кожної системи, причому величина $\sum W_1$ повинна показувати корисний технічний ефект процесу, а $\sum W_2$ - витрати енергії на його проведення.

Всі балансові розрахунки, які стосуються енергії першого виду можуть вестися на основі тільки першого початку термодинаміки.

Форми енергії другого виду (наприклад, внутрішня енергія робочого тіла, енергія, що передається у вигляді теплового потоку та ін.) Якісно різні, оскільки ступінь їх «необоротності», яка характеризується ентропією, різна. Межі оборотності таких форм енергії пов'язані не тільки з параметрами, її визначальними, але і з параметрами навколишнього середовища. в межі при рівності параметрів робочого тіла і навколишнього середовища технічна цінність його енергії дорівнює нулю.

При вирішенні інженерних задач в області низькотемпературної техніки необхідно враховувати, що в них беруть участь форми енергії як першого, так і другого виду.

Мірою оборотності, придатності заданої кількості енергії будь-якого виду, що характеризується ентропією, служить кількість енергії, незв'язане з ентропією (рівне, наприклад, механічної або електричної роботи), яке може бути отримано з неї в оборотному процесі взаємодії з навколишнім середовищем. Умови такого перетворення визначається другим початком термодинаміки. Цей захід придатності будь-якого виду енергії і була названа - ексергією.

Отже, ексергія термодинамічної системи в даному стані визначається кількістю енергії, що не характеризується ентропією, яка може бути отримана зовнішнім приймачем енергії від системи при її оборотному переході з одного стану в стан повної рівноваги з навколишнім середовищем.

Вже згадана система може бути як термодинамічною (наприклад, деяка кількість робочого тіла в замкнутому просторі або в потоці), так і технічною (наприклад, установка класу L, R або D).

Навколишнє середовище (під терміном «навколишнє середовище»

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		18

розуміється рівноважна частина зовнішнього середовища, що знаходиться поза межами системи) характеризується тим, що її характеристики не залежать від параметрів даної системи і тим, що всі її компоненти повинні знаходитися в повному термодинамічній рівновазі. (Насправді у навколишньому середовищі існують градієнти температур, тисків і хімічних потенціалів, однак при вирішенні переважної більшості завдань цими обставинами можна знехтувати. Тому використання поняття навколишнього середовища, як і інших термодинамічних абстракцій, плідно і практично необхідно.)

Параметри навколишнього середовища в більшості завдань можуть вважатися постійними. Однак в ряді випадків ці параметри можуть змінюватися (наприклад, в авіаційних системах при різних висотах, під впливом кліматичних умов і ін.).

У переважній більшості завдань для повної характеристики навколишнього середовища досить знати температуру $T_{o,c}$, тиск $p_{o,c}$ і хімічний склад. До тих пір, поки всі параметри системи і її частин не зрівнюються з відповідними параметрами навколишнього середовища, рівновага не буде досягнута і система у взаємодії з середовищем може призвести і віддати деяку зовнішню роботу, що означає, що вона має певну ексергією. У ряді випадків система, не віддаючи енергію (і навіть отримуючи її), може виконувати роботу за рахунок навколишнього середовища (прикладом такої системи є посуд, в якому тиск менше атмосферного). При повній рівновазі системи і середовища ексергія дорівнює нулю. Такий стан системи називається нульовим (в літературі англійською мовою *dead state* - «мертве стан»).

Зовнішні об'єкти - джерела і приймачі енергії - характеризуються перш за все тим, що в них хоча б один з визначальних параметрів відрізняється від параметрів навколишнього середовища. Тому вони можуть бути використані в якості зовнішніх джерел ексергії для «живлення» системи і забезпечення її безперервного функціонування (наприклад, паливо, випромінювання з температурою, відмінною від рівноважної, стиснений природний газ, термальні води і т.д.).

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
						19
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

З першого і другого законів термодинаміки безпосередньо випливає, що в кожному даному стані ексергія системи, так само як і енергія, має певне фіксоване значення.

Взаємодія системи з навколишнім середовищем може проходити як зворотно (ідеальний процес), так і незворотно (реальний процес).

В ідеальному процесі буде отримана робота, рівна ексергії. Якщо процес буде зупинений до настання рівноваги системи і середовища, то отримана робота буде дорівнює убутку ексергії системи.

У реальному процесі робота буде менше, ніж спад ексергії (в межах робота може дорівнювати нулю). Це означає, що частина ексергії не перетвориться в роботу, а зникне, буде втрачена. Ексергія відповідає закону збереження тільки в зворотних процесах; у всіх інших випадках (реальні системи) вона може частково або повністю зникнути, губитися в результаті дисипації (розсіювання) енергії в необоротних процесах. Природно, що чим менше ця втрата ексергії, тим процес термодинамічно більш досконалий.

Складаючи рівняння типу (30) і (31) стосовно ексергії E , ми робимо їх універсальними і повністю придатними для будь-яких термодинамічних систем, незалежно від видів енергії, що беруть участь в процесі:

$$\sum E' \geq \sum E'' \quad (2.3)$$

або

$$D = \sum E' - \sum E'', \quad (2.3a)$$

$$\eta_e = \frac{\sum E''}{\sum E'} \quad (2.4)$$

де $\sum E'$ і $\sum E''$ - суми відповідно підведених до системи і відведених від неї потоків ексергії; D - втрата ексергії (Від dissipation - дисипація, розсіювання; дисипація енергії характеризується, втратою відповідної кількості ексергії.). На відміну від рівнянь (2.1) і (2.2), що відображають енергетичний баланс, рівняння (2.3), (2.3a) і (2.4) - відображають ексергетичний баланс системи, тобто

спираються як на перше, так і на друге початки термодинаміки.

Ексергетичний баланс на відміну від енергетичного балансу у всіх випадках показує величину втрат від незворотності в системі і ступінь її термодинамічної досконалості.

Величини $\sum E$ включають ексергію тих видів речовин і енергій, які входять в енергетичний баланс даної технічної системи. Стосовно до низькотемпературної техніки $\sum E$ включає ексергію потоку речовини E_m , ексергію теплового потоку E_q , а також роботу L (рівну E для механічної або електричної енергії).

З рівняння (2.3) випливає, що ексергія будь-якого виду в зворотних процесах може бути приведена повністю в ексергію будь-якого іншого виду незалежно від напрямку цих процесів.

Для низькотемпературних систем в загальному випадку необхідно при розрахунку величин ексергії враховувати взаємодії трьох можливих видів в самій системі і між системою і навколишнім середовищем: термічні (узагальнена сила - температура T), деформаційні (узагальнена сила - тиск P) і хімічні (узагальнена сила - хімічний потенціал μ). Останній вид взаємодій пов'язаний здебільшого з обміном речовиною між системою і навколишнім середовищем, тому він характерний для відкритих систем, наприклад установок класу D.

Ексергія потоку речовини E_m^* складається з двох складових: термомеханічної (або фізичної) і нульовий (або хімічної). Перша пов'язана з різницею термічних (ΔT) і механічних (ΔP) параметрів речовини і середовища і вимірюється кількістю роботи, яка може бути отримана в оборотному процесі встановлення рівноваги потоків речовини із середовищем за допомогою енергетичної взаємодії, але без обміну матерією (при цьому $p \rightarrow p_{o.c}$ і $T \rightarrow T_{o.c}$).

Друга складова пов'язана з встановленням рівності хімічних потенціалів між складовими компонентами робочого тіла і навколишнього середовища ($\mu_i \rightarrow \mu_{i,o.c}$). Вона вимірюється кількістю роботи, яка може бути отримана в оборотному процесі встановлення рівноваги компонентів робочого тіла даного складу з відповідними компонентами навколишнього середовища при $p_{o.c}$ і $T_{o.c}$.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		21

Речовина знаходиться в так званому нульовому стані, так як термомеханічні параметри робочого тіла знаходяться в рівновазі з параметрами середовища. Термін «нульова», крім того, зручніше, оскільки відображає той факт, що процеси взаємодії з навколишнім середовищем, пов'язані з обміном масою, не завжди супроводжуються хімічними реакціями (наприклад, поділ суміші газів або процеси змішання і розчинення).

2.2. Визначення ексергії потоків робочих тіл

Для розрахунку ексергії необхідно визначити для кожного виду робочого тіла хімічну складову ексергії, використовуючи наступну формулу:

$$e_{ch} = T_{oc} \cdot s_{oc} - i_{oc} \quad (2.7)$$

де: e – ексергія робочих тіл у вузлових точках;

oc – навколишнє середовище;

s_{oc} , i_{oc} - ентропія і ентальпія робочого тіла (N_2 , O_2 , Air , $0,3O_2 + 0,7N_2$) при T_{oc} і $P_{oc} = 0,1$ МПа.

Фізична складова ексергії e_{ph} розраховується за формулою:

$$e_{phk} = T_{oc}(s_{oc} - s_k) - (i_{oc} - i_k) \quad (2.8)$$

де: s_k , i_k - питомі ентропія і ентальпія робочого тіла в k -ій вузловій точці.

Величина e_k обчислюється за формулою:

$$e_k = e_{ch} + e_{phk} \quad (2.9)$$

Повна ексергія E_k обчислюється за формулою:

$$E_k = e_k \cdot G_k \quad (2.10)$$

де G_k – витрата робочого тіла в k -ій вузловій точці.

Так як далі будуть розглядатись лише чисті кріогенні речовини, то в розрахунках можна використовувати лише фізичну складову ексергії.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		22

3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КРІОГЕННИХ РЕЧОВИН

До розглянутих далі двопараметричного кубічним рівнянням стану (КУС) ван - дер - ваальсівського типу, що має назву далі просто КУС, відносяться:

- рівняння Ван - дер - Ваальса (W)

$$p = RT / (v - b) - a / v^2, \quad (3.1)$$

- рівняння Редліха - Квонг (RK) і його модифікації, записані у вигляді

$$p = RT \left[\frac{1}{v - b} - \frac{a(T)}{v(v + b)} \right], \quad (3.2)$$

- рівняння Пенга - Робінсона (PR)

$$p = \frac{RT}{v - b} - \frac{a(T)}{v^2 + 2bv - b^2}, \quad (3.3)$$

де $a(T)$, b - відповідно температурна функція і параметр рівняння стану.

