

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання
хімічної інженерії» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

Укладачі: С.В. Гулієнко, О.В. Гусарова

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2023

Рецензент *Сокольський О.Л.* д.т.н., доц.

Відповідальний редактор *Корнієнко Я.М.* д.т.н., проф.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 6 від 30.03.2023 р.)
за поданням Вченої ради інженерно-хімічного факультету
(протокол № 2 від 27.02.2023 р.)*

Низькі температури широко використовуються в промисловості для широкого діапазону технологічних процесів, а також у торгівлі та побуті для зберігання харчових продуктів, медикаментів тощо. Тому для фахівців з хімічної інженерії будуть корисними знання з холодильної техніки. У навчальному посібнику викладено основні питання пов'язані з процесами штучного охолодження, які використовуються промислових процесах, зокрема в хімічній інженерії. Розглянуто теоретичні основи отримання штучного холоду та основні практичні методи отримання низьких температур. Основну увагу приділено процесам помірному охолодження (діапазон температур від +20 до -100°C) та парокомпресійним холодильним машинам, як найбільш часто використовуваним в хімічних процесах. Наведено цикли та схеми найбільш поширених одно-, дво- та трьохступінчастих холодильних машин, а також каскадні цикли. Серед інших холодильних машин розглянуто тепловикористовуючі холодильні машини, а саме абсорбційні та ежекторні. Викладено загальний огляд обладнання, яке застосовується в холодильній техніці. Крім того, в загальних рисах розглянуто програмний продукт CoolPack, який дозволяє виконувати розрахунки холодильного обладнання.

Навчальний посібник призначений для здобувачів освітнього ступеня бакалавр освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», Навчальний посібник буде корисним фахівцям з хімічної інженерії та хімічної технології, харчової технології та біотехнології, а також студентам, які навчаються за вказаними спеціальностями.

Реєстр. № НП 22/23-536. Обсяг 6,7 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. ЗНАЧЕННЯ ХОЛОДИЛЬНОЇ ТЕХНІКИ В ХІМІЧНІЙ ІНЖЕНЕРІЇ.....	8
1.1 Використання штучного холоду в галузях економіки.....	8
1.2 Історія розвитку процесів штучного охолодження.....	10
1.3 Рівні охолодження.....	12
2. ТЕРМОДИНАМІЧНІ ОСНОВИ ОТРИМАННЯ ШТУЧНОГО ХОЛОДУ.....	14
2.1 Фазовий стан речовини.....	14
2.2 Правило фаз Гіббса.....	16
2.3 Властивості та параметри стану речовини. Термодинамічні діаграми та таблиці.....	17
2.4 Рівняння стану газів.....	23
3. МЕТОДИ ОТРИМАННЯ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР.....	31
3.1 Загальні підходи.....	31
3.2 Адіабатичне розширення стиснутих робочих речовин.....	32
3.2.1 Адіабатичне дроселювання.....	32
3.2.2 Адіабатичне розширення газу з виконанням зовнішньої роботи.....	36
4. ШТУЧНЕ ОХОЛОДЖЕННЯ. ПРИНЦИП РОБОТИ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ.....	39
4.1 Основні терміни та визначення.....	39
4.2 Загальний принцип роботи холодильної машини.....	40
4.3 Зворотний цикл Карно.....	41
4.4 Робочі речовини холодильних машин.....	43
5. ПОМІРНЕ ОХОЛОДЖЕННЯ. ПАРОКОМПРЕСІЙНІ ХОЛОДИЛЬНІ МАШИНИ.....	48

5.1 Класифікація холодильних машин.....	48
5.2 Цикли та схеми одноступінчастих холодильних машин.....	49
6. ЦИКЛИ І ПРИНЦИПОВІ СХЕМИ БАГАТОСТУПІНЧАСТИХ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН.....	57
6.1 Причини переходу до багатоступінчастого стиснення.....	57
6.2 Вибір проміжного тиску.....	57
6.2.1 Вибір проміжного тиску з умови мінімальної сумарної роботи компресора.....	58
6.2.2 Вибір проміжного тиску з умови максимального теоретичного холодильного коефіцієнта.....	62
6.3 Цикли та схеми двоступінчастих холодильних машин.....	64
6.3.1 Цикли та схеми двоступінчастих холодильних машин з однократним дроселюванням.....	64
6.3.2 Цикли та схеми двоступінчастих холодильних машин з двократним дроселюванням.....	74
6.4 Цикли та схеми трьохступінчастих холодильних машин.....	83
7. КАСКАДНІ ХОЛОДИЛЬНІ МАШИНИ.....	90
7.1 Сфера застосування каскадних холодильних машин.....	90
7.2 Найпростіша каскадна холодильна машина.....	91
7.3 Каскадна холодильна машина з теплообмінниками.....	92
8. ІНШІ ХОЛОДИЛЬНІ СИСТЕМИ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ В ПРОМИСЛОВОСТІ.....	97
8.1 Абсорбційні холодильні системи.....	97
8.2 Пароструменеві (ежекторі) системи.....	104
8.2.1 Застосування.....	108
8.2.2 Фактори, що впливають на холодопродуктивність.....	108
9. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЛАДНАННЯ ХОЛОДИЛЬНИХ УСТАНОВОК.....	112
9.1 Компресори.....	112
9.2 Конденсатори.....	114

9.3 Випарники.....	115
10. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКІВ ТА АНАЛІЗУ ХОЛОДИЛЬНИХ СИСТЕМ ТА ОБЛАДНАННЯ.....	119
10.1 Значення спеціалізованого програмного забезпечення в хімічній інженерії.....	119
10.2 Загальна характеристика програми CoolPack.....	124
10.3 Інтерфейс програми CoolPack та основні принципи роботи з набором програм EESCoolTools.....	128
10.4 Основні принципи роботи з набором програм Refrigeration Utilities.....	136
10.5 Огляд програм в CoolPack.....	142
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	146

ВСТУП

Охолодження - це процес, в якому теплота переноситься з нижчого на вищий температурний рівень шляхом виконання роботи над системою. У деяких системах теплообмін використовується для забезпечення енергії для протікання холодильного циклу. Всі охолоджувальні системи є тепловими насосами (перекачують енергію з нижчого рівня на вищий). Термін «тепловий насос» переважно використовується для опису холодильних систем, де теплота видаляється через конденсатор та становить першочерговий інтерес [1].

Газова, нафтова та хімічна промисловості є одними з найбільших споживачів штучного холоду. У зв'язку з цим, обґрунтований вибір продуктивності та режимних параметрів, а також системних рішень холодильних установок має велике значення [2].

Технологічні особливості підприємств нафтової, газової та хімічної промисловостей зумовлюють специфіку холодильного обладнання: холодильні машини повинні мати велику продуктивність, високий рівень надійності, автоматичну підтримку заданих параметрів, включаючи регулювання продуктивності, значний ресурс роботи, використання енергетичних ресурсів виробництва, в тому числі низькопотенційних, застосування недорогих робочих речовин, особливо основних та побічних продуктів виробництва [2].

У зв'язку з цим, при підготовці фахівців з хімічної інженерії, доцільно приділити достану увагу процесам штучного охолодження. Тому для студентів, що навчаються за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії» пропонується вибірковий освітній компонент «Холодильна техніка». У курсі розглядаються методи отримання низьких температур, принципи побудови, цикли та принципові схеми парових одно- і багатоступінчастих холодильних машин помірного охолодження, цикли та принципові схеми каскадних холодильних

машин помірного охолодження, цикли та схеми тепловикористовуючих холодильних машин.

Після засвоєння кредитного модуля набуваються такі компетенції:

- Здійснювати вибір і розрахунок типового устаткування та технологічних схем для систем охолодження.

- Здійснювати побудову алгоритмів розрахунку холодильної техніки за вибраними моделями процесів, користуватися сучасними комп'ютерними програмами для моделювання роботи холодильної техніки.

- Вибирати режими роботи, конструктивні розміри устаткування та систем тепло- або холодозабезпечення.

- Здійснювати конструктивну розробку устаткування.

- Здійснювати комплексне експериментальне дослідження устаткування для отримання штучного холоду.

Метою вивчення даної дисципліни є формування у студентів комплексу знань, а саме: легко орієнтуватися у можливостях існуючого холодильного обладнання, знаходити раціональні параметри для його роботи з врахуванням енергоощадних технологій, готувати проекти для нової та модернізації існуючої холодильної техніки.

1. ЗНАЧЕННЯ ХОЛОДИЛЬНОЇ ТЕХНІКИ В ХІМІЧНІЙ ІНЖЕНЕРІЇ

1.1 Використання штучного холоду в галузях економіки

Процеси штучного охолодження широко застосовуються в різних галузях промисловості. У хімічній – під час виробництва штучних волокон і пластмас, для гальмування теплонапружених екзотермічних реакцій, розділення газових сумішей та складних розчинів, у виробництві синтетичного аміаку, барвників, нітратної кислоти тощо. У харчовій – для зберігання та заморожування харчових продуктів. У нафтопереробній – депарафінізації нафти та олив, алкілування, видалення олив з газів тощо. У газовій – для фракціонування компонентів вуглеводневих газів, отримання гелію, розділення коксового та піролізних газів, очищення природного газу від важких вуглеводнів, зберігання та транспортування зріджених газів тощо. В машинобудуванні та металообробці холод використовують для холодної посадки деталей, низькотемпературного загартування. В матеріалознавстві – для вивчення поведінки металів та сплавів за низьких температур. Також при низьких температурах випробуються радіотехнічні вироби та продукти інших галузей промисловості. У гірничотехнічній промисловості та підземному будівництві, штучний холод використовується при прокладанні тунелів в нестійких ґрунтах. Також значну кількість штучного холоду використовують у системах кондиціонування промислових і побутових приміщень та транспортних засобів [3-4].

Використання охолодження в хімічній промисловості та суміжних галузях варто розглянути детальніше.

Фармацевтична промисловість використовує охолодження в процесах сублімаційного сушіння. Також в цій галузі популярним є підхід, що полягає у охолодженні рідини (наприклад, глікольний антифриз чи спирт) та її транспортування до місця, де необхідне охолодження. Низькотемпературний

спирт може охолоджувати оболонки посудин, або гліколь може бути направлений до змішувачів для охолодження повітря, розташованих в приміщеннях, де відбувається засипання порошоків і, відповідно, має підтримуватися низька вологість [5].

Хімічна, нафтохімічна та нафтопереробна галузі часто потребують збільшених холодильних установок. Основні важливі операції, що часто вимагають охолодження, такі [5]:

- відділення одного газу від іншого шляхом зрідження більш ніж одного газу;
- конденсація газів, зокрема для вловлювання газів, що витікають з ємностей для зберігання рідин;
- кристалізація однієї речовини в суміші для відділення її від інших;
- підтримання накопиченої рідини при низькій температурі для контролю тиску в ємності для зберігання;
- відведення теплоти хімічних реакцій;
- контроль вологості для гігроскопічних реактивів.

Дві основні концепції в забезпеченні охолодження – це пряме і непряме охолодження. У прямому охолодженні сам продукт є холодоагентом і стискається, конденсується та дроселюється для утворення рідини з низькою температурою. Нафтохімічна промисловість часто використовує, наприклад, пропан, етан та етилен як холодоагенти. Часто ці хімічні заводи великі та традиційно використовують високопродуктивні відцентрові компресори. Наприклад, в установках фракціонування зріджених нафтових газів можуть використовуватися 8 двоступінчастих відцентрових компресорів для стикування пропану в холодильному циклі. Інший підхід полягає в забезпеченні непрямого охолодження через використання збірних конструкцій, що використовують аміак чи прийнятний галогенопохідний холодоагент. Аміак та галогенопохідні холодоагенти з установок обслуговують теплообмінники, які працюють для охолодження, або в деяких

випадках використовують насоси, для доставки вторинних холодоагентів до теплообмінників [5].

Наведемо приклади температурних рівнів, які використовуються в хімічній промисловості: попереднє охолодження повітря перед розділенням – до -100°C (173 K); конденсація вуглеводнів відбувається при -55°C (218 K); при приблизно такому ж рівні температури відбувається виготовлення таких реагентів як аміак, карбамід, анілінові барвники, бутадієн, бутиленова гума, хлор, пестициди та гербіциди, синтетичні гуми, вінілхлорид та ксилан, а також відновлення розчинників [5].

1.2 Історія розвитку процесів штучного охолодження

Сезонні заготівлі снігу та льоду є стародавньою практикою, яка за оцінками істориків почалася ще за 10 000 років до нашої ери. Античні євреї, греки, римляни та єгиптяни не використовували сніг та лід для зберігання їжі, однак для них це були відомі засоби охолодження напоїв. Приблизно з 500 року до нашої ери в Ірані відомі ячкали – споруди для зберігання льоду, а іноді і продовольства, в пустельних умовах. Такі конструкції будувалися з водостійкого розчину, який забезпечував опір теплообміну. Вони мали форму купола і розташовувалися на поверхні ґрунту [4].

Протягом століть льодові будинки використовувалися для зберігання льоду, який був захищений тепловою ізоляцією, яка робилася з соломи або тирси. Такі споруди розташовували біля річок чи струмків та глибоко під землею, щоб максимізувати охолодження [4].