Основна увага в подальшому буде приділено модифікаціям рівняння (2), що мають найбільше практичне застосування, серед яких модифікація Вільсона (RKW), Соаве (RKS), Барні - Кінга (RKVK) [3]. Дані модифікації відрізняються видом температурної функції $a(T)$ в рівнянні (2), які записуються як:

$$\text{RK:} \quad a(T) = 4,934(T_c / T)^{1,5} b, \quad (3.4)$$

$$\text{RKW:} \quad a(T) = 4,934[1 + k(T_c / T - 1)]b, \quad (3.5)$$

$$\text{RKS:} \quad a(T) = 4,934T_c / T [1 + k(1 - \sqrt{T / T_c})]^2 b, \quad (3.6)$$

$$\text{KBK:} \quad a(T) = 4,934[1 + k((T_c / T)^{1,5} - 1)]b, \quad (3.7)$$

$$\text{RKVK:} \quad a(T) = 4,934[1 + k((T_c / T)^{1,5} - 1)]b, \quad (3.8)$$

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		23

де k - підгінний параметр моделі, який визначається з опорних даних по парорідинній рівновазі. Нижній індекс c в останніх рівняннях і далі відносить розглянуту величину до критичної точки речовини.

Для рівняння стану W параметр a знаходиться зі співвідношення

$$a = \frac{27 (RT_c)^2}{64 p_c}. \quad (3.9)$$

Параметр b зазвичай розраховується за відомим критичних значень тиску і температури речовини

Для рівняння стану RK:

Для рівняння стану PR:

Вирази (3.4) - (3.7) є різними способами апроксимації функції $a(T)$ в рівнянні RK, і для конкретного речовини вони залежать від наведеної температури $\tau = T/T_c$. Розрахунок парорідинної рівноваги чистих речовин, крім самотійного завдання, є основою для визначення підгонного параметра k по опорним даними в стані насичення. Він необхідний також при розрахунку і прогнозуванні азеотропних станів сумішей методом максвеллівською кривої [4].

Для розрахунку термодинамічних властивостей n - компонентної суміші із використанням користуванням КУС зазвичай використовуються наступні правила комбінування параметрів цих рівнянь стану

$$b_m = \sum_{i=1}^n x_i b_i,$$

$$a_m = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j a_{ij}(T),$$

де нижні індекси i, j, m позначають відповідно i -ий, j -ий компоненти і суміш; x - відносний вміст компонентів в суміші.

Температурні функції $a_{ij}(T)$ з використанням додаткової умови виражаються через температурні функції i -го і j -го компонентів $a_{ii}(T)$ і $a_{jj}(T)$.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		24

Рівняння стану (3.1) - (3.3) спільно з правилами комбінування реалізують одножідкостну модель суміші, згідно з якою як суміш, так і компоненти підкоряються одному і тому ж виду рівняння стану. При цьому істотно, що комбінуються НЕ підганяльні параметри виразів (3.4) - (3.7), а температурні функції КУС.

Останнє означає, що при розрахунку термодинамічних властивостей сумішей за допомогою КУС необхідно вибрати один і той же вид рівняння стану, але допустимо використовувати різні модифікації температурної функції для компонентів. Більш того, можна розробляти окремі модифікації функції $a(T)$ як для обраних компонентів, так і для класів речовин.

Зокрема, для гелію, водню, неону ні форма виразів (3.5) - (3.7), ні існуючий спосіб визначення підгінних параметрів k не дають можливості визначити з прийнятною точністю їх термодинамічні властивості при температурах навколишнього середовища і вище. Тому можна розглядати задачу відшукування температурних функцій для цих речовин безвідносно будь-якої з модифікацій рівняння РК.

Використання різних модифікацій при обчисленні термодинамічних властивостей сумішей вимагає коригування розрахункових співвідношень для калорических величин і летючості. Існує узагальнений алгоритм розрахунку рівноваги рідина - пар чистих речовин, викладений в попередньому розділі. Однак, для КУС (3.1)

- (3.3) можливий інший, описаний нижче, спосіб вирішення цього завдання, що враховує особливості рівнянь стану ван - дер - ваальсовского типу.

Рівняння стану (3.1) - (3.3) можуть бути записані в безрозмірною формі як

$$z_b = z_b(\varphi_b, \alpha(\tau)), \quad (3.10)$$

де

$$z_b = pb/(RT), \quad \varphi_b = v/b, \quad \alpha(\tau) = a(\tau)/b. \quad (3.11)$$

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		25

Зазначене подання КУС можна розглядати як термодинамічну подобу наведених властивостей в координатах φ, α .

Функція z_b є аналогом коефіцієнта стисливості z , φ - приведенного обсягу. Конкретний вид функції $\tau(\alpha)$ для рівняння стану РК може бути легко встановлений з виразів (3.4) - (3.7). Вид КУС в цих координатах не залежить від модифікації рівняння стану. У даній системі координат існує своя критична точка і крива фазового рівноваги.

Характерні значення параметрів критичної точки для різних форм КУС містяться в таблиці 3.1. Ці характеристики не залежать від модифікацій функції $\alpha(\tau)$.

Таблиця 3.1. Параметри критичної точки в наведених координатах

Уравнение состояния	α_c	φ_{bc}	z_{bc}	$(dz_b/d\alpha)_c$
RK	4,934	3,8473	0,08664	-0,05362
W	3,375	3,0000	0,12500	-0,11111
PR	5,877	3,9511	0,07780	-0,04457

Остання колонка таблиці 3.1 характеризує нахил кривої фазового рівноваги для критичної точки в даній системі координат.

Рішення даної задачі в пропонованих безрозмірних координатах має такі переваги:

1. Результати рішення залежать тільки від форми рівняння стану і не залежать від його модифікації (виду функції $\tau(\alpha)$). Наприклад, для всіх модифікацій рівняння РК мають однакові значення в умовах парожіdkостной рівноваги однойменні наведені термодинамічні функції.
2. Отримані дані не залежать від роду речовини. Вони можуть бути використані і для сумішей, зокрема, для вибору початкових наближень при розрахунку фазових

рівноваг, а також для прогнозування і розрахунку азеотропних перетворень.

3. Отримані дані застосовні для будь-яких правил комбінування параметра b і температурної функції $\tau(\alpha)$. Ця обставина істотно полегшує визначення підгінних параметрів в правилах комбінування.

Розглянуті КУС в безрозмірною формі мають такий вигляд

W:
$$z_b = \frac{1}{\varphi - 1} - \frac{\alpha(\tau)}{\varphi^2},$$

RK и его модификации:
$$z_b = \frac{1}{\varphi - 1} - \frac{\alpha(\tau)}{\varphi(\varphi + 1)},$$

PR:
$$z_b = \frac{1}{\varphi - 1} - \frac{\alpha(\tau)}{\varphi^2 + 2\varphi + 1}.$$

Для рівняння стану в формі (3.10) завдання парожіdkостной рівноваги зводиться до знаходження рішення системи рівнянь

$$\begin{aligned} z_b(\varphi'_b, \alpha) - z_{bs} &= 0, \\ z_b(\varphi''_b, \alpha) - z_{bs} &= 0, \\ \int_{\varphi'_b}^{\varphi''_b} z_b(\varphi, \alpha) d\varphi &= z_{bs}(\varphi''_b - \varphi'_b), \end{aligned} \quad (3.12)$$

де індекси ' і '' відносять наведений обсяг відповідно до рідкої і парової фаз; індекс s характеризує стан насичення.

У цій системі умов парожіdkостной рівноваги функція $\alpha(\tau)$ є аналогом температури. Тоді одне з можливих рішень цього завдання зводиться до знаходження залежностей

Для вирішення системи рівнянь (3.12) необхідно аналітично взяти входить в неї інтеграл для розглянутих КУС в безрозмірною формі. Для них отримано такі вирази

$$W: \int_{\varphi_b'}^{\varphi_b''} z_b(\varphi_b, \alpha) d\varphi = \ln \frac{\varphi''-1}{\varphi'-1} + \alpha(\tau) \cdot \left(\frac{1}{\varphi''} - \frac{1}{\varphi'} \right),$$

$$RK \text{ і його модифікації: } \int_{\varphi_b'}^{\varphi_b''} z_b(\varphi_b, \alpha) d\varphi = \ln \frac{\varphi''-1}{\varphi'-1} - \alpha(\tau) \cdot \ln \frac{\varphi''(\varphi'+1)}{\varphi'(\varphi''+1)},$$

$$PR: \int_{\varphi_b'}^{\varphi_b''} z_b(\varphi_b, \alpha) d\varphi = \ln \frac{\varphi''-1}{\varphi'-1} - \frac{\alpha(\tau)}{2\sqrt{2}} \left[\ln \frac{\varphi''+1-\sqrt{2}}{\varphi''+1+\sqrt{2}} - \ln \frac{\varphi'+1-\sqrt{2}}{\varphi'+1+\sqrt{2}} \right].$$

У зв'язку з більш загальним характером безрозмірною форми подання двопараметричних КУС надалі будуть розглянуті алгоритми розв'язання задач парожіdkостной рівноваги, засновані саме на цій формі КУС. За аналогією зі звичайною формою КУС можливі дві постановки завдань.

Перша полягає у виборі в якості незалежної змінної величини α , що еквівалентно завданням температури насичення. У якості нижньої межі значення α виступає величини α_s , яка визначається для кож-дого виду КУС з даних таблиці 3.1.

Розрахунок парожіdkостной рівноваги для розмірних величин при заданій температурі насичення T_s зводиться до виконання послідовності обчислень, представленої на рисунку 3.1.



Рис. 3.1 - Схема рішення задачі парожіdkостной рівноваги в розмірному вигляді

Розглянемо алгоритм розрахунку системи рівнянь (3.12) при відомому значенні α . Особливістю КУС є можливість аналітичного визначення обсягів при заданих величинах температури і тиску як рішення кубічного рівняння. Для

наведених форм КУС обчислення обсягів реалізовано в процедурах *Maxvw.pas*, *Maxtk.pas*, *Maxtr.pas*. Останні два символи в імені процедури означають вид КУС. Формальними вхідними параметрами в цих процедурах виступають змінні α і z_b , а вихідними параметрами є найменше та найбільше значення обсягів.

Вибір початкового наближення при заданій температурі T_s заснований на використанні наближених залежностей між термодинамічними величинами в стані насичення, відомими як правила Кірхгофа і Гульдберга. Відповідно до правила Кірхгофа залежність тиску насичення від температури може бути представлена у вигляді:

$$\ln(p_s) = c_1 + c_2 / T_s.$$

Вхідні в останню рівність невідомі коефіцієнти c_1 і c_2 ви-раховуються виходячи з критичних значень температури і тиску, а також правила Гульдберга, відповідно до якого нормальна температура кипіння речовини T_n наближено дорівнює:

$$T_n \approx 0.635 \cdot T_c.$$

Після знаходження коефіцієнтів c_1 і c_2 вираз для нульового наближення для тиску насичення набуває вигляду

$$\ln(p_{s0}) = \frac{(1 - 0.635 / \tau_s)}{0.365} \ln(p_c), \quad (3.13)$$

де - τ наведення до критичного значення встановленої температури насичення; p_c - величина критичного тиску Речовини.