Торгівля льодом, також відома як торгівля замороженою водою, в XIX столітті була індустрією, яка була зосереджена на східному узбережжі США та Норвегії, що включала великомасштабні засоби заготівлі, зберігання та продажу природного льоду для побутових та комерційних потреб. В 1806 році Фредерік Тудор (пізніше названий Крижаним Королем) розпочав продаж нарізаного на річці Гудзон льоду та експортував його. Більшість льодових

коробок були виготовлені з дерева та були облицьовані з середини оловом, корком або цинком. Багато людей використовували тирсу або водорості, щоб довше тримати їх блоки льоду холодними. Оскільки лід в кінці кінців танув, під ящиком з льоду розташовували піддон для збору талої води. Піддон треба було часто міняти [4].

Також було поширене виготовлення льоду нічним охолодження. У такому випадку його виготовляли шляхом тримання тонкого шару води в неглибокому наземному піддоні, який залишали під нічним небом. Вода втрачала теплоту за рахунок випромінювання до стратосфери, яка має температуру близько -55°C та рано-вранці вода замерзала до льоду. Такий метод виробництва льоду був дуже популярним в Індії [4].

Охолодження випаровуванням. Шотландський професор Вільям Куллен розробив маленьку холодильну машину в 1755 році. Куллен використовував насос для створення часткового розрідження над контейнером з діетиловим етером, який після цього кипів, поглинаючи теплоту з води, з якою перебував у термічному контакті. Наступним розробником холодильної машини був Джейкоб Перкінс, американський винахідник, інженер та фізик. Перкінс отримав перший патент на парокомпресійний холодильний цикл, виданий 14 серпня 1835, який називався «Апарат та засіб для виробництва льоду та охолодження рідин». Ідея прийшла від іншого американського винахідника – Олівера Еванса, який розробив таку ідею в 1805 році, але ніколи не будував холодильників. Перкінс отримав патент, що охороняв його права окремо в Англії та Шотландії. Прототип Перкінса не був комерційно успішним. Втім, Джон Хейгі зробив його робочу модель [4].

Машину Перкінса можна вважати праобразом сучасної парокомпресійної машини, оскільки до неї входили всі найбільш характерні для таких машин елементи: посудина, де в наслідок підведення теплоти з навколишнього середовища кипів етер при низькій температурі, насос (компресор), який стискав і направляв пари ефіру в змійовик, в якому відбувалася їх конденсація. Сконденсований рідкий етер через спеціальний

дросельний вентиль направлявся в посудину (випарник), де кипів при низькій температурі [4].

В 1871 році Шарль Тел'є побудував машину, що працює на метиловому етері. В 1872 Девід Бойль отримав патент на аміачну холодильну машину. В 1881 році Карл Лінде одночасно з Відхаузенем побудував вуглекислотну машину. Ще раніше, в 1879 році він заснував «Компанію Льодових Машин Лінде», яка успішно виготовляла холодильні машини для пивоварних компаній і до 1890 року було продано 747 таких машин. В 1845 році Джон Горрі винайшов газову (повітряну) холодильну машину (патент США №8080 від 6 травня 1851 року), робота якої ґрунтується на тому, що попередньо стиснутий і охолоджений газ за рахунок навколишнього середовища розширюється в спеціальній машині – детандері. При цьому температура повітря знижувалася [4].

В 1862 році Фердинанд Карре запропонував абсорбційну холодильну машину, яка ґрунтується на поглинанні парів аміаку слабким водоаміачним розчином за допомогою джерела низькопотенційної теплоти (гарячі гази, пара, тощо). В 1884 році, був запатентований принцип пароежекторної холодильної машини: пара, що утворювалася при низькій температурі, відкачувалася і стискалася за рахунок енергії струменя пари тієї ж речовини. Першу пароежекторну холодильну машину сконструював Леблан в 1910 році [4].

Жан-Шарль Пельт'є в 1834 році відкрив, що при пропусканні електричного струму через ланцюг, що складається зі спаю двох провідників, один із спаїв охолоджується, а інший нагрівається [4].

Починаючи з першої половини ХХ століття електричні холодильники стали звичними побутовими пристроями [4].

1.3 Рівні охолодження

Розрізняють природне та штучне охолодження. Під природнім охолодженням розуміють охолодження до температур навколишнього

середовища, найчастіше таке охолодження обмежується температурами 20°C (293 K). Для цього використовують повітря, воду, іноді лід. Однак для більш складних процесів та більш низьких рівнів температур необхідно виробляти штучний холод [3].

Діапазон температур, які отримуються при штучному охолодженні умовно поділяють на 4 групи [3]:

- помірне охолодження: від $+20^{\circ}\text{C}$ до -100°C (від 283 K до 173 K);
- глибоке охолодження: від -100°C до -233°C (від 173 K до 40 K);
- кріогенна техніка: від 40 K до $0,3\text{ K}$;
- техніка ультранизьких температур: $2 \cdot 10^{-5}\text{ K}$.

Для отримання штучного холоду робоча речовина повинна бути у відповідному стані – рідкому чи газоподібному. Зокрема, для отримання штучного холоду використовують речовини, що випаровуються і конденсуються в ході роботи холодильної машини. Для забезпечення надійної роботи необхідно знати властивості робочої речовини та закономірності їх зміни, які визначаються законами термодинаміки. Тому надалі необхідно розглянути термодинамічні основи отримання штучного холоду.

Варто відзначити, що процеси охолодження є практичним застосуванням термодинаміки, тому розуміння базових принципів термодинаміки є критичним для повного розуміння таких процесів [1].

Контрольні запитання

1. Проаналізувати використання штучного холоду в галузях економіки.
2. Пояснити особливості використання штучного холоду в хімічній інженерії та суміжних галузях.
3. Проаналізувати історію розвитку холодильної техніки.
4. Пояснити рівні охолодження.

2. ТЕРМОДИНАМІЧНІ ОСНОВИ ОТРИМАННЯ ШТУЧНОГО ХОЛОДУ

2.1 Фазовий стан речовини

Залежно від значень тиску та температури, будь-яка речовина може знаходитися в різних фазових станах і для інженерних потреб необхідно точно знати, в якому стані та за яких умов знаходиться речовина, і належним чином підтримувати ці умови. Для ілюстрації взаємозв'язку між умовами та станом речовини користуються даними спостережень і фазовими діаграмами, як показано на рисунку 2.1 [6-9].

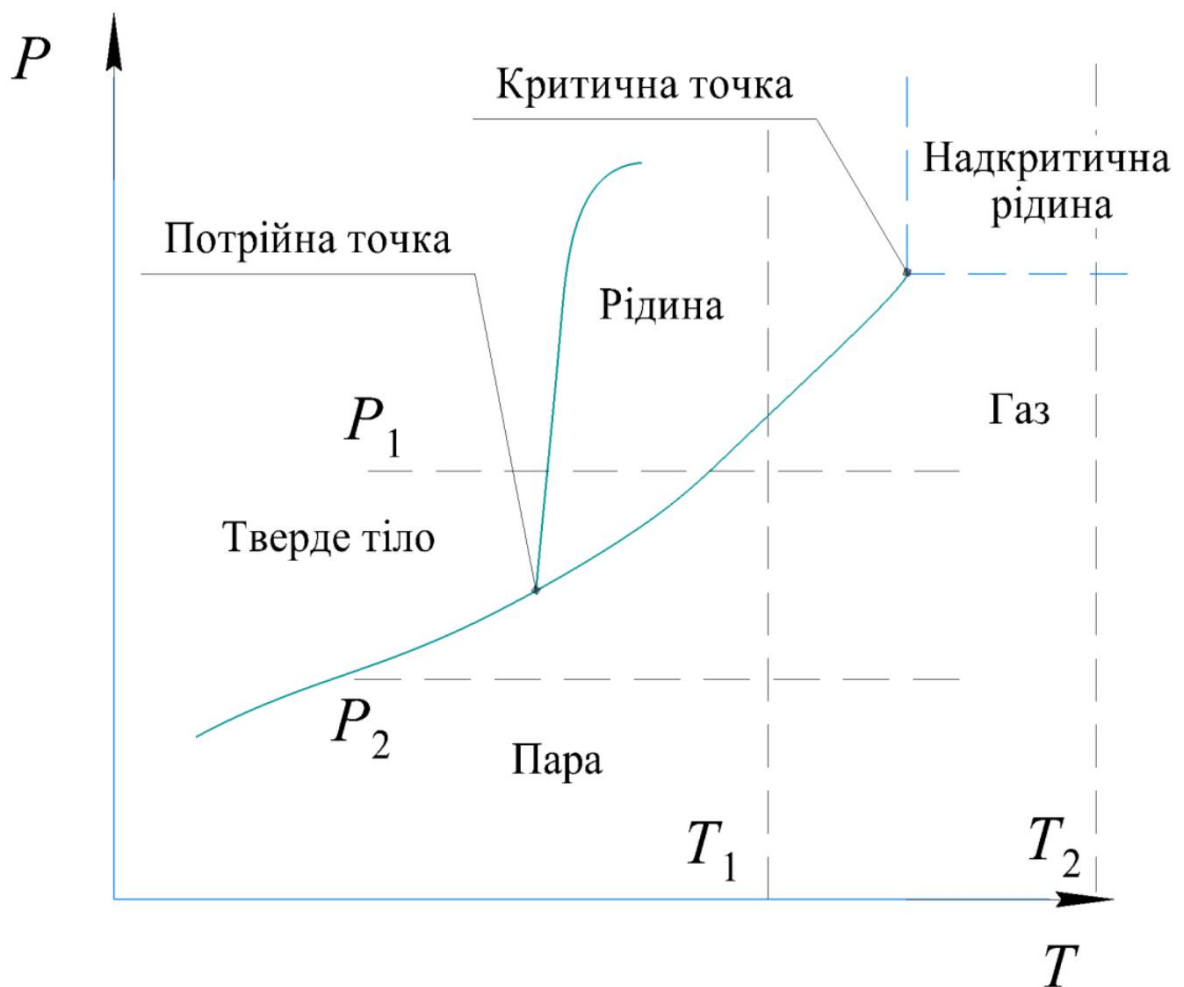


Рисунок 2.1 – Типова діаграма фазових переходів для чистих компонентів

Коли температура зростає при постійному тиску (наприклад тиску P_1 на діаграмі), відбувається перетворення з рідини в пару. При малих тисках (наприклад, тиску P_2) не спостерігається появи рідини. Натомість, при певних температурах, тверде тіло перетворюється прямо в газоподібну фазу, тобто відбувається процес, відомий як сублімація. Це спостерігається, коли сухий лід (який є твердим CO_2) сублімує за умов навколишнього середовища. Ключові визначення та спостереження, що ілюструються на рисунку 2.1, такі [6]:

- Для конкретного тиску, температура, за якої відбувається фазовий перехід тверде тіло–рідина, має назву **точка плавлення** чи **точка замерзання**; температура, за якої відбувається перехід рідина-пара, називається **точкою кипіння**, та температура, за якої відбувається перехід тверде тіло-пара, називається **точкою сублімації**.
- Точки кипіння, плавлення та сублімації збільшуються при збільшенні тиску.
- Точки плавлення та кипіння при атмосферному тиску називають **нормальною точкою плавлення** та **нормальною точкою кипіння**.
- Тиск, за якого відбувається перехід рідина–пара або тверде тіло–пара, називається **тиском пари**. Тиск пари зростає зі зростанням температури.
- Існують унікальні значення тиску та температури, за яких твердий, рідкий та пароподібний стани можуть існувати в рівновазі один з одним. Цей стан називається **потрійною точкою**.
- Існує унікальна температура, вище якої не існує рідини, незалежно від значень тисків. Ця температура називається **критичною (T_c)**.
- Існує унікальний тиск, вище якого не існує пари, незалежно від значень температури. Цей тиск називається **критичним (P_c)**.
- Речовина, яка одночасно знаходиться вище критичної температури та критичного тиску, називається **надкритичною рідиною**.

Для кожної індивідуальної речовини потрібна точка є унікальною і значення параметрів у таких точках використовуються для калібрування приладів, що вимірюють температуру [6].

2.2 Правило фаз Гіббса

Стан чистої гомогенної рідини фіксується коли дві інтенсивні термодинамічні властивості набувають визначених значень. Натомість, коли дві фази однієї чистої речовини знаходяться в рівновазі, стан системи фіксується, коли визначена лише одна властивість. Наприклад, водяна пара та рідка вода знаходяться в рівновазі при тиску 0,1 МПа лише при температурі 100°C. Неможливо змінити температури без зміни тиску, якщо підтримувати рівновагу між паром та рідиною. В такому випадку існує одна незалежна змінна [7].

Для багатофазної системи в рівновазі, кількість незалежних змінних, що повинні бути довільно зафіксовані для встановлення її *інтенсивного* стану називаються *числом ступенів свободи* системи. Ця величина визначається за правилом фаз Гіббса [7]:

$$F = 2 - \Phi + N \quad (2.1)$$

де F – число ступенів свободи, Φ – кількість фаз, N – кількість хімічних компонентів в системі.

Інтенсивний стан при рівновазі встановлюється коли її температура, тиск та склад всіх фаз зафіксований. Існують змінні фазової рівноваги, але вони не всі незалежні. Правило фаз визначає кількість змінних з цього ряду, які повинні бути визначені, щоб зафіксувати решту інтенсивних змінних і, таким чином, інтенсивний стан системи [7].

Фазою називається гомогенна область речовини. Газ або суміш газів, рідина чи рідкий розчин та кристалічне тверде тіло є прикладами фаз. Різка зміна властивостей завжди відбувається на границях фаз. Різні фази можуть співіснувати, але для застосування правила фаз вони повинні бути в рівновазі.

Фаза не обов'язково повинна бути суцільною. Прикладами несучільної фази можуть бути гази у формі бульбашок, дисперговані у рідині; рідини у формі краплин, дисперговані в іншій рідині, з якою вони не змішуються; тверді кристали, дисперговані як в газі, так і в рідині. У кожному випадку, дисперсна фаза розподілена в суцільній фазі [7].

З правила фаз Гіббса випливає, що в однокомпонентній системі:

В однофазній області – 2 ступені свободи

$$F = 2 - \Phi + N = 2 - 1 + 1 = 2$$

У двофазній області – 1 ступінь свободи

$$F = 2 - \Phi + N = 2 - 2 + 1 = 1$$

У потрійній точці – 0 ступенів свободи

$$F = 2 - \Phi + N = 2 - 3 + 1 = 0$$

Мінімальною кількістю ступенів фаз є 0, в такому стані система є інваріантною.

2.3 Властивості та параметри стану речовини. Термодинамічні діаграми та таблиці

Для аналізу та практичних розрахунків необхідно знати параметри речовин.

Фізичні властивості, значення яких однозначно визначають стан речовини називаються параметрами стану. Властивості речовини можуть бути інтенсивними та екстенсивними. Інтенсивними є властивості, які не залежать від кількості речовини в системі (наприклад, тиск та температура). І навпаки, якщо властивості залежать від кількості речовини в системі, вони називаються екстенсивними (наприклад, об'єм). Питомі, тобто віднесені до одиниці кількості речовини, екстенсивні властивості набувають сенс інтенсивних властивостей (наприклад, питомий об'єм, питома теплоємність). В більшості довідкових джерел наводяться питомі значення, які як правило віднесені до 1 кг речовини [3].

Інтенсивні властивості, що обумовлюють стан тіла чи групи тіл в термодинамічній системі, називаються термодинамічними параметрами стану тіла або системи. Під термодинамічною системою розуміють сукупність матеріальних тіл, що знаходяться в механічній та тепловій взаємодії між собою й оточуючими тілами. Усі інші матеріальні тіла, що знаходяться за межами розглядуваної системи, називають навколишнім або зовнішнім середовищем [3].

Найбільш зручними і найважливішими параметрами стану є абсолютна температура, абсолютний тиск та питомий об'єм. Якщо задані бідь-які два параметри, то третій є однозначною функцією від двох інших: $P = f(T, v)$, $T = f(P, v)$, $v = f(T, p)$ [3].

В термодинаміці використовують ще три додаткові параметри, такі як [3]:

- 1) Внутрішня енергія $U (u)$;
- 2) Ентропія, $S (s)$;
- 3) Ентальпія $H (h)$

Внутрішня енергія тіла складається з кінетичної та потенційної енергії мікрочастинок, внутрішньомолекулярної енергії, внутрішньоатомної енергії та внутрішньоядерної енергії. Кінетична енергія обумовлена масою та швидкістю поступального, обертального коливального руху, яка залежить від температури. Потенційна енергія – силами взаємодії між частинками, які залежать від відстані між частинками та взаємного положення, які в свою чергу залежать, від тиску. Таким чином, запас внутрішньої енергії залежить від стану системи, тобто внутрішня енергія є додатковим параметром стану. Зміна внутрішньої енергії залежить від початкового та кінцевого стану і не залежить від шляху, за яким система проходить з одного стану в інший [3].

Ентропія – це відношення кількості теплоти, що є в системі, до абсолютної температури системи [3]:

$$S = \frac{Q}{T} \quad (2.2)$$

Питома ентропія:

$$s = \frac{q}{T} \quad (2.3)$$

Ентропія вимірюється в одиницях енергії, віднесених до одиниці температури, тобто в системі СІ в Дж/К. Відповідно, питома ентропія вимірюється в Дж/(кг·К). Для практичних розрахунків часто використовуються кДж/К та кДж/(кг·К), також можуть бути використані позасистемні одинці, наприклад калорії [3].

Ентальпія – це сума внутрішньої енергії та потенційної енергії тиску [3]:

$$H = U + P \cdot V \quad (2.4)$$

Питома ентальпія:

$$h = u + P \cdot v \quad (2.5)$$

Ентальпія вимірюється в одиницях енергії (Дж), питома ентальпія – одиницях енергії, віднесеної до одиниці маси (Дж/кг).

Якщо задані будь-які два параметри стану, то всі решта будуть однозначними функціями від них [3].

Термодинамічні діаграми – це графіки, що показують властивості для окремих речовин, наприклад T , P , v , h та s . Найбільш поширеними діаграмами є Ts , Ph (зазвичай такі діаграми зображуються в напівлогарифмічних координатах, тобто $\lg p$ як функція від h) та hs (яка також називається діаграмою Мол'є). Позначення означають змінні, вибрані для координат. Інші діаграми можливі, але використовуються рідко [7].

На рисунках 2.2-2.4 показано загальні характеристики цих діаграм. Хоча вони основані на даних для води, загальний характер аналогічний для всіх речовини. Двофазний стан, представлений на PT діаграмі на рисунку 2.1, лежить по областях на цих діаграмах, а потрійна точка на рисунку 2.1 стає лінією. Лінії постійних величин в області рідина/пара забезпечують безпосередньо значення для двох фаз. Критична точка позначена літерою K та суцільні криві, що проходять через неї представляють стани насиченої рідини (ліворуч від K) та насиченої пари (праворуч від K). Діаграма Мол'є

(рисунок 2.4) зазвичай не включає даних щодо об'єму. В області пари чи газу, з'являються лінії постійної температури та постійного перегріву. Перегрів це термін, що позначає різницю між дійсною температурою та температурою насичення при даному тиску [7].

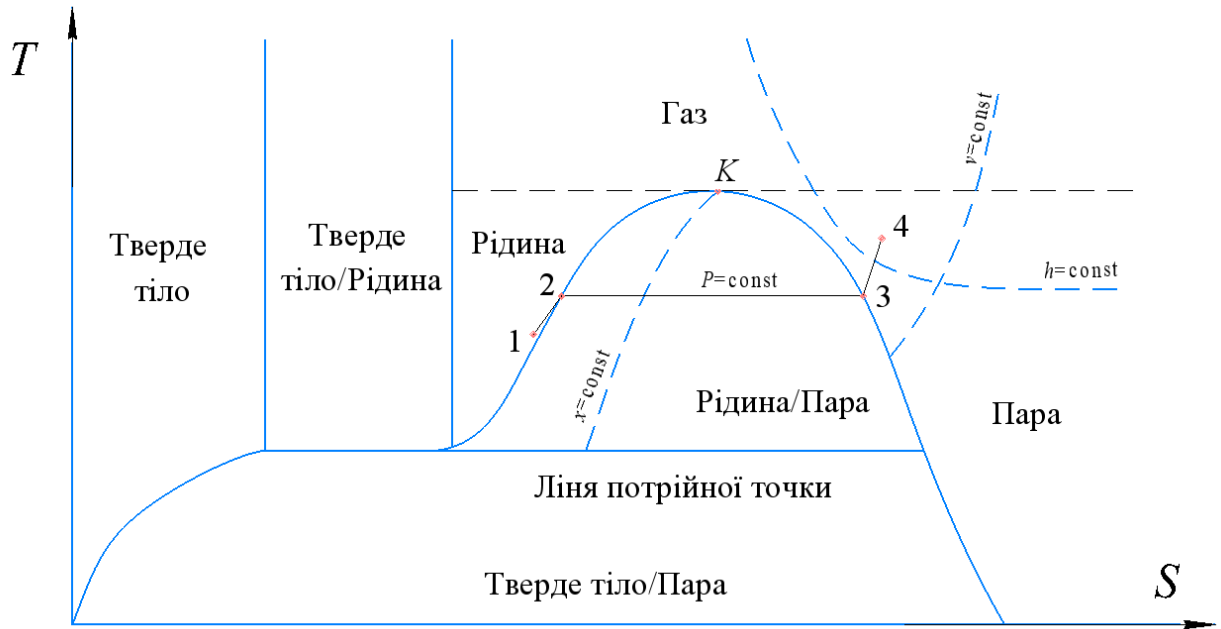


Рисунок 2.2 – Спрощена Ts діаграма, що представляє загальні характеристики таких графіків

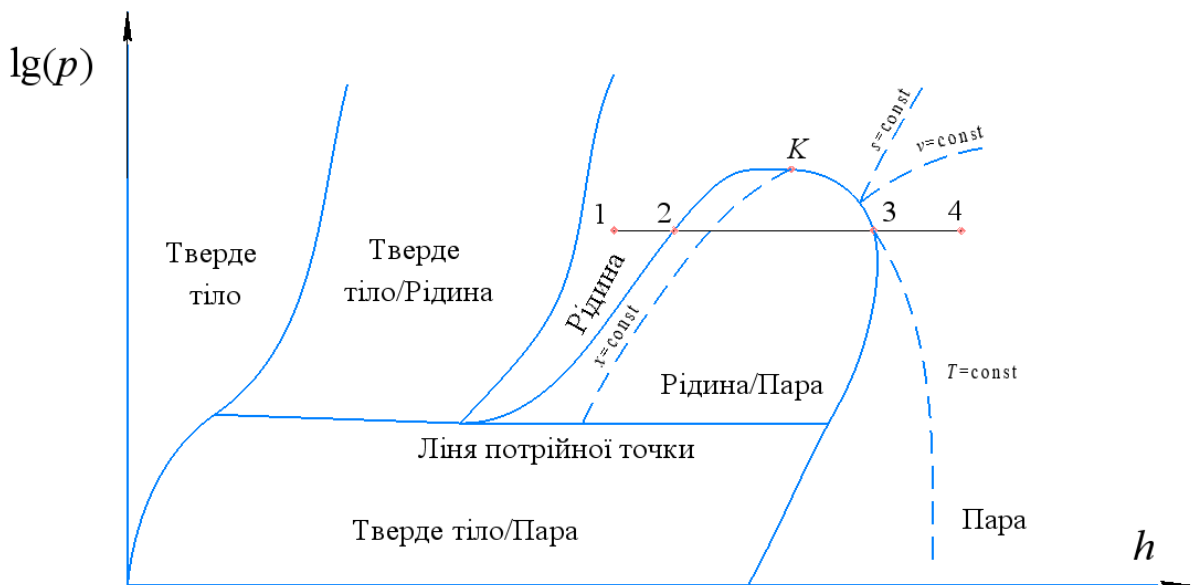


Рисунок 2.3 – Спрощена Ph діаграма, що представляє загальні характеристики таких графіків

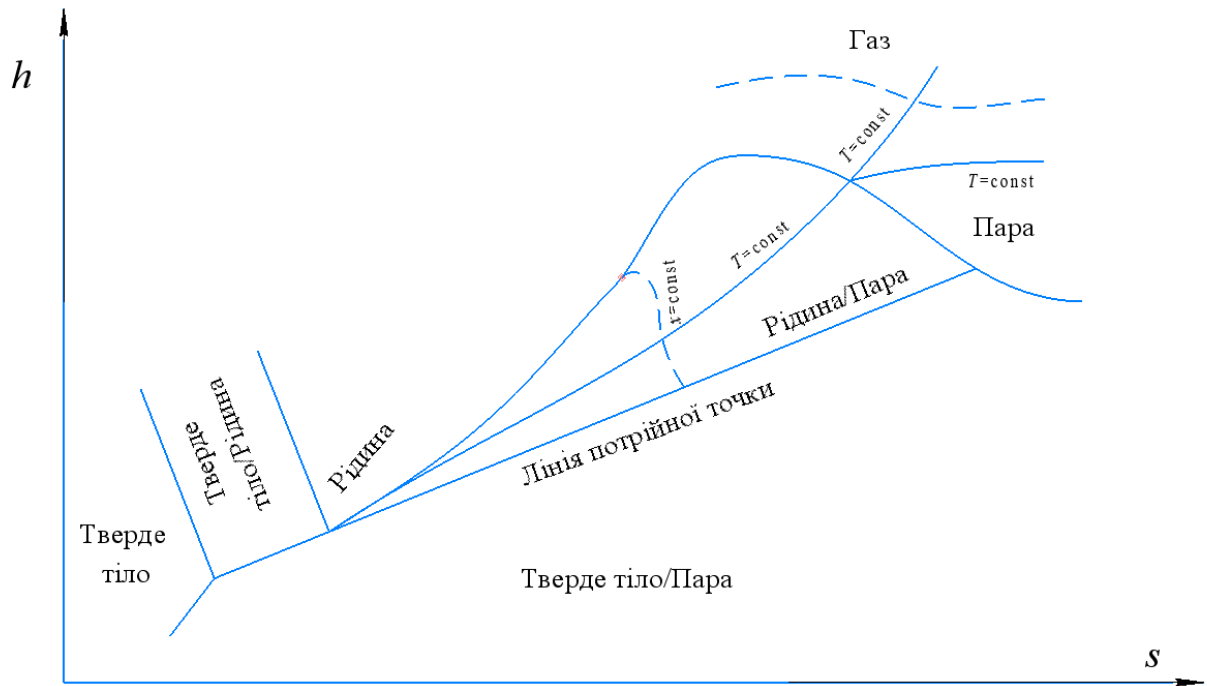


Рисунок 2.4 – Спрощена діаграма Мол'є, що представляє загальні характеристики таких графіків

Шляхи протікання деяких процесів легко наносяться на окремі термодинамічні діаграми. Наприклад, при кипінні, рідина на вході може мати температуру нижчу, ніж температура насичення, а на виході може бути перегріта пара. Отже, в такому випадку речовина нагрівається при постійному тиску до її температури насичення (лінія 1-2 на рисунках 2.2 та 2.3), випаровується при постійних P та T (лінія 2-3) та перегрівається при постійному P (лінія 2-3). На Ph діаграмі (рисунок 2.3) весь процес представлений горизонтальною лінією, яка відповідає тиску кипіння. Той же самий процес показаний на діаграмі Ts (рисунок 2.2). Стисливість рідин мала для температур значно нижчих за T_k , та властивості в рідкій фазі змінюються з тиском дуже повільно. Лінії постійного тиску на такій діаграмі для області рідини, таким чином, лежать дуже близько одна до одної, та лінія 1-2 майже стиснута з кривою насиченої рідини [7].