Блок - схема алгоритму вирішення даної задачі представ-лена на рис. 3.1 для використаного в даній роботі рівняння Редліха - Квонга - Вільсона (RKW, РКВ), для якого є індивідуальні параметри для багатьох кріогенних і холодильних агентів. Рішення завдання парожіdkостной рівноваги зумовлена необхідністю визначення підгінним параметра k .

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		29

Для реалізації алгоритму використані модулі RKW, DTYPES, IDEAL, в яких містяться необхідні підпрограми для розрахунку властивостей при різних наборах незалежних змінних, ідеальногазо-вих властивостей, а також опису уніфікованих змінних.

Після вибору речовини здійснюється введення вихідного значення температури насичення T_s і проводиться його аналіз шляхом порівняння з температурами в потрійній і критичній точках. Якщо введене значення лежить в межах дії, обмеженого цими температурами, то видається відповідна інформація і після коригування здійснюється повторне присвоєння значення T_s .

Далі за відомою величиною T_s і заданої речовини проводиться розрахунок приведеної температурної функції $\alpha(T)$. Для рівняння стану вона має вигляд

$$\alpha(T) = 4,934[1 + k(T_c / T - 1)].$$

На наступному кроці реалізації алгоритму знаходиться за формулою (3.13) початкове наближення для тиску насичення. За обчисленому значенню p_{s0} розраховується початкове наближення

$$z_{b0} = \frac{p_{s0}b}{RT_s},$$

де R - універсальна (індивідуальна) газова стала.

Подальший етап полягає у визначенні початкових обсягів φ'_0 , φ''_0 по відомим величинам α і z_b . Для цього використовується процедура `Maxtk.pas` з модуля RKW.

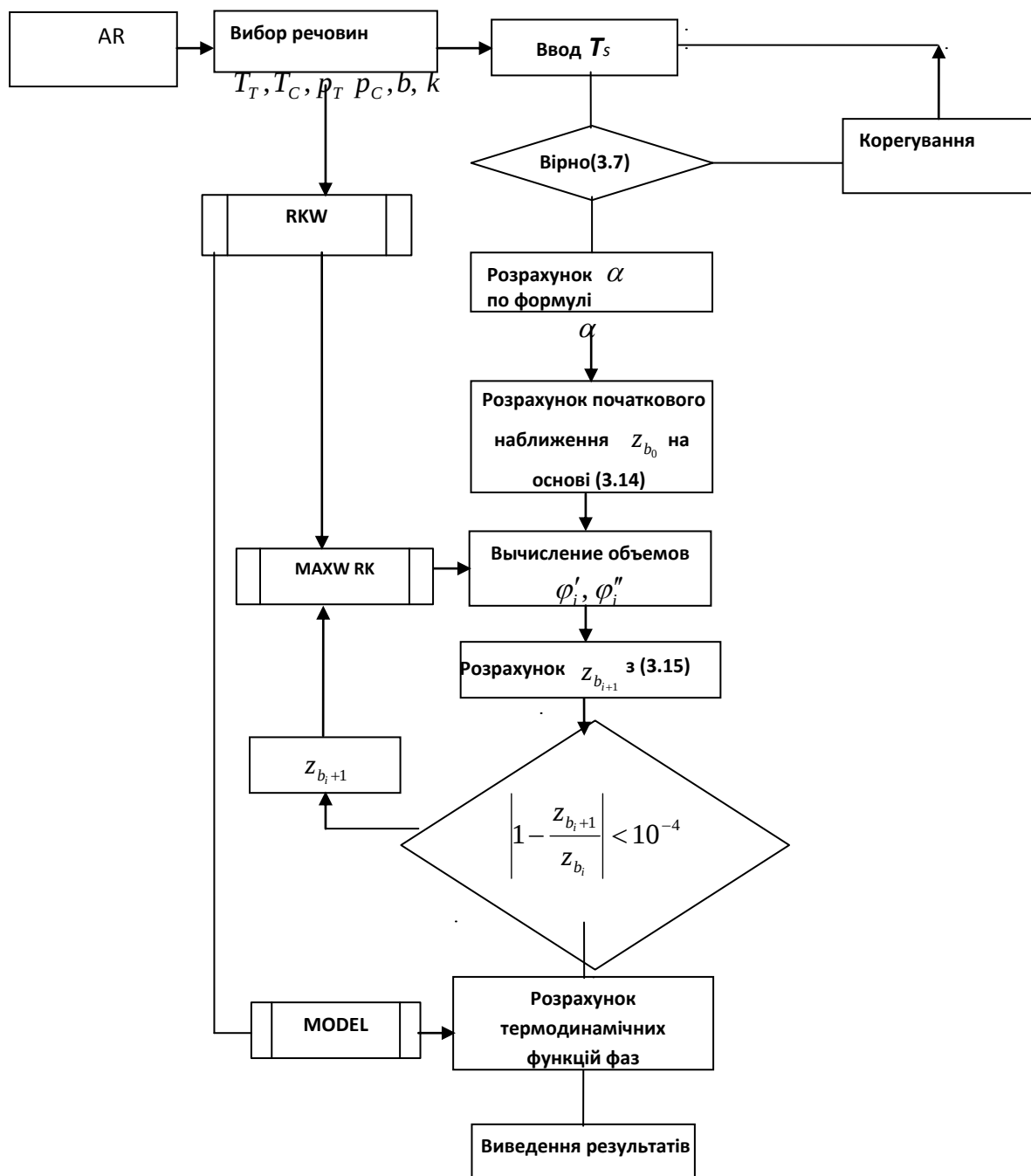


Рис. 3.1. Блок - схема алгоритму розв'язання задачі парорідинної рівноваги

Опис процедур і модулів для рівняння стану РКВ наведені в наступному розділі даної роботи.

Наступні наближення для величини знаходяться з виразу, що випливає з правила Максвелла

$$z_{bi+1} = \frac{\int_{\varphi_i'}^{\varphi_i''} z(\alpha, \varphi) d\varphi}{\varphi_i'' - \varphi_i'} \quad (3.14)$$

Умова закінчення ітераційної процедури виражається нерівністю (3.15), яке випливає з експериментальної похибки визначення тиску

$$\left| 1 - \frac{z_{bi+1}}{z_{bi}} \right| < 10^{-4}, \quad (3.15)$$

Якщо нерівність (3.15) не виконується, то здійснюється повернення до пункту алгоритму Обчислення обсягів при новому значенні змінної z_b . При виконанні нерівності (3.15) проводиться обчислення термодинамічних функцій співіснують фаз по відомим величинам температури і обсягів. Для цього використовується підпрограма Model з модуля RKW.

Розрахунок парожіdkостной рівноваги при заданому тиску насичений-ня більш складний і заснований на розглянутому вище алгоритмі. Він припускає наявність попереднього етапу пошуку інтервалу по температурі, який містить дані рішення. Цей пошук виконується послідовним зменшенням температури на 1 К, починаючи від критичної температури. На кожному кроці проводиться порівняння отриманого значення тиску насичення з заданим до тих пір, поки не буде встановлено інтервал ізоляції. Надалі здійснюється звуження цього інтервалу до виконання нерівності (3.15) методом половинного ділення.

Для спрощення розрахунків парорідинної рівноваги щодо запропонованих КУС доцільно окремо вирішити задачу в безрозмірному вигляді, представивши результати в табличній формі. Для цього в роботі виконано

рішення системи рівнянь (3.12) на основі представленого алгоритму без його етапів, які враховують конкретні

Таблиця 3.2. Параметри рівняння РКВ для різних речовин

<i>Name</i>	<i>M</i> , г/моль	<i>T_c</i> , К	<i>p_c</i> , МПа	<i>v_c</i> , см ³ /мо ль	<i>b</i> , дм ³ /мол ь	<i>k</i> ,	<i>z_c</i>	<i>w</i>
CH ₄	16,04	190,55	4,65	99,0	0,030	1,620	0,291	0,008
N ₂	28,01	126,25	3,48	89,5	0,026	1,644	0,297	0,040
R14	88,00	227,50	3,75	140,0	0,044	1,876	0,278	0,191
H ₂	2,02	33,23	1,30	65,0	0,018	1,103	0,306	-0,220
C ₃ H ₈	44,10	370,00	4,27	203,0	0,062	1,836	0,282	0,152
CO ₂	44,01	304,19	7,39	94,0	0,031	1,895	0,275	0,225
O ₂	32,00	154,58	5,04	73,4	0,022	1,669	0,288	0,021
iC ₄ H ₁₀	58,12	408,13	3,65	263,0	0,080	1,894	0,283	0,176
R218	188,02	345,05	2,68	299,0	0,093	2,172	0,279	0,340
R114	177,92	418,85	3,28	293,0	0,092	2,237	0,276	0,380
C ₃ H ₆	42,08	365,05	4,63	181,0	0,057	1,617	0,276	0,148
Ar	39,95	150,86	5,01	74,9	0,022	1,554	0,299	-0,004
R115	154,47	353,15	3,04	252,0	0,084	2,062	0,261	0,253
C ₂ H ₆	30,07	305,50	4,92	148,0	0,045	1,740	0,287	0,098
R12	120,93	384,95	4,14	217,0	0,067	1,871	0,281	0,176
R11	137,37	471,15	4,38	248,0	0,077	2,039	0,277	0,188
R21	102,92	451,35	4,93	197,0	0,066	1,953	0,259	0,202
R22	86,47	369,28	4,99	165,0	0,053	1,961	0,268	0,215
R23	70,02	299,45	4,98	133,0	0,043	2,064	0,266	0,280
R142	100,50	409,60	4,20	233,1	0,070	1,998	0,287	0,240
R13B1	148,93	340,05	3,96	200,0	0,062	1,872	0,280	0,180
R143	84,04	344,25	3,74	184,6	0,066	2,054	0,241	0,257
R13	104,47	302,28	3,91	180,0	0,056	1,930	0,280	0,180

Ne	20,18	44,40	2,66	41,7	0,012	1,478	0,300	0,000
Xe	131,30	289,70	5,84	118,0	0,036	1,578	0,286	0,020
C ₂ H ₄	28,05	282,51	5,03	129,0	0,040	1,773	0,276	0,065
HE ₄	4,00	5,20	0,22	57,3	0,017	0,993	0,292	-0,387
nC ₄ H ₁₀	58,12	425,16	3,80	255,0	0,081	1,918	0,274	0,193
R152A	66,05	386,70	4,50	181,0	0,062	2,049	0,253	0,266
NH ₃	17,05	405,55	11,31	72,5	0,026	1,645	0,243	0,060
RC318	200,04	388,15	2,80	323,0	0,100	2,254	0,280	0,380
R12B1	165,40	427,15	4,23	232,0	0,073	1,949	0,276	0,220
SF ₆	146,05	318,70	3,86	198,0	0,059	2,000	0,288	0,250
R113	187,39	487,25	3,42	325,0	0,010	2,231	0,274	0,252
iC ₅ H ₁₂	72,15	461,00	3,33	306,0	0,100	2,131	0,266	0,227
R32	52,01	351,55	5,64	121,0	0,045	2,091	0,233	0,300

У таблиці 3.2 умовні позначення стовпців мають наступний сенс: М - молекулярна (атомарна) маса речовини; z - коефіцієнт стисливості; w - фактор ацентрічності. Нижній індекс з відносить аналізованих властивість до критичного стану речовини.

З диференціальних співвідношень термодинаміки випливають дотримуються розрахункові співвідношення для визначення термодинамічних властивостей чистих речовин

$$s = R \ln \left(\frac{v-b}{RT} \right) + \frac{R}{b} \cdot \left(a + T \frac{da}{dT} \right) \ln \left(1 + \frac{b}{v} \right) + s_{id}(T), \quad (3.16)$$

$$h = RT \left(\frac{b}{v-b} \right) - \frac{a}{v+b} - \frac{T}{b} \frac{da}{dT} \cdot \ln \left(\frac{v}{v+b} \right) + h_{id}(T). \quad (3.17)$$

У рівняннях (3.16), (3.17) нижній індекс відносить відповідне властивість до його ідеальногазовому станом.

4. ТЕРМОДИНАМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ДРОСЕЛЬНОЇ СТУПЕНІ ОСТАТОЧНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ

Прості дросельні системи відносяться до числа небагатьох, для яких існують аналітичні дослідження термодинамічної ефективності їх циклів. У роботах [10, 11] представлені результати визначення оптимальних тисків простого дросельного циклу (циклу Лінде) при різних термодинамічних умовах. Вплив складу багатокомпонентного робочого тіла на холодильний коефіцієнт циклу Лінде вивчено в статті [12]. Встановлено також граничні значення енергетичних показників цього циклу в рефрижераторному режимі, що не залежать від роду робочого тіла [13].

Аналогічні роботи для окремо взятих ступенів охолодження невідомі, хоча вони є актуальними для структурного аналізу складних кріогенних систем. Дослідження термодинамічної ефективності простих циклів і відповідних їм ступенів охолодження мають багато спільного і в той же час містять свої особливості. У загальному випадку критерії, що характеризують цикл і ступінь охолодження можуть відрізнятися. Однак, якщо остання відноситься до ступеня остаточного охолодження, то можливий вибір критеріїв, використовуваних для установки в цілому.

Основне застосування цикл Лінде має в мікрокриогенній техніці, де він використовується тільки для отримання холоду. Для дросельної ступені, зображеної на рис. 3а, представляє інтерес не тільки рефрижераторний режим R, а й зріджувальний режим L. Критеріями термодинамічної оптимізації в подальшому дослідженні дросельної СОО в першу чергу є продуктивність установки, яка для режиму R характеризується питомою холодопродуктивністю q_x , а для режиму L - часток рідини x в її збірнику. При цьому треба мати на увазі, що через має місце невизначеності в структурі ступені попереднього охолодження величина q_x відноситься до витрати прямого потоку в СОО. З цієї ж причини значення x не можна ототожнювати з коефіцієнтом зрідження.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		35

Як параметр оптимізації буде розглядатися тиск прямого потоку p_2 . При вирішенні оптимізаційної задачі приймається наявність тільки власних втрат від незворотності процесів, тобто недорекуперація на теплому кінці теплообмінника, гідравлічні опору потоків і теплопритоки з навколишнього середовища приймають нульові значення.

У цьому наближенні вираз для критерію q_x має вигляд

$$q_x(p_2) = h_1(p_1, T_2) - h_2(p_2, T_2) = \Delta h_{T_2}(p_2), \quad (4.1)$$

де h - ентальпія, Δh_{T_2} - інтегральний ізотермічний дросель-ефект на температурному рівні T_2 . Цифрові індекси в формулах відповідають номерам вузлових точок на рис. 3а.

Формула для розрахунку частки рідини x має вигляд

$$x = \frac{\Delta h_{T_2}(p_2)}{h_1 - h_0}, \quad (4.2)$$

де вузлова точка 0 визначає стан насиченою рідини при тиску p_1 .

Важливим для структурного аналізу схеми установки, є ексергетичний ККД дросельної СОО η_e , який визначається на основі ексергетичного балансу. Формально для режиму R ексергетичний баланс записується як

$$e_2 = e_1 + q_{xe} + d_e, \quad (4.3)$$

а для зріджувального режиму він має вигляд

$$e_2 = e_1 \cdot (1 - x) + e_0 \cdot x + d_e, \quad (4.4)$$

де e - ексергетичної функція, де питомі ексергетичної втрати.

У вираженні (4.3) питома ексергетична холодопродуктивність q_{xe} обчислюються з формули

$$q_{xe} = q_x \frac{T_{oc} - T_x}{T_x}, \quad (4.5)$$

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		36

де через T_{oc} і T_x відповідно позначені температури навколишнього середовища і охолодження.

Якщо скласти вирази для ексергетичної ККД рефрижераторного η_e^R і зріджувальних η_e^L режимів на підставі рівностей (4.3), (4.4), то вони будуть мати вигляд

$$\eta_e^R = \frac{e_1 + q_{xe}}{e_2},$$

$$\eta_e^L = \frac{e_1 \cdot (1 - x) + e_0 \cdot x}{e_2}.$$

Однак використання цих співвідношень не дасть можливість отримати з них вирази для η_e в межі простого дросельного циклу. Для того щоб уникнути цього, доцільно переписати рівняння ексергетичної балансів для режимів R і L відповідно як

$$e_2 - e_1 = q_{xe} + d_e, \quad (4.6)$$

$$e_2 - e_1 = (e_0 - e_1) \cdot x + d_e. \quad (4.7)$$

На підставі рівності (4.6) і (4.7) вирази для розрахунків ексергетичної ККД мають вигляд

$$\eta_e^R = \frac{q_{xe}}{e_2 - e_1}, \quad (4.8)$$

$$\eta_e^L = \frac{(e_0 - e_1) \cdot x}{e_2 - e_1}. \quad (4.9)$$

Чисельники дробів в правих частинах виразів (4.8) і (4.9) рівні мінімальних витрат ексергії для отримання продуктів, а знаменники - дійсним її витратам.

Простий аналіз співвідношень (4.1) і (4.2) показує, що максимальна кількість продукту для будь-якого з режимів має місце при оптимальному тиску p_{2opt} рівному тиску інверсії при температурі $T_2 \text{ pin}$ (T_2), тобто

$$\max q_x = q_x(p_{in}(T_2)), \quad \max x = x(p_{in}(T_2)).$$

Для визначення оптимальних тисків p_{2opt} , відповідних максимальним значенням термодинамічної ефективності кожного з режимів, встановимо формальний зв'язок між їх показниками. Зі співвідношень (4.1), (4.2), (4.5) випливає взаємозв'язок між продуктивністю ступенів в різних режимах

$$\chi = \frac{q_{xe}}{h_1 - h_0} \cdot \frac{T_x}{T_{oc} - T_x}.$$

Підставляючи останню рівність в вираз (4.9) після нескладних перетворень можна записати

$$\eta_e^L = \eta_e^R \frac{e_0 - e_1}{h_1 - h_0} \cdot \frac{T_x}{T_{oc} - T_x}. \quad (4.10)$$

Зі співвідношення (4.10) випливає, що показники η_e^R та η_e^L відрізняються на множник, що не залежить від тиску p_2 . Тому тиску p_{2opt} , відповідні максимальної термодинамічної ефективності для обох режимів однакові. Крім того, як показано в джерелі [11] для простого рефрижераторного дросельного циклу, це тиск менше, ніж $p_{in}(T_2)$.

У таблиці 4.1 представлені результати розрахунків оптимальних характеристик дросельної ступені для трьох основних рівнів охолодження кріогенної техніки, представлених відповідними робочими тілами. Обчислення виконані з використанням рівняння стану Редліха-Квонг-Вільсона [14]. Тиск зворотного потоку приймалося рівним 0,1 МПа. Значення максимальної питомої холодопродуктивності виражені в Дж / моль, тиску прямого потоку p_2 мають розмірність бар. Діапазони зміни температури T_2 кожного робочого тіла характерні для реально використовуваних в кріогенної техніки дросельних ступенів охолодження.

У літературі аналогічні розрахунки опубліковані в роботі [15] тільки для режиму максимальної холодопродуктивності гелію. Однак в ній не зазначено спосіб визначення оптимальних параметрів. Тому неможливо зіставити за

точністю результати, наведені в табл. 4.1 і в роботі [15], хоча між ними є задовільний згоду.

Для складання таблиці 4.1 використовувалося програмне забезпечення в середовищі Delphi, розроблене на кафедрі кріогенної техніки ОНТУ. У процесах обчислень застосовувалися такі підпрограми для визначення термодинамічних властивостей гелію, водню і неону при різних наборах незалежних змінних.

Процедура ptrk (ab, zb: real; var v1, v2: real) розраховує обсяги чистого речовини або суміші на максвеллівською кривої в наведених координатах.

Сенс формальних параметрів процедури:

ab = a / b;

zb = Pb / RT;

v1 - найменший наведений обсяг;

v2 - найбільший наведений обсяг.

Процедура model (var z: mix; var pr: prop) є основною процедурою цього модуля. З її допомогою при заданому складі z, температурі T (елемент масиву pr [3]) і питомій обсязі v (елемент масиву pr [2]) розраховуються інші термодинамічні властивості, які знаходяться в інших елементах масиву pr. Фактично перехід до іншого виду рівняння стану зводиться до заміни змісту цієї процедури.

Розрахунок калорических властивостей проводиться в підпрограмі model на підставі наведених у попередньому розділі виразів, отриманих з диференціальних співвідношень термодинаміки. Також для розрахунку калорических властивостей необхідні термодинамічні функції в ідеальногазовом стані розраховуються за допомогою процедури idgas з модуля IDEAL.