Варто відзначити, що для практичних розрахунків можуть використовуватися не повні діаграми, а лише ті області, які становлять інтерес

для аналізу процесів. Наприклад, на рисунках 2.5–2.7 показані діаграми для аміаку Ts , Ph та hs , які автоматично генеруються в програмі CoolPack [10].

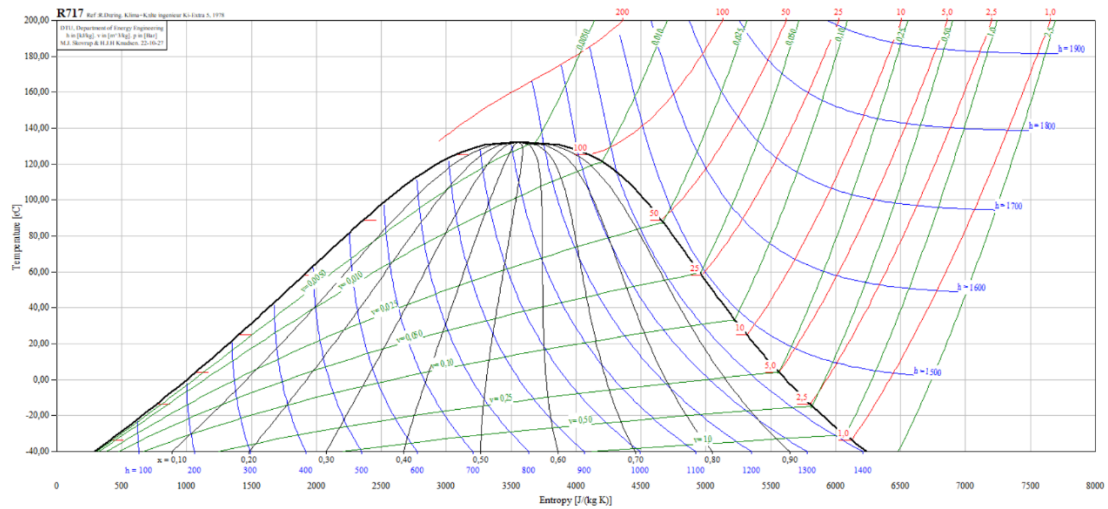


Рисунок 2.5 – Робоча область Ts діаграми для NH_3

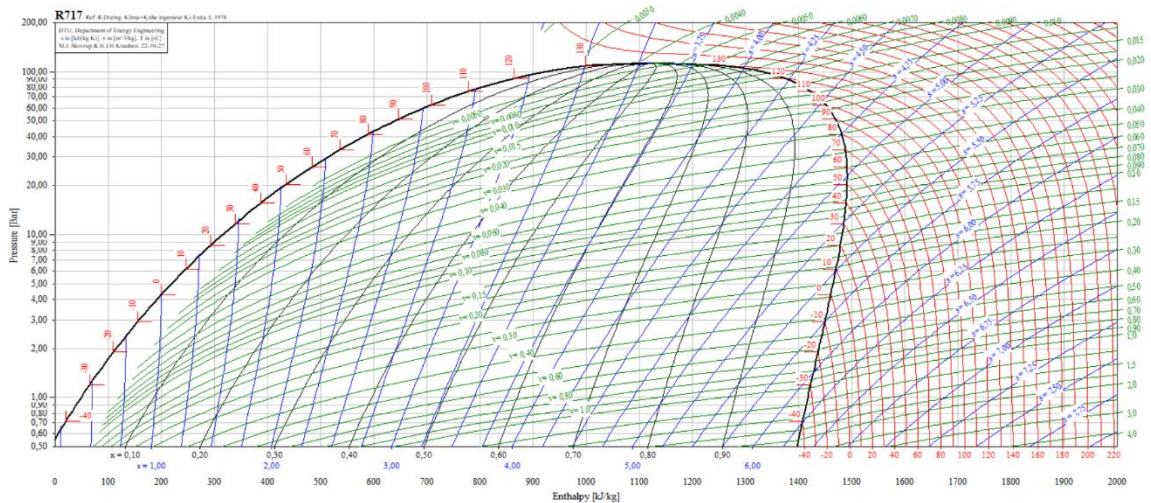


Рисунок 2.6 – Робоча область Ph діаграми для NH_3

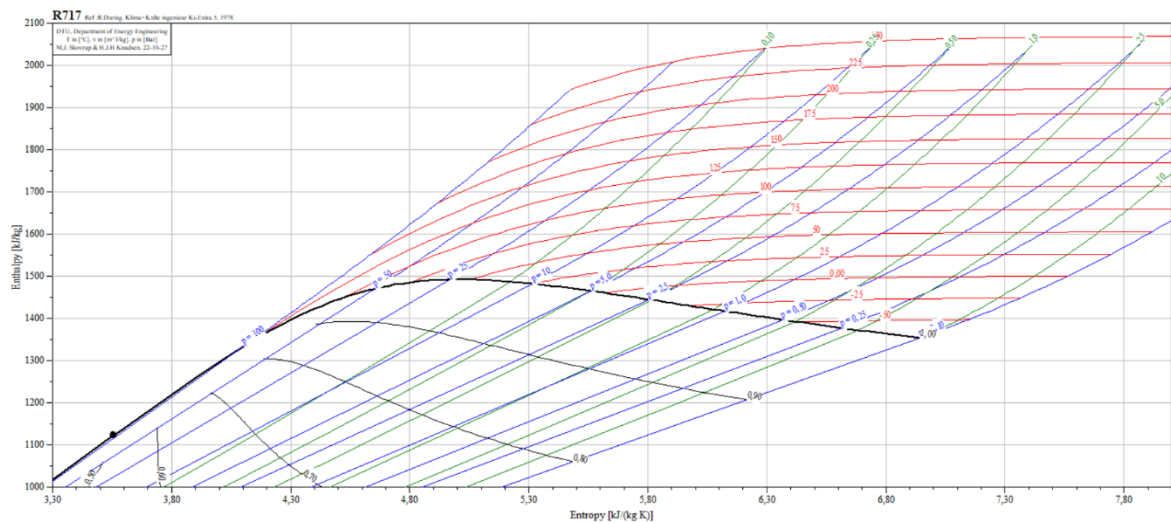


Рисунок 2.7 – Робоча область hs діаграми для NH_3

На всіх діаграмах зображені інтенсивні властивості [3].

У багатьох випадках термодинамічні властивості занесені в таблиці. Їх перевага в тому, що дані можуть бути представлені більш точно, ніж на діаграмах, але потребують використання інтерполяції. Як таблиці, так і діаграми наведені в великій кількості довідкових джерел літератури, наприклад в [11, 12]. Також існує спеціальне програмне забезпечення, яке дозволяє визначати точні значення термодинамічних властивостей [10].

2.4 Рівняння стану газів

Рівняння, що пов'язують між собою параметри стану називаються характеристичними або рівняннями стану даної речовини. Вони мають вигляд [3]:

$$F(P, v, T) = 0 \quad (2.6)$$

Рівняння стану ідеального газу виражається такою залежністю [6]:

$$pv = RT \quad (2.7)$$

Це рівняння, відоме, як рівняння Клапейрона, виявилось придатним лише для станів газу, що значно віддалені від критичного, як наприклад для водню чи гелію при кімнатній температурі [1, 6].

При високих тисках і низьких температурах застосування рівняння Клапейрона може призвести до похибок, що доходять до 500%. Але навіть при кімнатній температурі та атмосферному тиску для деяких газів відхилення від ідеального досягає 2-3%. Це відхилення пояснюється впливом молекулярних сил, які не враховані в рівнянні Клапейрона [1, 6].

Було запропоновано багато (понад 50) рівнянь стану реального газу, але жодне з них не має достатньої загальності та точності. Найбільш близько відображає зміну стану реальних газів рівняння ван дер Ваальса [1, 6]:

$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT \quad (2.8)$$

де a та b – дослідні коефіцієнти; R – газова стала; v – питомий об’єм газу; T – абсолютна температура.

Рівняння ван дер Ваальса відрізняється від рівняння стану ідеального газу двома поправками. Перша поправка a/v^2 враховує сили взаємного притягання молекул. Вони створюють біля стінок, що обмежують газ, рівнодіючу силу, направлену в середину газового об’єму (рисунок 2.8). В результаті, тиск газу, що вимірюється манометром зменшується на величину молекулярного тиску a/v^2 , тобто [1, 6]:

$$p = p' - \frac{a}{v^2} \quad (2.9)$$

де p' – тиск ідеального газу; p – дійсний тиск реального газу.

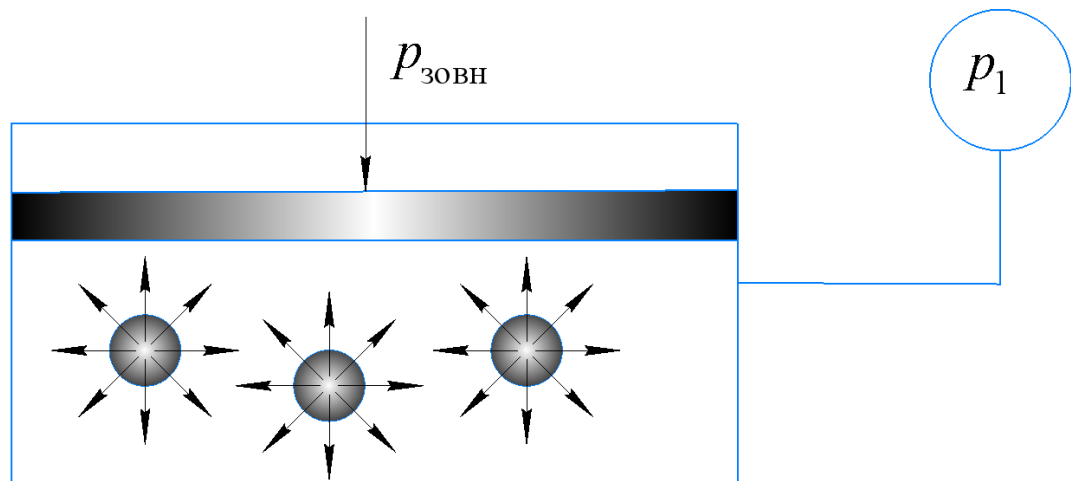


Рисунок 2.8 – До врахування сил міжмолекулярної взаємодії в рівнянні ван дер Ваальса

Згідно ван дер Ваальса, додаткова величина до зовнішнього тиску, що називається молекулярним тиском, прямо пропорційна квадрату густини чи обернено пропорційна квадрату питомому об’єму, тобто дорівнює a/v^2 . Очевидно, що молекулярний тиск зростає зі зменшенням питомого об’єму [1, 6].

Друга поправка b представляє собою так званий нестисливий об'єм (коволіум), тобто об'єм самих молекул. Різниця $v-b$ є вільним простором, в якому можуть рухатися молекули (рисунок 2.9) [1, 6].