Процедура vlid (var z, x, y: mix; var pr: prop; var d: real) розраховує фазовий рівновагу рідина-пар для багатокомпонентного робочого тіла в наближенні ідеального розчину. Навіть при відомій постановці і відомому рівнянні стану в даний час в загальному вигляді не вирішена задача розрахунку фазового

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		39

рівноваги. Це пов'язано, перш за все, з відсутністю алгоритму розв'язання задачі, що забезпечує збіжність процесів обчислень. У даній процедурі реалізована найпростіша модель багатокомпонентного робочого тіла - ідеальний розчин. У цьому наближенні задача фазового рівноваги має аналітичне рішення в вигляді формул.

Сенс формальних параметрів процедури

z, x, y - відповідно валовий склад, склади рідкої і парової фаз;

pr : $pror$ - масив властивостей суміші;

d - частка рідини - відношення маси рідкої фази до маси всієї суміші: $d = 0$ - газоподібний стан, $d = 1$ - рідкий стан, $0 < d < 1$ - парорідинний стан. Якщо суміш знаходиться в однофазній області, то $z = x = y$. Вхідними параметрами процедури є валовий склад і температура (елемент pr [3] масиву pr). Вихідні параметри - склади рідкої і парової фаз, а також інші елементи масиву pr і частка рідини.

Процедура VLMAXWRK (ab : real; var $v1, v2$, zb : real) розраховує в наведених координатах параметри парорідинної рівноваги для чистого речовини, а також параметри максвеллівською кривої (крива, що всередині двофазної області суміші і, отримана з рівняння фазового рівноваги чистої речовини). Дані по максвеллівською кривої використовуються для прогнозування азеотропних станів суміші і як початкових наближень при розрахунку парорідинної рівноваги суміші. У цій процедурі для розрахунку максвеллівською кривої використовується рівняння стану Редліха-Квонг-Вільсона.

Сенс формальних параметрів процедури:

$ab = a / b$;

$v1 = vL / b$ - наведений обсяг рідкої фази;

$v2 = vG / b$ - наведений обсяг газоподібної фази;

$zb = p_s \cdot b / (R \cdot T)$ - аналог коефіцієнта стисливості речовини, де p_s - тиск насичення.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		40

Вхідних параметрів процедури є формальна змінна ab , а вихідними параметрами є наведені обсяги рідкої і газоподібної фаз і змінна zb .

Розрахунок параметрів максвеллівською кривої проводиться шляхом інтерполяції табличних даних, що знаходяться в файлі `maxwrk.dat`. Ці дані отримані рішенням завдання фазового рівноваги чистої речовини для рівняння стану Редліха-Квонг в наведеній формі.

Процедури PT (`var z, x, y: mix; var pr: prop; var d: real`), PH (`var z, x, y: mix; var pr: prop; var d: real`) і PS (`var z, x, y: mix; var pr: prop; var d: real`) розраховують термодинамічні функції суміші при різних наборах незалежних змінних. Ці набори відображені в назві процедур.

Сенс формальних параметрів процедур:

z, x, y - відповідно валовий склад, склади рідкої і парової фаз;

pr : `prop` - масив властивостей суміші;

d - частка рідини.

Вхідними параметрами для цих процедур є валовий склад, а також відповідна пара елементів масиву pr : для PT - тиск і температура, для PH - тиск і ентальпія, для PS - тиск і ентропія. Вихідними параметрами є склади рідкої і парової фаз, а також інші елементи масиву pr і частка рідини.

Процедура `exergy` (`var z: mix; var pr: prop; var ex: real`) розраховує ексергетичну функцію робочого тіла для суміші заданого складу z ; відомих (розрахованих попередньо) термодинамічних функцій, що містяться в масиві pr .

Сенс формальних параметрів процедури:

z - валовий склад суміші;

pr типу `prop` - масив властивостей суміші;

$ex = (h-h_{oc}) - T_{oc} (s-s_{oc})$, де $T_{oc} = 293$ K, $p_{ic} = 0,1$ МПа; h_{oc} , s_{oc} - ентальпія і ентропія робочого тіла при параметрах навколишнього середовища. Вихідний параметр процедури - змінна ex .

Вихідні дані для розрахунків по конкретних речовин, як було зазначено раніше, містяться в масиві `rkw.dat`. Елементами рядки масиву є ім'я компонента;

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		41

молекулярна маса, г / моль; критична температура речовини, К; критичний тиск, МПа; критичний обсяг, дм³ / моль; параметр рівняння стану b , дм³ / моль; параметр рівняння стану k ; фактор ацентрічності. ω . Цей масив містить дані для 36 речовин.

Текст описаних вище підпрограм наведено в додатку до даної роботи.

Таблиця 4.1. Оптимальні характеристики дросельної СОО

T ₂ , К	Максимальна продуктивність			Максимальна термодинамічна ефективність		
	P ₂	q _x	x	P ₂	η_e^R	η_e^L
He ⁴						
6	10,1	89,0	0,662	4,8	0,483	0,494
7	13,4	84,0	0,528	7,4	0,368	0,408
8	16,0	78,7	0,431	9,7	0,296	0,357
9	18,5	73,4	0,358	11,7	0,244	0,316
10	20,5	68,4	0,301	13,3	0,204	0,280
11	21,9	63,6	0,256	14,7	0,173	0,250
12	23,1	59,1	0,218	16,0	0,148	0,224
13	24,4	55,0	0,188	17,2	0,128	0,201
14	25,4	51,0	0,163	18,0	0,110	0,180
15	26,0	47,3	0,141	18,7	0,096	0,163
H ₂						
40	74,8	708,9	0,478	46,3	0,346	0,503
45	92,1	658,4	0,405	61,1	0,282	0,438
50	105,4	611,7	0,347	74,4	0,234	0,386
55	119,1	568,3	0,298	86,1	0,198	0,342
60	128,3	527,9	0,258	96,3	0,168	0,305
65	137,6	490,1	0,225	104,8	0,144	0,272
70	144,6	454,8	0,196	111,4	0,125	0,244
75	151,7	421,7	0,171	117,9	0,108	0,219
N ₂						
140	249,9	4026	0,552	134,6	0,382	0,564
150	297,2	3811	0,502	173,4	0,333	0,516
160	335,7	3604	0,457	207,1	0,294	0,474
170	355,2	3404	0,416	238,9	0,260	0,436
180	404,5	3213	0,379	266,8	0,232	0,402
190	434,3	3028	0,345	293,0	0,207	0,372
200	454,1	2849	0,314	318,4	0,186	0,343

Дані табл. 4.1 підтверджують загальну тенденцію збільшення оптимальних тисків прямого потоку і зниження максимальних значень показників із зростанням температури T_2 . Для випадків гелію і водню тиску p_{2opt} можуть бути практично досягнуті в кріогенних установках. При підвищенні температури T_2 спостерігається збільшення різниць оптимальних тисків p_2 для критеріїв продуктивності СОО і її термодинамічної ефективності.

Для всіх розглянутих випадків має місце нерівність $\eta_e^R \eta_e^{<L}$, причому воно посилюється зі зростанням температури T_2 . Таким чином, при оптимальному тиску p_2 зріджувальний режим є більш термодинамічно досконалим, ніж рефрижераторний. Це може бути пояснено тим, що ексергія одержуваного рідкого продукту більше ексергії одержуваного холоду при однакових затратах роботи.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		43

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.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		44

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.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		45

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.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		46

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. Час 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.1.613-03.1.18	Арк.
						47
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.1.613-03.1.18	Арк.
						48
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.1.613-03.1.18	Арк.
						49
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 $\xi=0,4$

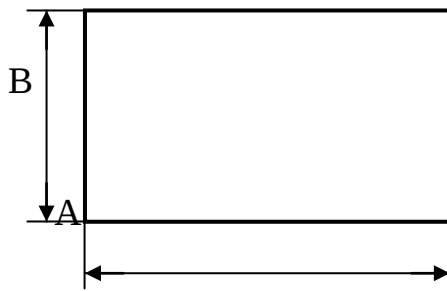
Світильник - вибухобезпечний.

$E_n=300$ 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.1.613-03.1.18	Арк.
						50
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

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

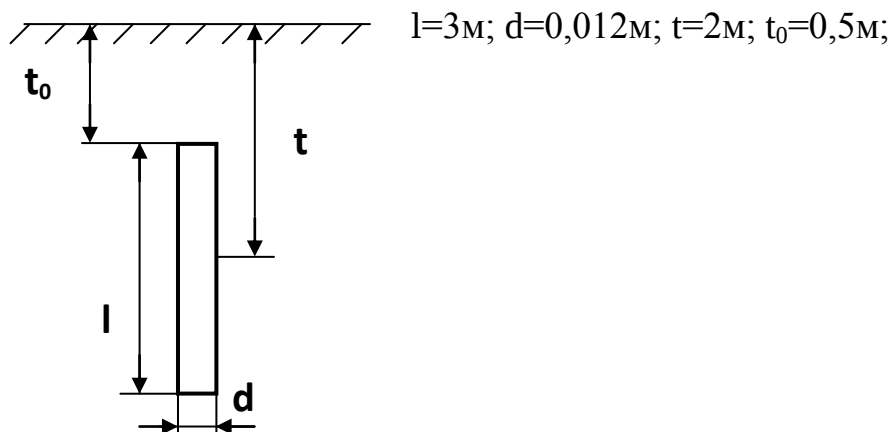
$$\rho_p = \rho_\phi \cdot \Psi;$$

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.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		51

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

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

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

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

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:

$$R_{общ.} = \frac{R_{об.}^{сист.} \cdot R_{пол.}}{R_{об.}^{сист.} + R_{пол.}};$$

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		52

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

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.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		53

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

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

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.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		54

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Виконано критичний огляд літературних джерел по декомпозиції кріогенних систем різного призначення, на основі якого представлені можливі ступені остаточного охолодження гелієвих установок.

2. Складена розрахункова схема для термодинамічного розрахунку дросельної ступені остаточного охолодження.

3. Використовуючи програмне забезпечення, розроблене на кафедрі кріогенної техніки ОНТУ, виконаний розрахунок оптимальних тисків прямого потоку для рефрижераторного і зріджувального режимів роботи кріогенних гелієвих установок.

4. В якості критеріїв термодинамічної ефективності для зріджувального режиму обраний коефіцієнт зрідження, для рефрижераторного режиму - питома холодопродуктивність.

5. Показано, що оптимальні тиски прямих потоків p_{2opt} , відповідні максимальній термодинамічній ефективності і максимальній продуктивності установки для різних режимів однакові.

6. В якій точці $\max q_x(p_2)$ тиск p_{2opt} дорівнює тиску інверсії при температурі прямого потоку на вході в ступінь остаточного охолодження. У точці $\max \eta_c(p_2)$ тиск p_{2opt} менше, ніж вказане вище значення.