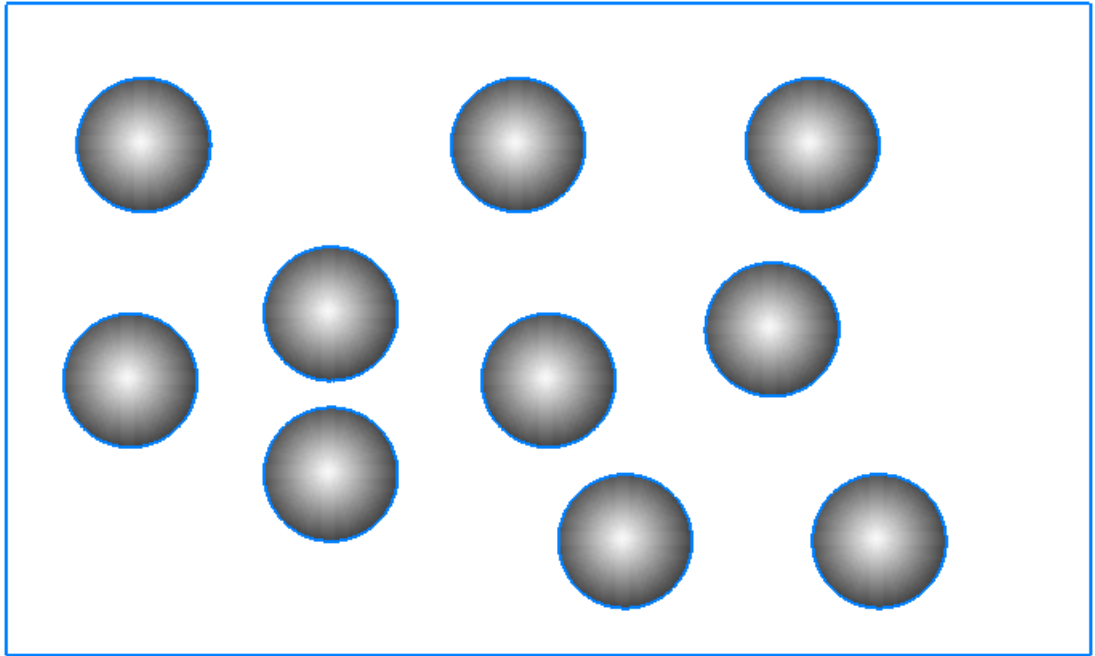


Рисунок 2.9 – До врахування об'єму молекул в рівнянні ван дер Ваальса

При достатньо високому розрідженні, коли величини a/v^2 та b нехтовно малі порівняно з об'ємом, рівняння ван дер Ваальса переходить в рівняння Клапейрона [1, 6].

Рівняння ван дер Ваальса не є достатньо точним і при високих тисках дає лише перше наближення до дійсних величин. Величини a та b для кожного газу постійні і називаються константами ван дер Ваальса [1, 6].

З рівняння ван дер Ваальса можна отримати критичні параметри. Рівняння (2.8) можна переписати [1, 6]:

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2} \quad (2.10)$$

Шляхом диференціювання та прирівнювання отриманого значення до нуля можна отримати [1, 6]:

$$\frac{\partial p}{\partial v} = -\frac{RT}{(v-b)^2} + \frac{2a}{v^3} = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial v^2} = \frac{2RT}{(v-b)^3} - \frac{6a}{v^4} = 0 \quad (2.12)$$

З рівнянь (2.11) та (2.12) випливає [1, 6]:

$$\frac{RT}{(v-b)^2} = \frac{2a}{v^3} \quad (2.13)$$

$$\frac{RT}{(v-b)^3} = \frac{3a}{v^4} \quad (2.14)$$

Розділивши один на одне ліві та праві частини рівнянь (2.13) та (2.14) отримаємо [1, 6]:

$$v-b = \frac{2v}{3} \quad (2.15)$$

або

$$v = 3b \quad (2.16)$$

Підставлення в рівняння (2.11) рівняння (2.16) дає [1, 6]:

$$\frac{RT}{4b^2} - \frac{2a}{27b^3} = 0 \quad (2.17)$$

звідки

$$T = \frac{8a}{27Rb} \quad (2.18)$$

Підставляючи значення для T в рівняння (2.10) отримаємо [1, 6]:

$$p = \frac{8Ra}{27R \cdot 2b^2} - \frac{a}{9b^2} = \frac{a}{27b^2} \quad (2.19)$$

Отримані значення є критичними константами газу, виражені через коефіцієнти a та b рівняння ван дер Ваальса. Тобто [1, 6]:

$$v_{\text{кр}} = 3b \quad (2.20)$$

$$T_{\text{кр}} = \frac{8a}{27Rb} \quad (2.21)$$

$$p_{\text{кр}} = \frac{a}{27b^2} \quad (2.22)$$

Також можна виразити константи в рівнянні ван дер Ваальса через критичні параметри [1, 6]:

$$b = \frac{RT_{\text{кр}}}{8p_{\text{кр}}} \quad (2.23)$$

$$a = \frac{27R^2T_{\text{кр}}^2}{64p_{\text{кр}}} \quad (2.24)$$

Рівняння (2.23) та (2.24) дозволяють визначити константи ван дер Ваальса за експериментально знайденими значеннями критичної температури та критичного тиску [1, 6].

Прийнявши в якості одиниці вимірювання критичні параметри газу, можна тиск, об'єм та температуру виразити в частках критичних величин [1, 6]:

$$\frac{p}{p_{\text{кр}}} = \pi \quad (2.25)$$

$$\frac{v}{v_{\text{кр}}} = \varphi \quad (2.26)$$

$$\frac{T}{T_{\text{кр}}} = \theta \quad (2.27)$$

або

$$p = \pi p_{\text{кр}} \quad (2.28)$$

$$v = \varphi v_{\text{кр}} \quad (2.29)$$

$$T = \theta T_{\text{кр}} \quad (2.30)$$

Величини π , φ та θ називають приведеними тиском, об'ємом та температурою. Якщо в рівняння (2.8) підставити рівняння (2.28)–(2.30), то отримуємо [1, 6]:

$$\left(\pi p_{\text{кр}} + \frac{a}{\varphi^2 v_{\text{кр}}^2} \right) (\varphi v_{\text{кр}} - b) = R\theta T_{\text{кр}} \quad (2.31)$$

Якщо критичні параметри виразити рівняннями (2.20)–(2.22), отримаємо [1, 6]:

$$\left(\pi + \frac{3}{\varphi^2}\right)(3\varphi - 1) = 8\theta \quad (2.32)$$

Рівняння (2.32) називається приведеним рівнянням ван дер Ваальса [1, 6].

Для критичного стану приведені тиск, об'єм та температура дорівнюватимуть одиниці, тобто [1, 6]:

$$\pi = \varphi = \theta \quad (2.33)$$

Стани речовини, що характеризуються однаковими значеннями π , φ та θ називається відвідними станами [1, 6].

Відхилення від законів ідеального газу можна охарактеризувати за допомогою ступеня стиснення за допомогою відношення [1, 6]:

$$\frac{p_1 v_1}{p_0 v_0} = \rho \quad (2.34)$$

в якому добуток $p_0 v_0$ представляє собою величину для газу при певній початковій температурі, зазвичай $t_0 = 0^\circ \text{C}$ ($T_0 = 273,15 \text{ K}$). Це відношення відоме під назвою число Амага [1, 6].

Рівняння стану реального газу можна записати в такому вигляді [1, 6]:

$$p v = \zeta R T \quad (2.35)$$

де ζ називається коефіцієнтом стисливості. Цей коефіцієнт залежить від температури та природи газу. Застосовуючи рівняння (2.35) до газу в двох різних станах отримуємо співвідношення [1, 6]:

$$\frac{p_1 v_1}{p_2 v_2} = \frac{\zeta_1 T_1}{\zeta_2 T_2} \quad (2.36)$$

Це рівняння дозволяє вирішувати задачі, які на основі законів ідеального газу розв'язуються лише наближено. Рівняння Клапейрона можна розглядати як часткову форму рівняння (2.35), коли коефіцієнт стисливості $\zeta = 1$. Застосування цього рівняння майже не ускладнюється тим, що множник відрізняється від одиниці [1, 6].

Коефіцієнт стисливості ζ пов'язаний з числом Амага ρ такою залежністю [1, 6]:

$$\zeta = \frac{pv}{RT} = \frac{pv}{RT_0} \cdot \frac{T_0}{T} = \frac{pv}{p_0 v_0} \cdot \frac{T_0}{T} = \rho \frac{T_0}{T} \quad (2.37)$$

Значення коефіцієнта стисливості знаходиться за результатами експериментів, при чому найзручніше користуватися залежністю від питомих параметрів, за допомогою діаграми, показаної на рисунку 2.10.

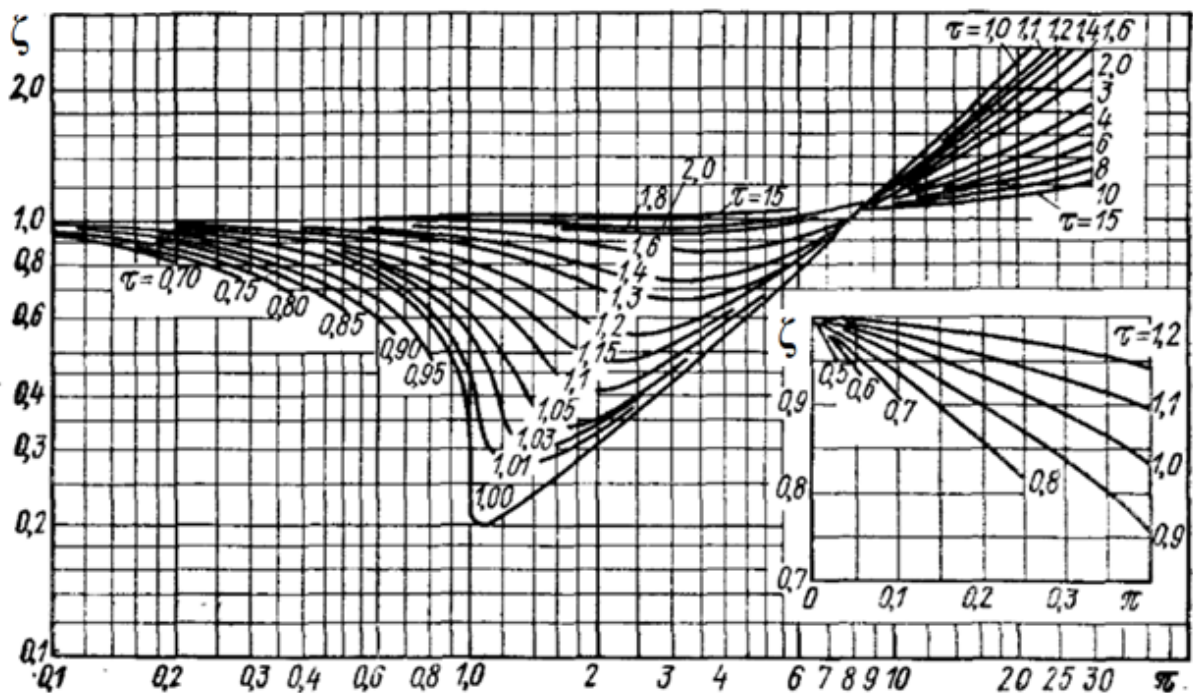


Рисунок 2.10 – Залежність коефіцієнта стисливості від приведених тиску та температури [3, 11].

Також в окремих випадках використовується віриальне рівняння, запропоноване Камерлінгом-Онесом [1]:

$$\frac{pv}{RT} = 1 + B\rho + C\rho^2 + D\rho^3 + \dots \quad (2.38)$$

де B, C, D – віриальні коефіцієнти, ρ – густина газу.

Застосування нескінченних рядів для практичних розрахунків, звісно, неможливе, та насправді використовуються усічення віриальних рівнянь. Ступінь усічення обумовлені не лише за температурою та тиском, а й також доступністю кореляцій або даних для віриальних коефіцієнтів. Значення

зазвичай можна знайти для B та часто для C , але рідко для коефіцієнтів вищого порядку [1].

Для практичних розрахунків у холодильній техніці найчастіше використовують коефіцієнт стисливості.

Контрольні запитання

1. Проаналізувати фазовий стан речовини.
2. Пояснити особливості потрійної точки та критичної точки на фазовій діаграмі.
3. Формулювати правило фаз Гіббса
4. Проаналізувати основні параметри, які характеризують стан речовини та методи визначення їх значень для практичних розрахунків.
5. Охарактеризувати рівняння стану газів.
6. Пояснити які рівняння найбільш підходящі для опису поведінки реальних газів.

3. МЕТОДИ ОТРИМАННЯ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР

3.1 Загальні підходи

У холодильній техніці розділяють природне і штучне охолодження. При цьому природнім називають охолодження, яке відбувається самодовільно. Як вже зазначалося, в процесі природного охолодження для зниження температур до звичайних найбільш широко використовують розповсюджені дешеві та доступні холодильні агенти, такі як вода, лід та повітря [3].

У процесах штучного охолодження зниження температур найчастіше проводиться наступними методами [3]:

1. За допомогою фазових переходів, які супроводжуються поглинанням теплоти, в першу чергу випаровуванням води, аміаку, фреонів та подібних речовин.

2. Адіабатичним розширенням у відповідних умовах стиснених речовин, яке може відбуватися двома способами: дроселюванням без виконання зовнішньої роботи та детандеруванням з виконанням зовнішньої роботи.

3. Десорбцією газів.

4. Пропусканням струму через спай двох металів (використання ефекту Пел'є).

5. Адіабатичним розмагнічуванням деяких солей.

Методи 1-4 використовуються для отримання помірного холоду, метод 2 також використовується для отримання глибокого охолодження, метод 5 – єдиний метод отримання ультранизьких температур [3].

Температури, які досягають при фазових переходах відрізняються залежно від тиску випаровування. Наприклад, при випаровуванні рідкого аміаку при тиску 0,2 МПа можна забезпечити охолодження до температури -20°C , тоді як при тиску 0,1 МПа випаровування тієї рідини дозволяє досягнути температурного рівня -34°C [3].

Крім того, охолодження можна отримати при змішуванні та розчиненні деяких речовин. Наприклад, при приготуванні розчину складу: вода – 62%, хлорид амонію – 19%, нітрат калію – 19%, отримується температура -12°C . Додавання до льоду карбонату калію дозволяє знизити температуру до -46°C , а додавання до льоду сульфатної кислоти – до -30°C . Також можна використати сухий лід, який при додаванні спиртів чи етерів охолоджується до -80°C . Однак застосування таких методів у промисловому масштабі ускладнене.

3.2 Адіабатичне розширення стиснутих робочих речовин

Як вже зазначалося, адіабатичне розширення може реалізовуватися двома способами: дроселюванням газу, пари чи рідини без виконання зовнішньої роботи та розширенням стиснутого газу або пари з виконанням зовнішньої роботи в спеціальних розширювальних машинах, які отримали назву детандери. Ці два процеси доцільно розглянути детальніше.

3.2.1 Адіабатичне дроселювання

Адіабатичним дроселюванням називається необоротне розширення робочої речовини при її проходженні крізь пристрій з малим прохідним перерізом (дросель, шайба, пориста перегородка тощо). Процес протікає швидко, тому теплообмін з навколишнім середовищем практично не відбувається і ентальпія речовини не змінюється, тобто корисна зовнішня робота не виконується [3].

Розглянемо трубу постійного перерізу d (внутрішній діаметр труби, стала величина), в якій встановлено шайба діаметром d_0 , так що внутрішній діаметр шайби менший за внутрішній діаметр труби (рисунок 3.1). Виберемо два перерізи I та II, які знаходяться на такій відстані до шайби, що до перерізу I та після перерізу II іде сталий потік [3].

Перший закон термодинаміки можна записати у вигляді [6-9]:

$$dq = dh + d\left(\frac{w^2}{2}\right) \quad (3.1)$$

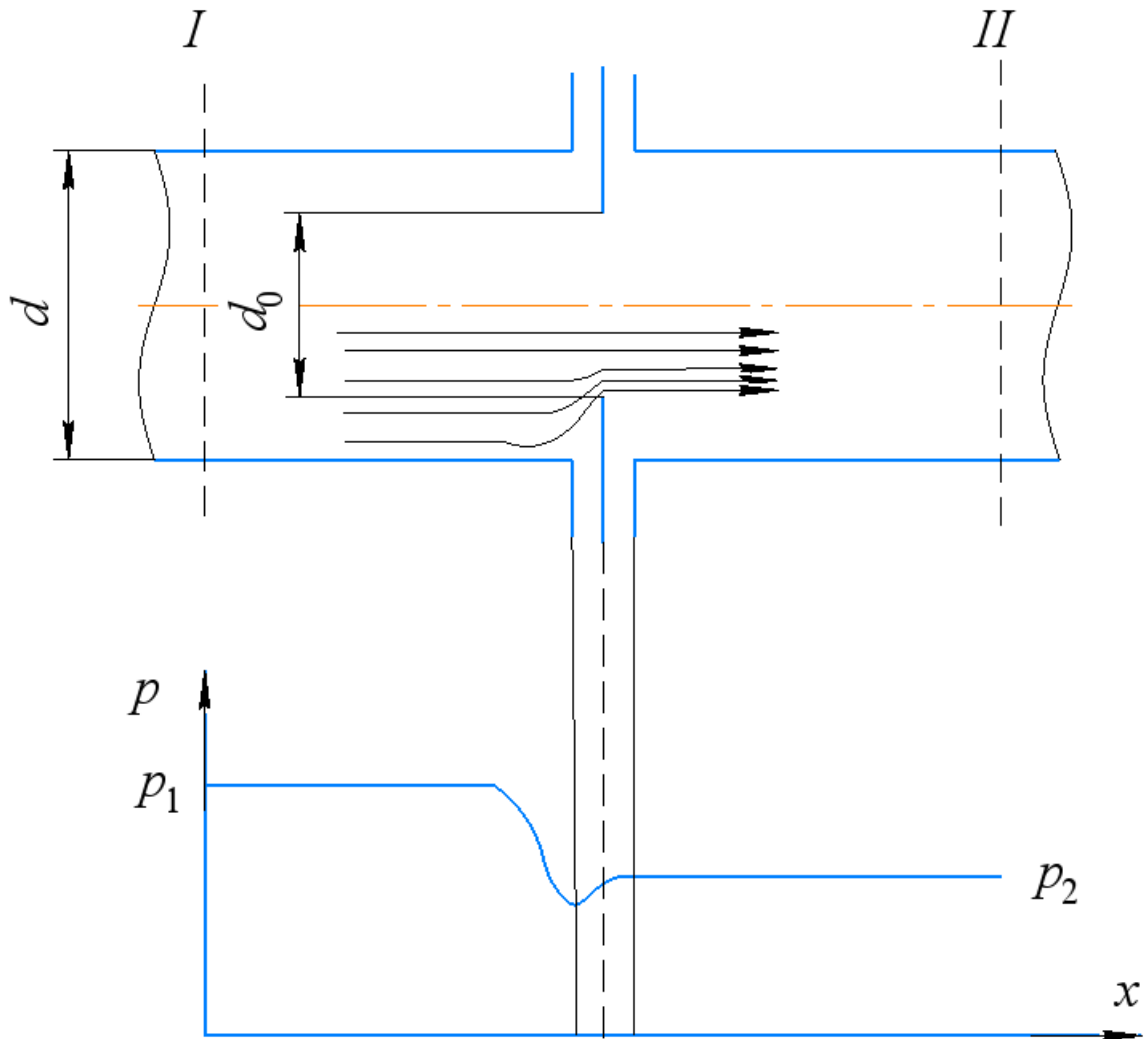


Рисунок 3.1 – До ілюстрації принципу дії дроселя

Замінімо диференціали скінченними різницями:

$$\Delta q = \Delta h + \Delta\left(\frac{w^2}{2}\right) \quad (3.2)$$

Оскільки процес адіабатичний, то $dq = \Delta q = 0$. Тоді

$$\Delta q = 0 = (h_2 - h_1) + \left(\frac{w_2^2 - w_1^2}{2}\right) \quad (3.3)$$

де h_1, h_2 – значення ентальпій в перерізі I та II відповідно; w_1, w_2 – значення швидкостей в перерізі I та II відповідно.

Оскільки витрата речовини та площі поперечних перерізів I та II постійні, то:

$$w_2 = w_1 \quad (3.4)$$

У такому разі виконання рівності (3.3) можливе лише у випадку:

$$h_2 = h_1 \quad (3.5)$$

Тобто, до і після процесу дроселювання ентальпія не змінюється. Змінюється тиск, при чому падіння тиску є необоротним процесом. Безпосередньо в самому дроселі ентальпія змінюється, оскільки змінюється швидкість та внутрішня енергія. Такі процеси можуть бути описані таким чином. Оскільки дросель або інший місцевий опір являє собою звуження прохідного перерізу труби, то при протіканні крізь нього потік прискорюється, його кінетична енергія збільшується, отже ентальпія зменшується. Після того, як за дроселем переріз знову збільшується, потік гальмується, його кінетична енергія зменшується, і ентальпія знову зростає [3].

При адіабатичному дроселюванні може змінюватися температура дросельованої рідини. Ця зміна температури носить назву ефекту Джоуля-Томсона, або дросель-ефекту. У термодинаміці низьких температур розрізняють диференційний, інтегральний та охолоджуючий ефект Джоуля-Томсона [3].

Диференційний ефект Джоуля-Томсона – це відношення нескінченно-малої зміни температури дросельованої рідини до нескінченно малої зміни тиску, що викликає цю зміну температури [3]:

$$\alpha_i = \left(\frac{dT}{dP} \right)_{h=\text{const}} \quad (3.6)$$

При дроселюванні ідеального газу зміни температури не буде, бо не виконується робота проти молекулярних сил.

Якщо газ має більшу стисливість ($\zeta > 1$), то при розширенні він буде охолоджуватися. І навпаки, якщо $\zeta < 1$ газ буде нагріватися. Приклади значення диференційного дросель-ефекту: повітря – $\alpha_i = -0,25^\circ\text{C}$, вуглекислий газ –

$\alpha_i = -1,25^\circ\text{C}$, водень – $\alpha_i = +0,2^\circ\text{C}$. Існують діаграми зміни дросель-ефекту [3].

Точка, в якій ефект Джоуля-Томсона дорівнює нулю, тобто ефект змінює знак на протилежний, називається точкою інверсії. Сукупність цих точок є кривою, яка називається інверсійною кривою (рисунок 3.2) [3].

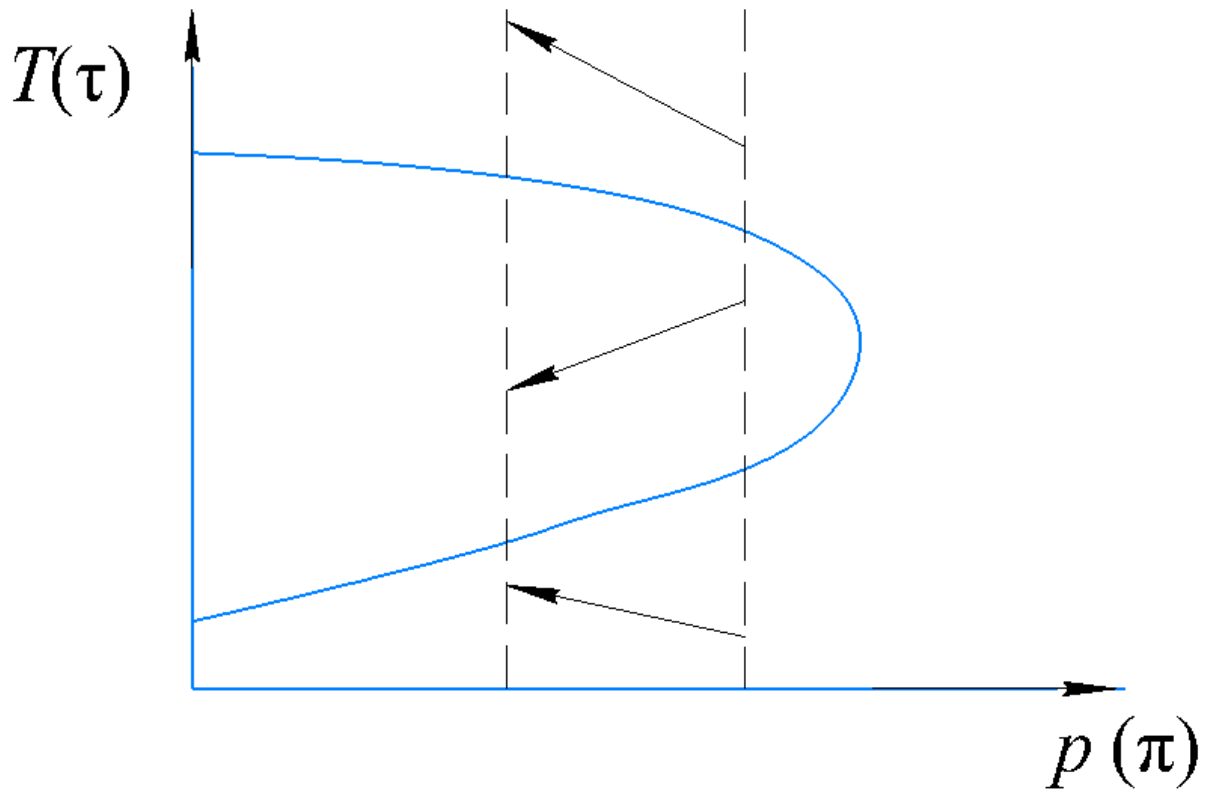


Рисунок 3.2 – Інверсійна крива

Точки інверсії відносяться до стану газу і до стану рідини. Знаючи положення точки інверсії, можна знати знак ефекту. Центральна область, в якій при дроселюванні температура зменшується, називається областю позитивного ефекту. На кривій інверсії зміни не відбуваються, тобто $\alpha_i = 0$ [3].

Температури інверсії деяких газів при $P = 0,1$ МПа:

Водень (H_2)	верхня 225 К	нижня 25 К
Водяна пара (H_2O)	верхня 4370К	нижня 485 К
Азот (N_2)	верхня 853 К	нижня 95 К.

Інтегральний ефект Джоуля-Томсона показує сумарну зміну температури при кінцевому перепаді тисків [3]:

$$\Delta T_i = T_2 - T_1 = \int_{P_1}^{P_2} \alpha_i dP = \int_{P_1}^{P_2} \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_i dP \quad (3.7)$$

Наприклад, при дроселюванні водяної пари від тиску 29,4 МПа та температури 450°C до тиску 0,1 МПа температура зміниться до 180°C. Таким чином інтегральний дросель-ефект буде дорівнювати $\Delta T_i = T_2 - T_1 = 450 - 180 = 270$ °C.

Охолоджуючий ізотермічний ефект дроселювання показує кількість холоду, що отримано на 1 кг газу, що розширився у дроселі з початкового до кінцевого тиску [3]:

$$\Delta i_t = c_p \Delta T_i \quad (3.8)$$

3.2.2 Адіабатичне розширення газу з виконанням зовнішньої роботи

На відміну від адіабатичного дроселювання, в якому не змінюється ентальпія, при адіабатичному розширенні залишається постійною ентропія. При розширенні має виконуватися три види роботи [3]:

1. Подолання сили міжмолекулярної взаємодії.
2. Виштовхування порції газу щоб зайняти його місце.
3. Зовнішня робота.