7. Аналогічні обчислення дросельних ступенів остаточного охолодження зроблені при використанні в якості робочих тіл водню і азоту.

8. На прикладі чисельних розрахунків показано, що термодинамічний ККД дросельної ступені остаточного охолодження в зріджувальному режимі більше аналогічного критерію для рефрижераторного режиму.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
						55
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

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

Опис процедур та модулів програмного забезпечення для термодинамічних розрахунків

```
procedure srkwcon(var z,tc,b,k,pc,m:mix);
{DETERMINATION OF RKW-PARAMETERS BY KNOWN NAMES OF COMPONENTS,
COMP-ARRAY OF NAMES,USES types}
var
f:text;
i,j:integer;
Tc1,b1,k1,pc1,m1,z1,probel1,probel2:real;
name:name;
nm:mixcom;
ch:char;
begin
for i:=1 to nc do begin
name:=comp[i];
for j:=1 to length(name) do begin
ch:=name[j];
if ch=' ' then Delete(name,j,1);
end;
for j:=1 to length(name) do
name[j]:=UpCase(name[j]);
for j:=1 to 10-length(name) do
name:=' '+name;
comp[i]:=name;
end;
assign(f,'D:\USERS\PAS\rkw.par');reset(f);
i:=0;
for j:=1 to nc do
nm[j]:=comp[j];
repeat
readln(f,name,Tc1,b1,k1,pc1,m1);
for j:=1 to nc do
if name=nm[j] then begin
i:=i+1;
tc[j]:=tc1; b[j]:=b1; k[j]:=k1;
pc[j]:=pc1; m[j]:=m1; comp[j]:=name;
end;
end;
```

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
						58
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

```

until (eof(f) or (i=nc));
close(f);
{SORT by critical temperature tc}
for i:=1 to nc-1 do
for j:=i+1 to nc do
if tc[i]>tc[j] then begin
name:=comp[i]; tc1:=tc[i]; b1:=b[i];
k1:=k[i]; pc1:=pc[i]; m1:=m[i];
z1:=z[i];
tc[i]:=tc[j]; b[i]:=b[j]; k[i]:=k[j];
pc[i]:=pc[j]; m[i]:=m[j]; comp[i]:=comp[j];
z[i]:=z[j];
tc[j]:=tc1; b[j]:=b1; k[j]:=k1;
pc[j]:=pc1; m[j]:=m1; comp[j]:=name;
z[j]:=z1; end;
end;

```

```

procedure vlid(var z,x,y:mix; var pr:prop; var d:real);
{h бзГв ĩ a@|Ė¤Є@бв-@J@ a ŷ-@ŷГбĖп n-Є@Ĭ@-Г-в-@Є бГбĖ
ŷ ĩaĖŷ"Ė|Г-ĖĖ Ė¤Г "м-@J@ a бвŷ@a б ĖбĬ@"м$@ŷ -ĖГ
@¤ĖдĖЄ жĖĖ ħгŷĖ-бЄ@J@ ģ.ц.
z,x,y-б@бв ŷл б@бвŷГвбвŷГ--@ ŷ "ŷ@Є, |Ė¤Є@бвĖ Ė ĩ a ;
pr[1],pr[3] $ ¤ ŷ ГлГ $- зГ-Ėп ¤ ŷ"Г-Ėп Ė вГĬГа вгал;
d-¤@"п |Ė¤Є@бвĖ}
label fin;
var
pv,pl,mass,bi,ki:real;
tc,pc,k,b,m:mix;
f:text;
i:integer;
procedure DL;
var
d1,d2,f1,f2:real;
function f(t:real):real;
var
j:integer;
s:real;
begin
s:=-1;
for j:=1 to nc do

```

```

        s:=s+z[j]/(t+(1-t)*k[j]);
        f:=s;
    end;
begin
d1:=0.0001;d2:=0.9999;
f1:=f(d);f2:=f(d);
repeat
    d:=(d1+d2)/2;
    if f1*f(d)>=0 then begin
        d1:=d; f1:=f(d);end
    else begin
        d2:=d; f2:=f(d);end;
until abs(d2-d1)<=0.001;
end;

    begin
srkwcon(z,tc,b,k,pc,m);
pv:=0; pl:=0;
for i:=1 to nc do begin
pv:=pv+z[i]/pc[i]/exp(5.9*(1-tc[i]/pr[3]));
pl:=pl+z[i]*pc[i]*exp(5.9*(1-tc[i]/pr[3]));
end;
pv:=1/pv;
if pr[1]<=pv then begin
d:=0;
for i:=1 to nc do begin
x[i]:=z[i]; y[i]:=z[i];
end;goto fin; end;
if pr[1]>=pl then begin
d:=1;
for i:=1 to nc do begin
x[i]:=z[i]; y[i]:=z[i];
end;goto fin; end;
for i:=1 to nc do k[i]:=pc[i]/pr[1]*exp(5.9*(1-tc[i]/pr[3]));
DL;
for i:=1 to nc do begin
x[i]:=z[i]/(d+(1-d)*k[i]);
y[i]:=(z[i]-d*x[i])/(1-d);
end;
fin:end;

procedure ptrk(ab,zb:real;var v1,v2:real);

```

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		60

```

label fin;
var
p,q,r,s,t,d:real;
y1,y2,y3,u,v,ro,fi:real;
i,j:integer;
    begin
if(ab=4.934) and (zb=0.08664) then begin
v1:=3.8473;v2:=3.8473;
goto fin;end;
r:=-1/zb; s:=ab/zb-1/zb-1; t:=-ab/zb;
p:=s-r*r/3; q:=2*r*r*r/27-r*s/3+t;
D:=p*p*p/27+q*q/4;
    if D>0 then begin
u:=-q/2+sqrt(D);
    if u<0 then s:=-1 else s:=1;
u:=s*exp(ln(abs(u))/3);
v:=-q/2-sqrt(D);
    if v<0 then s:=-1 else s:=1;
v:=s*exp(ln(abs(v))/3);
v1:=u+v-r/3; v2:=v1;
goto fin; end;
    if D<0 then begin
ro:=sqrt(abs(p*p*p/27));
fi:=-q/2/ro;
fi:=pi/2-arctan(fi/sqrt(1-fi*fi));
y1:=2*exp(ln(ro)/3)*cos(fi/3);
y2:=2*exp(ln(ro)/3)*cos(fi/3+2*pi/3);
v1:=y2-r/3; v2:=y1-r/3;
end;
fin:end;

procedure parkw(var z:mix;var pr:prop;var am,bm,dam:real);
var
Tc,b,k,a,da,pc,m:mix;
T,tij:real;
dpt,dpv,tet,tcij:real;
i,j:integer;
f:text;
namc:string[10]; {Ёп €©İ®-Г-В }
    begin
srkwcon(z,tc,b,k,pc,m);

```

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		61

```

T:=pr[3];
for i:=1 to nc do begin
a[i]:=4.934*(1+k[i]*(Tc[i]/T-1))*b[i];
da[i]:=-4.934*k[i]*Tc[i]/T/T*b[i];
end;
am:=0;bm:=0;dam:=0;
for i:=1 to nc do begin
bm:=bm+z[i]*b[i];
for j:=1 to nc do begin
if(tc[i]<=tc[j]) then tcij:=1-Tc[i]/Tc[j]
else tcij:=1-Tc[j]/Tc[i];
tet:=0.5+0.3325*Tcij+0.1193*sqr(tcij);
if(tc[i]<=tc[j]) then tij:=tet else tij:=1-tet;
am:=am+z[i]*z[j]*(tij*a[i]+(1-tij)*a[j]);
dam:=dam+z[i]*z[j]*(tij*da[i]+(1-tij)*da[j]);
end;end;
end;

procedure model(var z:mix;var pr:prop);
const R=0.08314;
var
Tc,b,k,a,da:mix;
am,bm,T,v,tij,dam,sid,hid,cpid:real;
dpt,dpv,tet,tcij:real;
begin
T:=pr[3];v:=pr[2];
parkw(z,pr,am,bm,dam);
PR[1]:=R*T*(1/(v-bm)-am/v/(v+bm));
idgas(z,T,cpid,hid,sid);
PR[4]:=hid+100*R*T*(bm/(v-bm)-am/(v+bm)-T*dam/bm*ln(v/(v+bm)));
PR[5]:=sid+100*R*(ln((v-bm)/R/T)+(am+T*dam)/bm*ln(1+bm/v));
PR[7]:=cpid-100*R; {cv}
dpt:=R/(v-bm)-(am+T*dam)*R/v/(v+bm);
dpv:=-R*T/sqr(v-bm)+(2*v+bm)*am*R*T/sqr(v*(v+bm));
PR[6]:=PR[7]-T*sqr(dpt)/dpv; {cp}
end;

procedure VLMAXWRK(ab:real;var v1,v2,zb:real);
{Determination Maxwell-point parameters by interpolation
from table data "maxwrk.dat"}
var

```

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арх.
Вим.	Арх	№ докум	Підпис	Дата		62

```

f:text;
ab1,ab2,v11,v12,v21,v22,zb1,zb2:real;
a,v1,vg,z,d:real;
begin
assign(f,'d:\USERS\pas\maxwrk.dat');reset(f);
readln(f,a,v1,vg,z);
d:=0;
repeat
ab1:=a;v11:=v1;v21:=vg;zb1:=z;
readln(f,ab2,v12,v22,zb2);
a:=ab2;v1:=v12;vg:=v22;z:=zb2;
until ((ab>=ab1) and (ab<=ab2)) or eof(f);
close(f);
d:=(ab-ab1)/(ab2-ab1);
v1:=v11+d*(v12-v11);
v2:=v21+d*(v22-v21);
zb:=zb1+d*(zb2-zb1);
end;

procedure PT(var z,x,y:mix;var pr:prop;var d:real);
var
i:integer;
am,bm,dam,ab,zb,v1,v2:real;
v1s,v2s,zbs:real;
pr1,pr2:prop;
begin
vlid(z,x,y,pr,d);
if (d>0) and (d<1) then begin
parkw(x,pr,am,bm,dam);
ab:=am/bm; zb:=pr[1]*bm/(0.08314*pr[3]);
ptrk(ab,zb,pr1[2],v2);
pr1[3]:=pr[3];pr1[2]:=pr1[2]*bm;
parkw(y,pr,am,bm,dam);
ab:=am/bm; zb:=pr[1]*bm/(0.08314*pr[3]);
ptrk(ab,zb,v1,pr2[2]);
pr2[3]:=pr[3];pr2[2]:=pr2[2]*bm;
model(x,pr1);
model(y,pr2);
for i:=1 to 25 do pr[i]:=d*pr1[i]+(1-d)*pr2[i];
end
else begin

```

```

parkw(z,pr,am,bm,dam);
ab:=am/bm; zb:=pr[1]*bm/(0.08314*pr[3]);
ptrk(ab,zb,v1,v2);
VLMAXWRK(ab,v1s,v2s,zbs);
if zbs<=zb then pr[2]:=v1*bm else pr[2]:=v2*bm;
model(z,pr);
end;
end;

        procedure PH(var z,x,y:mix;var pr:prop;var d:real);
var
t,tu,tl,dt,h:real;
b:boolean;
begin
t:=300;
h:=pr[4];
    pr[3]:=t;
    PT(z,x,y,pr,d);
if pr[4]>=h then begin tu:=t;dt:=-10; end
else begin tl:=t;dt:=10;end;
    repeat
        t:=t+dt;
        pr[3]:=t;
        PT(z,x,y,pr,d);
        b:=(pr[4]>=h);
        if (b) and (dt<0) then tu:=pr[3];
        if (not b) and (dt>0) then tl:=pr[3];
        until ((not b) and (dt<0)) or ((b) and (dt>0));
        if (not b) then tl:=t else tu:=t;
        if pr[4]=h then begin tu:=t;tl:=t;end;
        repeat
            t:=(tu+tl)/2;
            pr[3]:=t;
            PT(z,x,y,pr,d);
            if (pr[4]>=h) then tu:=t else tl:=t;
        until abs(tu-tl)<=0.01;
    end;

        procedure PS(var z,x,y:mix;var pr:prop;var d:real);
var
t,tu,tl,dt,s:real;

```

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		64

```

b:boolean;
begin
t:=300;
s:=pr[5];
  pr[3]:=t;
  PT(z,x,y,pr,d);
if pr[5]>=s then begin tu:=t;dt:=-10; end
else begin tl:=t;dt:=10;end;
  repeat
    t:=t+dt;
    pr[3]:=t;
    PT(z,x,y,pr,d);
    b:=(pr[5]>=s);
    if (b) and (dt<0) then tu:=pr[3];
    if (not b) and (dt>0) then tl:=pr[3];
    until ((not b) and (dt<0)) or ((b) and (dt>0));
    if (not b) then tl:=t else tu:=t;
    if pr[5]=s then begin tu:=t;tl:=t;end;
    repeat
      t:=(tu+tl)/2;
      pr[3]:=t;
      PT(z,x,y,pr,d);
      if (pr[5]>=s) then tu:=t else tl:=t;
      until abs(tu-tl)<=0.01;
    end;
  end;
procedure exergy(var z:mix;var pr:prop;var ex:real);
{Calculation of exergy function at known Z and PR}
var
x,y:mix; {contents of liquid and vapour phases}
d:real;
prs:prop; {properties of suuoundings}
begin
  prs[1]:=1; {bar}
  prs[3]:=293; {K}
  pt(z,x,y,prs,d);
  ex:=(pr[4]-prs[4])-prs[3]*(pr[5]-prs[5]);
end;

  procedure VLP(iv:integer;var PR1,PR2:prop);
  {Calculation of vapour-liquid equilibria of pure

```

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		65

```

substances by RKW EOS; iv=1 -independed variable T,iv=2 -
independed
variable P; the value of the independed variable is given in
corresponding element of array PR1; PR1,PR2 - thermodynamic
proper-
tries of liquid and vapour phases}
const R=0.08314;{bar*cub.dm/mole/K}
var
ab,zb,ts,ps,tsu,tsl,psl,psg:real;
z,tc,b,k,pc,m:mix;
begin
nc:=1;
z[1]:=1;
srkwcon(z,tc,b,k,pc,m);
case iv of
1:begin
if pr1[3]>tc[1] then begin
writeln('VLP:saturation temperature more than critical
temperature');
exit;end;
pr2[3]:=pr1[3];
ab:=4.934*(1+k[1]*(Tc[1]/pr1[3]-1));
VLMAXWRK(ab,pr1[2],pr2[2],zb);
end;
2:begin
if pr1[1]>pc[1] then begin
writeln('VLP:saturation pressure more than critical
pressure');
exit;end;
psg:=pr1[1];
{determination of isolation interval}
tsl:=tc[1];
repeat
tsl:=tsl-5;
ab:=4.934*(1+k[1]*(Tc[1]/tsl-1));
VLMAXWRK(ab,pr1[2],pr2[2],zb);
psl:=zb*R*tsl/b[1];
until psl<=pr1[1];
{narrowing of the interval}
tsu:=tsl+5;
repeat

```

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арх.
Вим.	Арх	№ докум	Підпис	Дата		66

```

        ts:=(tsu+tsl)/2;
        ab:=4.934*(1+k[1]*(Tc[1]/ts-1));
        VLMAXWRK(ab,pr1[2],pr2[2],zb);
        ps:=zb*R*ts/b[1];
        if ps<=pr1[1] then tsl:=ts else tsu:=ts;
        until (tsu-tsl)<0.01;
            {determination of the saturation temperature}
        pr1[3]:=(tsu+tsl)/2;pr2[3]:=pr1[3];
        ab:=4.934*(1+k[1]*(Tc[1]/pr1[3]-1));
        VLMAXWRK(ab,pr1[2],pr2[2],zb);
    end;
    else begin writeln('VLP:wrong value of IV; iv=',iv:3);
    exit;end;
end;

    pr1[2]:=pr1[2]*b[1]; pr2[2]:=pr2[2]*b[1];
    model(z,pr1);    model(z,pr2);
    if iv=2 then pr1[1]:=psg;
        pr2[1]:=pr1[1];
    end;

begin

end.

unit Ideal;
    interface
        uses typess;
    procedure idgas(var z:mix;T:real;var cpid,hid,sid:real);

        implementation

    procedure idgas(var z:mix;T:real;var cpid,hid,sid:real);
    {Calculations of ideal gas properties,
    [hid]=J/mole, [cpid,sid]=J/(mole K)}
    var
    c:array [1..4] of real;
    namc:string[10]; {name of component}
    f:text;
    i:integer;
    begin
        assign(f,'d:\pas\cpid.dat');reset(f);
        sid:=0; hid:=0;cpid:=0;

```

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		67

```

repeat
  readln(f,namc,c[1],c[2],c[3],c[4]);
  for i:=1 to nc do
  if namc=comp[i] then begin
    sid:=sid-8.31434*z[i]*ln(z[i])+(c[1]*ln(T)+c[2]*T+
      c[3]*T*T/2+c[4]*T*T*T/3)*z[i];
    hid:=hid+(c[1]*T+c[2]*T*T/2+
      c[3]*T*T*T/3+c[4]*T*T*T*T/4)*z[i];
    cpid:=cpid+(c[1]+c[2]*T+
      c[3]*T*T+c[4]*T*T*T)*z[i];
    end;
  until eof(f);
if cpid=0 then writeln('idgas.pas-component ',namc,' has not
founded');
  close(f);
end;

```

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		68

ДОДАТОК Б

Файли даних для термодинамічних розрахунків за рівнянням стану РКВ

Ідеальногазові властивості ізобарное теплоємності

N2 +7.440 -0.324e-2 +6.400e-6 -2.790e-9
CH4 +4.598 +1.245e-2 +2.860e-6 -2.703e-9
C2H6 +1.292 +4.254e-2 -1.657e-5 +2.081e-9
C3H8 -1.009 +7.315e-2 -3.789e-5 +7.678e-9
iC4H10 -0.332 +9.189e-2 -4.409e-5 +6.915e-9
nC4H10 +2.266 +7.913e-2 -2.647e-5 -0.674e-9
nC5H12 -0.866 +1.164e-1 -6.163e-5 +1.267e-8

Термодинамические свойства в условиях парожидкостного равновесия в приведенных координатах по уравнению состояния РКВ

4.934	3.84734E+00	3.84734E+00	8.66380E-02
5.00	3.03712E+00	5.14938E+00	8.31750E-02
5.10	2.67640E+00	6.14809E+00	7.82077E-02
5.20	2.47130E+00	7.10072E+00	7.35544E-02
5.30	2.32411E+00	8.01733E+00	6.91939E-02
5.40	2.21151E+00	8.96698E+00	6.51055E-02
5.50	2.12051E+00	9.94433E+00	6.12707E-02
5.60	2.04479E+00	1.09638E+01	5.76724E-02
5.70	1.98034E+00	1.20322E+01	5.42946E-02
5.80	1.92457E+00	1.31555E+01	5.11227E-02
5.90	1.87565E+00	1.43395E+01	4.81431E-02
6.00	1.83228E+00	1.55894E+01	4.53432E-02
6.10	1.79350E+00	1.69106E+01	4.27115E-02
6.20	1.75854E+00	1.83084E+01	4.02372E-02
6.30	1.72683E+00	1.97882E+01	3.79102E-02

6.40	1.69790E+00	2.13557E+01	3.57212E-02
6.50	1.67139E+00	2.30168E+01	3.36615E-02
6.60	1.64697E+00	2.47776E+01	3.17232E-02
6.70	1.62440E+00	2.66446E+01	2.98986E-02
6.80	1.60347E+00	2.86246E+01	2.81808E-02
6.90	1.58399E+00	3.07248E+01	2.65633E-02
7.00	1.56580E+00	3.29527E+01	2.50399E-02
7.10	1.54879E+00	3.53164E+01	2.36049E-02
7.20	1.53283E+00	3.78244E+01	2.22531E-02
7.30	1.51782E+00	4.04857E+01	2.09794E-02
7.40	1.50368E+00	4.33098E+01	1.97792E-02
7.50	1.49033E+00	4.63070E+01	1.86481E-02
7.60	1.47771E+00	4.94879E+01	1.75820E-02
7.70	1.46575E+00	5.28639E+01	1.65771E-02
7.80	1.45440E+00	5.64473E+01	1.56298E-02
7.90	1.44362E+00	6.02508E+01	1.47368E-02
8.00	1.43336E+00	6.42882E+01	1.38948E-02
8.10	1.42358E+00	6.85739E+01	1.31009E-02
8.20	1.41426E+00	7.31235E+01	1.23523E-02
8.30	1.40535E+00	7.79532E+01	1.16464E-02
8.40	1.39683E+00	8.30807E+01	1.09807E-02
8.50	1.38868E+00	8.85243E+01	1.03529E-02
8.60	1.38086E+00	9.43038E+01	9.76081E-03
8.70	1.37337E+00	1.00440E+02	9.20243E-03
8.80	1.36617E+00	1.06956E+02	8.67579E-03
8.90	1.35926E+00	1.13874E+02	8.17910E-03
9.00	1.35261E+00	1.21220E+02	7.71063E-03
9.10	1.34622E+00	1.29021E+02	7.26878E-03
9.20	1.34005E+00	1.37305E+02	6.85204E-03
9.30	1.33411E+00	1.46102E+02	6.45898E-03
9.40	1.32838E+00	1.55445E+02	6.08826E-03
9.50	1.32285E+00	1.65369E+02	5.73860E-03
9.60	1.31751E+00	1.75908E+02	5.40882E-03