При розширенні без виконання зовнішньої роботи, робота газу витрачається на подолання сил тертя при проходженні крізь дросель і витрачена внутрішня теплова енергія поповнюється виникаючою теплотою тертя. При цьому теплова енергія повертається робочому тілу. Тобто, виконуються лише перша та друга складова роботи. При розширенні з виконанням зовнішньої роботи, що втілюється у переміщенні поршня чи обертанні робочого колеса турбіни виконуються всі складові роботи. Отже, при детандруванні досягається більше охолодження (рисунок 3.3) [3].

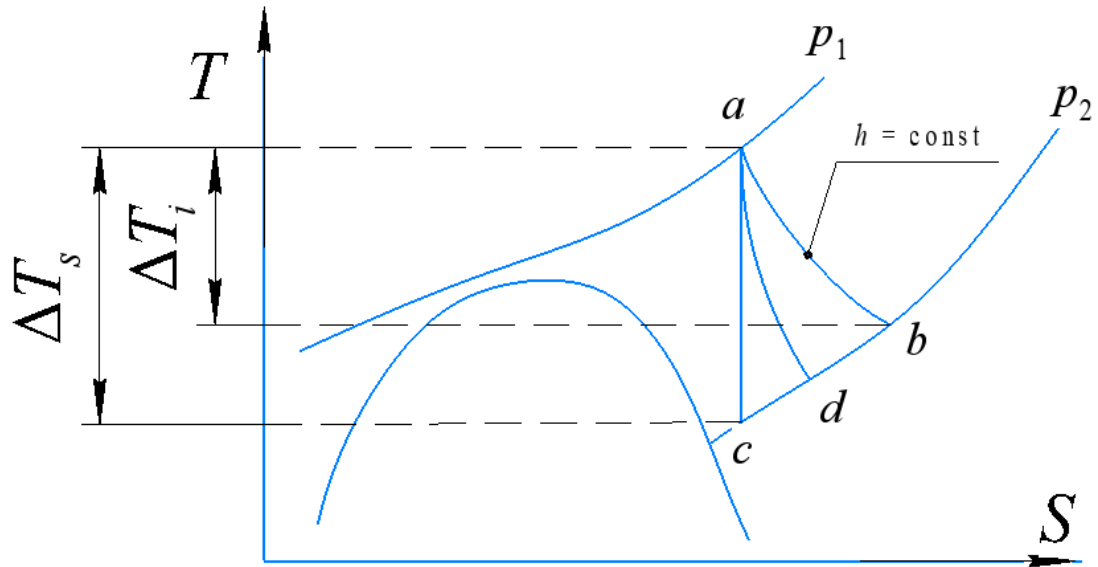


Рисунок 3.3 – Зміна температури при розширенні газу в детандері та дроселі

На рисунку 3.3 лінія $a-c$ описує зміну температури в детандері. При цьому зміна ентальпії становитиме [3]:

$$\Delta h_0 = h_a - h_c \quad (3.9)$$

У реальності адіабатичний процес здійснити не можна, і дійсний процес буде протікати по політропі $a-d$ зі зростанням ентропії. Тоді дійсний теплоперепад буде становити [3]:

$$\Delta h'_0 = h_a - h_d \quad (3.10)$$

З рисунка 3.3 очевидно, що $\Delta h'_0 < \Delta h_0$.

За цими параметрами можна оцінити тепловий коефіцієнт корисної дії (ККД) детандера:

$$\eta = \frac{h'_0}{h_0} \quad (3.11)$$

Тепловий ККД детандера завжди менше одиниці.

При дроселюванні ідеального газу температура не змінюється.

Контрольні запитання

1. Навести основні методи отримання низьких температур, які використовуються на практиці.
2. Охарактеризувати адіабатичне дроселювання
3. Дати оцінку дросель-ефекту
4. Проаналізувати процес детандрування

4. ШТУЧНЕ ОХОЛОДЖЕННЯ. ПРИНЦИП РОБОТИ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ

4.1 Основні терміни та визначення

Штучне охолодження – процес перенесення теплоти від тіла з низькою температурою до тіла з високою температурою, який здійснюється з витратою зовнішньої роботи. Цей процес здійснюється за допомогою холодильних установок.

Холодильна установка – комплекс обладнання, призначений для одержання та підтримки в охолоджених приміщеннях, тілах або речовинах температур, нижчих за температуру навколишнього середовища. Холодильна установка складається з однієї або декількох холодильних машин, а також допоміжного обладнання, такого як системи енерго-, водо- та теплопостачання, приладів керування та контролю, що забезпечують нормальну роботу машини.

Холодильна машина – пристрій для відведення теплоти від охолоджуваного тіла. Вони працюють за принципом *теплого насоса* – віднімають теплоту від тіла з витратою енергії (механічної, теплової, електричної тощо) передаючи її охолоджуваному середовищу (воді, повітрю, розсолам), що мають більш високу температуру, ніж охолоджуване тіло. Робота холодильної машини характеризується її холодопродуктивністю.

Кількість теплоти, що віднімається від охолоджуваного тіла називається **холодопродуктивністю** установки. Ця величина позначається Q_0 , вимірюється в одиницях енергії – Дж або кДж.

Кількість теплоти, що віднімається одним кілограмом холодоагенту від охолоджуваного тіла називається **питомою холодопродуктивністю** (q_0 , Дж/кг).

Холод з холодильної установки передається до споживача у вигляді зрідженого або стиснутого холодильного агенту (*безпосереднє охолодження*) або у вигляді охолодженого теплоносія (*охолодження теплоносієм*).

Робота холодильної машини заснована на тому, що робоче тіло або холодильний агент за рахунок витрати зовнішньої роботи здійснює зворотний коловий термодинамічний процес (холодильний цикл).

Холодильний цикл називається замкнутий процес послідовного стиснення та розширення пари, що супроводжується нагріванням та охолодженням.

Холодильним коефіцієнтом (ε в англійській літературі *COP*) називається відношення холодопродуктивності до витраченої енергії. Він характеризує ефективність холодильної машини і показує, яка кількість теплоти сприймається холодильним агентом від охолоджуваного середовища на одиницю витраченої роботи. Внаслідок нееквівалентності теплової та механічної енергії, величина холодильного коефіцієнта більша за одиницю.

Степінь термодинамічної досконалості циклу холодильної машини визначається *термічним ККД*, який дорівнює відношенню його холодильного коефіцієнта до холодильного коефіцієнта циклу Карно.

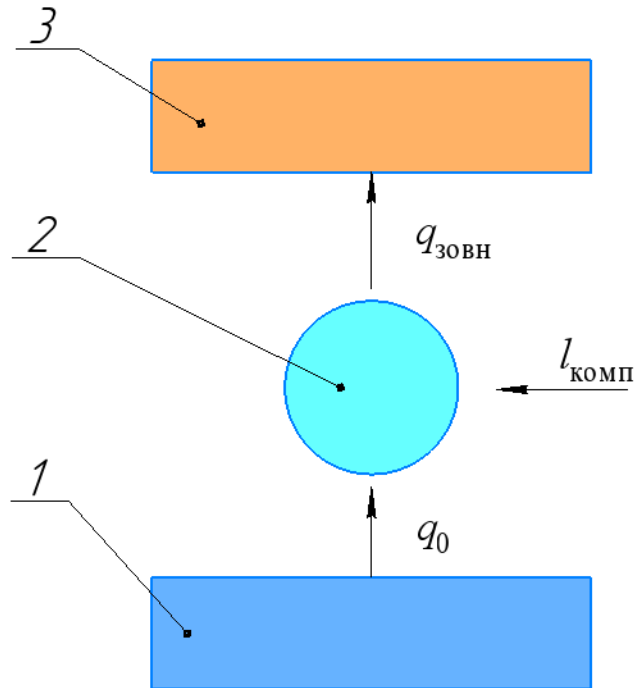
4.2 Загальний принцип роботи холодильної машини

Схематично принцип роботи холодильної машини показаний на рисунку 4.1.

Щоб перенести теплоту від тіла, що охолоджується 1, до тіла з більшою температурою 3 необхідно використовувати робоче тіло (холодоагент, холодоносіє) 2. Спочатку необхідно забезпечити, щоб температура тіла 2 була меншою за температуру тіла 1, тоді теплота буде самодовільною передаватися від тіла 1 до робочого тіла. Після цього, необхідно, за рахунок виконання зовнішньої роботи, збільшити температуру робочого тіла 2 так, щоб вона

перевищувала температуру тіла 3. Тоді кількість переданої до тіла 3 теплоти становитиме [3]:

$$q_{\text{зовн}} = l_{\text{комп}} + q_0 \quad (4.1)$$



1 – охолоджуване тіло; 2 – робоче тіло; 3 – тіло, якому передається теплота

Рисунок 4.1 – Принцип роботи холодильної машини

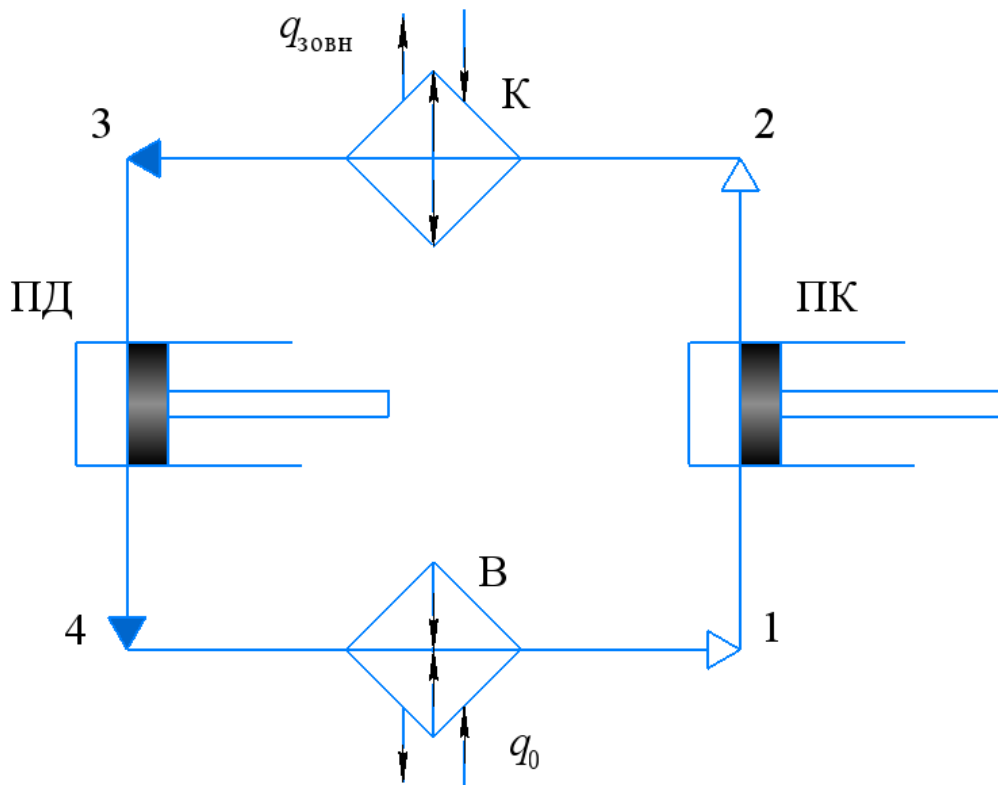
Таким чином, за рахунок виконання зовнішньої роботи здійснюється охолодження тіла 1.

4.3 Зворотний цикл Карно

Це ідеальний цикл холодильної машини, який слугує для оцінки роботи реальних холодильних машин. Схема циклу показана на рисунку 4.2, зображення процесів в координатах $T-s$ – діаграмі на рисунку 4.3.

Холодильний цикл Карно є оборотним і включає адіабатичне (ізоентропне через оборотний характер) стиснення (1-2), ізотермічне

вилучення теплоти (2-3), адіабатичне розширення (3-4) та адіабатичне додавання теплоти (4-1) [1].