9.70	1.31235E+00	1.87102E+02	5.09778E-03
9.80	1.30735E+00	1.98993E+02	4.80444E-03
9.90	1.30252E+00	2.11624E+02	4.52778E-03
10.00	1.29785E+00	2.25042E+02	4.26687E-03
10.10	1.29331E+00	2.39296E+02	4.02082E-03
10.20	1.28892E+00	2.54440E+02	3.78878E-03
10.30	1.28466E+00	2.70529E+02	3.56996E-03
10.40	1.28053E+00	2.87624E+02	3.36362E-03
10.50	1.27652E+00	3.05788E+02	3.16905E-03
10.60	1.27263E+00	3.25089E+02	2.98559E-03
10.70	1.26884E+00	3.45599E+02	2.81260E-03
10.80	1.26517E+00	3.67394E+02	2.64951E-03
10.90	1.26159E+00	3.90557E+02	2.49574E-03
11.00	1.25811E+00	4.15175E+02	2.35078E-03
11.10	1.25473E+00	4.41340E+02	2.21412E-03
11.20	1.25143E+00	4.69150E+02	2.08529E-03
11.30	1.24822E+00	4.98711E+02	1.96386E-03
11.40	1.24510E+00	5.30135E+02	1.84939E-03
11.50	1.24205E+00	5.63539E+02	1.74151E-03
11.60	1.23908E+00	5.99052E+02	1.63983E-03
11.70	1.23618E+00	6.36808E+02	1.54400E-03
11.80	1.23335E+00	6.76950E+02	1.45369E-03
11.90	1.23060E+00	7.19631E+02	1.36859E-03
12.00	1.22790E+00	7.65015E+02	1.28840E-03
12.10	1.22528E+00	8.13275E+02	1.21284E-03
12.20	1.22271E+00	8.64594E+02	1.14165E-03
12.30	1.22020E+00	9.19171E+02	1.07458E-03
12.40	1.21775E+00	9.77215E+02	1.01139E-03
12.50	1.21535E+00	1.03895E+03	9.51872E-04
12.60	1.21301E+00	1.10461E+03	8.95803E-04
12.70	1.21071E+00	1.17445E+03	8.42990E-04
12.80	1.20847E+00	1.24874E+03	7.93247E-04
12.90	1.20628E+00	1.32777E+03	7.46399E-04

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		71

13.00	1.20413E+00	1.41184E+03	7.02280E-04
13.10	1.20203E+00	1.50129E+03	6.60732E-04
13.20	1.19997E+00	1.59645E+03	6.21609E-04
13.30	1.19795E+00	1.69769E+03	5.84771E-04
13.40	1.19597E+00	1.80542E+03	5.50087E-04
13.50	1.19404E+00	1.92005E+03	5.17432E-04
13.60	1.19214E+00	2.04203E+03	4.86690E-04
13.70	1.19028E+00	2.17183E+03	4.57750E-04
13.80	1.18845E+00	2.30997E+03	4.30509E-04
13.90	1.18666E+00	2.45699E+03	4.04867E-04
14.00	1.18491E+00	2.61346E+03	3.80733E-04
14.10	1.18319E+00	2.77999E+03	3.58019E-04
14.20	1.18150E+00	2.95725E+03	3.36644E-04
14.30	1.17984E+00	3.14594E+03	3.16528E-04
14.40	1.17821E+00	3.34678E+03	2.97599E-04
14.50	1.17661E+00	3.56059E+03	2.79788E-04
14.60	1.17505E+00	3.78821E+03	2.63030E-04
14.70	1.17350E+00	4.03053E+03	2.47264E-04
14.80	1.17199E+00	4.28852E+03	2.32431E-04
14.90	1.17050E+00	4.56321E+03	2.18477E-04
15.00	1.16904E+00	4.85567E+03	2.05351E-04
15.10	1.16760E+00	5.16709E+03	1.93005E-04
15.20	1.16619E+00	5.49869E+03	1.81392E-04
15.30	1.16480E+00	5.85181E+03	1.70470E-04
15.40	1.16344E+00	6.22785E+03	1.60198E-04
15.50	1.16210E+00	6.62831E+03	1.50538E-04
15.60	1.16078E+00	7.05480E+03	1.41454E-04
15.70	1.15948E+00	7.50902E+03	1.32913E-04
15.80	1.15820E+00	7.99281E+03	1.24881E-04
15.90	1.15694E+00	8.50809E+03	1.17330E-04
16.00	1.15571E+00	9.05694E+03	1.10230E-04
16.10	1.15449E+00	9.64157E+03	1.03555E-04
16.20	1.15329E+00	1.02643E+04	9.72806E-05

					КРБ.КТ.1.613-03.1.18	Арк.
Вим.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		72

16.30	1.15211E+00	1.09278E+04	9.13822E-05
16.40	1.15095E+00	1.16345E+04	8.58378E-05
16.50	1.14981E+00	1.23874E+04	8.06264E-05
16.60	1.14868E+00	1.31895E+04	7.57282E-05
16.70	1.14757E+00	1.40441E+04	7.11246E-05
16.80	1.14648E+00	1.49547E+04	6.67982E-05
16.90	1.14541E+00	1.59248E+04	6.27324E-05
17.00	1.14434E+00	1.69586E+04	5.89118E-05
17.10	1.14330E+00	1.80601E+04	5.53216E-05
17.20	1.14227E+00	1.92338E+04	5.19482E-05
17.30	1.14125E+00	2.04846E+04	4.87785E-05
17.40	1.14026E+00	2.18174E+04	4.58005E-05
17.50	1.13927E+00	2.32379E+04	4.30027E-05
17.60	1.13830E+00	2.47517E+04	4.03743E-05
17.70	1.13732E+00	2.63650E+04	3.79051E-05
17.80	1.13639E+00	2.80845E+04	3.55856E-05
17.90	1.13545E+00	2.99172E+04	3.34068E-05
18.00	1.13455E+00	3.18705E+04	3.13603E-05
18.10	1.13363E+00	3.39525E+04	2.94381E-05
18.20	1.13274E+00	3.61718E+04	2.76327E-05
18.30	1.13186E+00	3.85375E+04	2.59372E-05
18.40	1.13098E+00	4.10592E+04	2.43448E-05
18.50	1.13011E+00	4.37473E+04	2.28494E-05
18.60	1.12926E+00	4.66130E+04	2.14452E-05
18.70	1.12842E+00	4.96681E+04	2.01265E-05
18.80	1.12764E+00	5.29250E+04	1.88883E-05
18.90	1.12681E+00	5.63974E+04	1.77257E-05
19.00	1.12595E+00	6.00994E+04	1.66342E-05
19.10	1.12515E+00	6.40465E+04	1.56093E-05
19.20	1.12443E+00	6.82549E+04	1.46471E-05
19.30	1.12364E+00	7.27421E+04	1.37438E-05
19.40	1.12286E+00	7.75266E+04	1.28958E-05
19.50	1.12209E+00	8.26284E+04	1.20997E-05

19.60	1.12133E+00	8.80685E+04	1.13524E-05
19.70	1.12061E+00	9.38696E+04	1.06510E-05
19.80	1.11982E+00	1.00056E+05	9.99258E-05

Параметри рівняння стану РКВ

CH4	16.04	190.55	4.65	0.0990	0.030	1.620	0.008
N2	28.01	126.25	3.48	0.0895	0.026	1.644	0.040
R14	88.00	227.50	3.75	0.1400	0.044	1.876	0.191
H2	2.02	33.23	1.30	0.0650	0.018	1.103	-0.220
C3H8	44.10	370.00	4.27	0.2030	0.062	1.836	0.152
CO2	44.01	304.19	7.39	0.0940	0.030	1.895	0.225
O2	32.00	154.77	5.10	0.1220	0.022	1.669	0.021
iC4H10	58.12	408.13	3.65	0.2630	0.080	1.894	0.176
R218	188.02	345.05	2.68	0.2990	0.093	2.172	0.340
R114	177.92	418.85	3.28	0.2930	0.092	2.237	0.380
C3H6	42.08	365.05	4.63	0.1810	0.057	1.617	0.148
AR	39.95	150.86	5.01	0.0749	0.022	1.554	-0.004
R115	154.47	353.15	3.04	0.2520	0.084	2.062	0.253
C2H6	30.07	305.50	4.92	0.1480	0.045	1.740	0.098
R12	120.93	384.95	4.14	0.2170	0.067	1.871	0.176
R11	137.37	471.15	4.38	0.2480	0.077	2.039	0.188
R21	102.92	451.35	4.93	0.1970	0.066	1.953	0.202
R22	86.47	369.28	4.99	0.1650	0.053	1.961	0.215
R23	70.02	299.45	4.98	0.1330	0.043	2.064	0.280
R142	100.50	409.60	4.20	0.2331	0.070	1.998	0.240
R13B1	148.93	340.05	3.96	0.2000	0.062	1.872	0.180
R143	84.04	344.25	3.74	0.1846	0.066	2.054	0.257
R13	104.47	302.28	3.91	0.1800	0.056	1.930	0.180
NE	20.18	44.40	2.66	0.0417	0.012	1.478	0.000
XE	131.30	289.70	5.84	0.1180	0.036	1.578	0.020

C2H4	28.05	282.51	5.03	0.1290	0.040	1.773	0.065
HE4	4.00	5.20	0.22	0.0573	0.017	0.993	-0.387
nC4H10	58.12	425.16	3.80	0.2550	0.081	1.918	0.193
R152a	66.05	386.70	4.50	0.1810	0.062	2.049	0.266
NH3	17.05	405.55	11.31	0.0725	0.026	1.645	0.060
RC318	200.04	388.15	2.80	0.3230	0.100	2.254	0.380
R12B1	165.40	427.15	4.23	0.2320	0.073	1.949	0.220
SF6	146.05	318.70	3.86	0.1980	0.059	2.000	0.250
R113	187.39	487.25	34.17	0.3250	0.010	2.231	0.252
iC5H12	72.15	461.00	3.33	0.3060	0.100	2.131	0.227
R32	52.01	351.55	5.64	0.1210	0.045	2.091	0.300