ПК – поршневий компресор; В – випарник; ПД – поршневий детандер;
К – конденсатор

Рисунок 4.2 – Зворотний цикл Карно

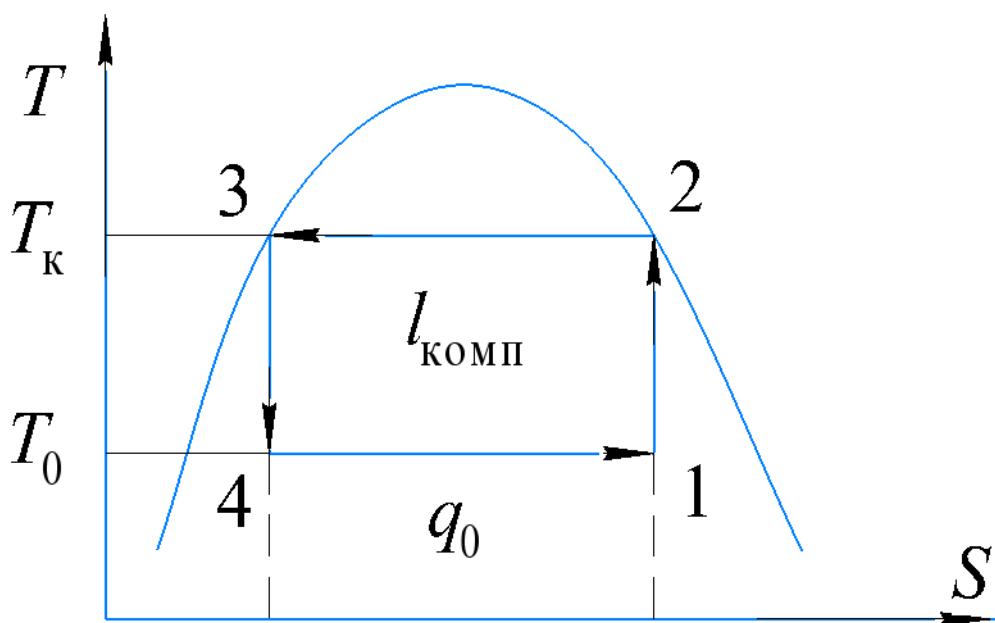


Рисунок 4.3 – Процеси в зворотному циклі Карно в T - s координатах

Розглянемо холодильний коефіцієнт цього циклу [1]:

$$\varepsilon_k = \frac{q_0}{l_s} \quad (4.2)$$

З рисунку 4.3, величини, що входять до складу рівняння (4.2), можна записати у вигляді:

$$\varepsilon_k = \frac{T_0 \cdot \Delta s}{(T_k - T_0) \cdot \Delta s} \quad (4.3)$$

Після скорочення на Δs отримуємо [1]:

$$\varepsilon_k = \frac{T_0}{(T_k - T_0)} \quad (4.4)$$

Аналізуючи зворотний цикл Карно можна зробити такі висновки [3]:

- 1) Холодильний коефіцієнт не залежить від типу холодоагенту, а залежить лише від температури кипіння та конденсації.
- 2) Холодопродуктивність, робота та холодильний коефіцієнт циклу Карно не залежать від конструкції холодильної машини.

Цикл Карно не можливо реалізувати, оскільки не можливо здійснити адіабатичні процеси розширення та стискання, також в циклі Карно ентропія не повинна змінюватися, що не можливо. Також, при розширенні рідини обов'язково виникають гідравлічні удари, що може пошкодити компресор [3].

Хоча цикл Карно є недосяжним ідеалом, він слугує як стандарт для порівняння та забезпечує зручний орієнтир до температур, які повинні бути підтримувані для досягнення максимальної ефективності в реальному холодильному циклі [3].

4.4 Робочі речовини холодильних машин

Холодоагентом є будь-яке тіло або речовина, яка діє як охолоджуючий засіб, поглинаючи теплоту з іншого тіла або речовини, яке повинно бути охолоджене. Первинними холодоагентами є ті, які використовуються безпосередньо в холодильних машинах, коли поперемінно випаровуються та

конденсуються, коли вони поглинають чи віддають теплоту відповідно. Вторинними холодоагентами є теплообмінні рідини або переносники теплоти. Пари холодоносіїв в абсорбційних системах – це аміак-вода та бромід літію-вода, тоді як пара (вода) використовується як холодоагент в ежекторних системах. Холодоагенти, що використовуються в парокompресійних холодильних системах більш різноманітні [1].

Першими холодоагентами були природні: вода, аміак, CO₂, SO₂ і таке інше. Швидке поширення охолодження в другій та третій чвертях ХХ-го століття відмічається новими холодоагентами, хлорфторвуглеводнями (ХФВ) та гідрофторхлорвуглеводнями (ГХФВ). Вони є галогенопохідними вуглеводнів, які містять один або більше з трьох галогенів – хлору, фтору та броду (рисунок 4.4). Ці холодоагенти характеризуються вигідними властивостями, порівняно з більшістю існуючих холодоагентів: не мають запаху, не горять, не вибухають, сумісні з більшістю конструкційних матеріалів, високий ККД, не токсичні [1].

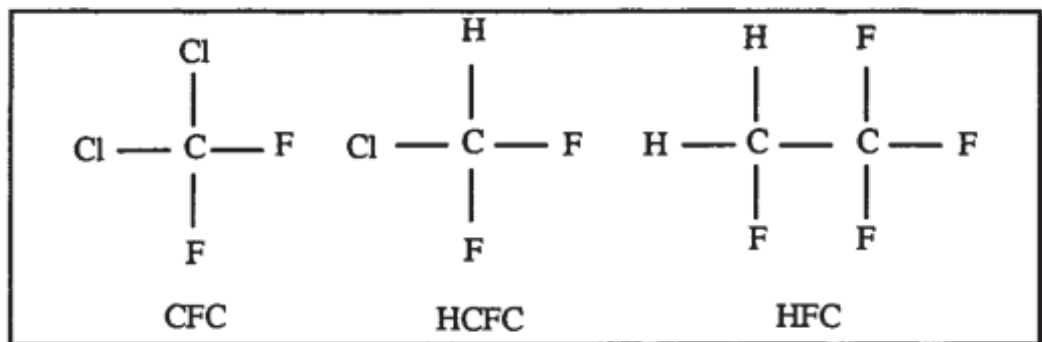


Рисунок 4.4 – Галогенопохідні холодоагенти

Для зручності, інженерним товариством ASHRAE, було запропоновано скорочені позначення холодоагентів літерою R та цифрами відповідно до певних правил. Наприклад, класифікація галогенопохідних холодоагентів отриманих з насичених вуглеводнів, що складається лише з однієї речовини ілюструється таким чином. Перша цифра після символу R означає кількість атомів карбону, зменшену на один. Якщо ця величина буде дорівнювати нулю, тобто для похідних метану, ця цифра опускається. Після цього цифрою

позначається кількість атомів гідрогену, збільшене на одиницю. Далі цифрою позначається число атомів фтору. Маленькою літерою позначається ізомер. Наприклад, позначення R12 відповідає сполуці CCl_2F_2 – дихлордифторметан (тут варто звернути увагу на те, що після символу R дві цифри, тобто кількість атомів карбону в сполуці - 1). Позначення R22 – сполуці CHClF_2 – хлордифторметан. Позначення R123 – сполуці CHCl_2CF_3 – дихлортрифторетан (в цьому випадку кількість атомів вуглецю 2 і перша цифра не опускається) [13].

Суміші позначаються відносними номерами холодоагентів та масовими пропорціями за таким принципом. Після символу R перша цифра позначає зеотропну чи азеотропну суміш, наступні дві цифри означають хронологічний номер, що позначає компоненти, але не вказує на концентрацію складових. Після цього ставиться велика літера, яка позначає склад, тобто концентрацію компонентів. Зеотропні суміші позначені ідентифікаційними номерами серії 400. Наприклад, R407A позначає суміш речовин R32, R125 та R134a у пропорції (20/40/40). R407B – суміш тих же компонентів у пропорції (10/70/20), а R407C – у пропорції (23/25/52). Азеотропні суміші зведені в серію 500. Наприклад R507 означає суміш R125/R143a у співвідношенні (50/50) [13].

Новий клас вуглеводнів ґрунтується на пропілені (пропені) R1270 $\text{CH}_3\text{CH}=\text{CH}_2$. Існує багато способів заміщення груп у карбоновому ланцюзі та це визначається двома літерами після цифри. Інші органічні компоненти зібрані в серії 600, де числа позначають порядковий номер, наприклад R600a – ізобутан. Неорганічні речовини зведені в серії 700. Ідентифікаційний номер формується додаванням відносної молекулярної маси компонента до 700. Наприклад, R717 відповідає аміаку, молекулярна маса якого 17 [13].

Аміак (R717) є одиничним природним холодоагентом, який екстенсивно використовується. Він важливий в промислових застосуваннях, через його чудові термодинамічні та фізичні властивості. Багато інженерів розглядають аміак як заміну галогенопохідних вуглеводнів для різних застосувань. Робиться значна робота над зменшенням витоків холодоагенту та

відповідними проблемами пов'язаними з витокami рідин з сильними запахами. Це підвищує інтерес в деяких країнах, зокрема в Європі [1].

Через динамічну тему холодоагентів, для кожного інженера буде викликом знайти найкраще рішення для кожного окремого випадку, але базові принципи однакові. Хороший холодоагент повинен бути [1]:

- Безпечним: нетоксичним, незаймистим та невибуховим.
- Безпечним для навколишнього середовища.
- Сумісний з матеріалами, що зазвичай використовуються в холодильній техніці: мастила, метали, еластомери тощо.
- Бажаними термодинамічними та теплофізичними властивостями є:
 - o Висока теплота пароутворення.
 - o Малий питомий об'єм пари.
 - o Малий ступінь стиснення.
 - o Мала в'язкість.
 - o Обґрунтовано низький тиск для робочих температур.
 - o Мала теплоємність рідини.
 - o Висока теплоємність пари.
 - o Висока теплопровідність та інші характеристики пов'язані з теплообміном.
 - o Обґрунтовано низька температура на виході з компресора.
 - o Легкість виявлення витоків.
 - o Висока діелектрична константа.
 - o Висока стабільність.

Для промислових застосувань, переваги аміаку (термодинамічні та економічні) переважають недоліки, які переважно пов'язані з низькою токсичністю та можливими проявами панічних настроїв через випадкові витоки, коли його використовують в міських регіонах. Галогенопохідні мають багато переваг (не токсичні, не вибухові, не мають запаху), але екологічні питання та дещо нижчі термодинамічні та теплофізичні властивості порівняно з аміаком чи вуглеводнями, а також зростаючі ціни дають шанси іншим

варіантам. На початок XXI століття, питання стоншення озонового шару не було вирішене. R22 ще використовувався, але зустрівся зі скороченням, та R134a розглядався як найкраща альтернатива хлорфторвуглеводням та гідрохлорфторвуглеводням, маючи аналогічні характеристики до вже забороненого R12. Дуже часто, рідина, що охолоджується, може бути використана як холодоагент в хімічній промисловості. Використання вторинних холодоагентів в поєднанні з аміачним центральним холодильним модулем стає життєздатною альтернативою в багатьох застосуваннях [1].

Вторинні холодоагенти (антифризи та розсоли) – це переважно рідини, що використовуються для перенесення теплової енергії від віддаленого джерела теплоти (теплообмінник процесу) до випарника холодильної системи. Антифризи або розсоли в загальному випадку не змінюють стан в процесі, але є декілька прикладів, коли деякі вторинні холодоагенти або самі змінюють стан, або лише частинки, що несуться в них [1].

Контрольні запитання

1. Пояснити основну термінологію в холодильній техніці.
2. Проаналізувати загальний принцип роботи холодильної машини
3. Дати оцінку зворотному циклу Карно
4. Проаналізувати класифікацію холодоагентів за ASHRAE
5. Проаналізувати вимоги до холодоагентів

5. ПОМІРНЕ ОХОЛОДЖЕННЯ. ПАРОКОМПРЕСІЙНІ ХОЛОДИЛЬНІ МАШИНИ

5.1 Класифікація холодильних машин

Класифікація холодильних машин може здійснюватися за багатьма параметрами.

Залежно від виду фізичного процесу, внаслідок якого отримують холод, холодильні машин поділяються на [3]:

1. Такі, що використовують фазовий перехід робочого тіла з рідкого в газоподібний стан. До них належать парокомпресійні, ежекторні та абсорбційні холодильні машини.

2. Такі, що використовують процеси розширення повітря з виконанням зовнішньої роботи, а саме повітряно-детандерні машини.

3. Такі, що використовують процеси розширення повітря без виконання зовнішньої роботи, або повітряно-вихорові машини.

4. Такі, що використовують ефект Пельтьє, або термоелектричні холодильні машини.

Залежно від виду енергії, яка споживається, холодильні машини поділяються на [3]:

1. Такі, що використовують механічну енергію. До них належать компресійні машини.

2. Тепловикористовуючі, а саме абсорбційні, компресійні з приводом від турбіни та ежекторні холодильні машини.

3. Такі, що використовують безпосередньо електричну енергію (термоелектричні).

Залежно від холодопродуктивності [3]:

1. Малі – до 12 кВт.
2. Середні – від 12 до 120 кВт.
3. Великі – понад 120 кВт.

Залежно від температурного рівня, з якого відбувається відведення теплоти [3]:

1. Низькотемпературні – до -30°C .
2. Середньотемпературні – від -30°C до -10°C .
3. Високотемпературні – від -10°C до $+20^{\circ}\text{C}$.

Залежно від схеми та виду термодинамічного циклу, розрізняють одно-, дво-, багатостадійні та каскадні холодильні машини [3].

Залежно від використовуваного робочого тіла холодильні машини можуть бути аміачні, фреонові, пароводяні, водо-аміачні, бромисто-літєві тощо [3].

Переважає більшість холодильних машин є парокompресійними, які залежно від типу використовуваного компресора поділяють на поршневі, ротаційні (пластинчасті та з ротором, що котиться), гвинтові та відцентрові.

5.2 Цикли та схеми одноступінчастих холодильних машин

Найпростішою холодильною машиною, яка може бути реалізована на практиці є *холодильна машина з дроселюванням в області вологої пари і всмоктуванням перегрітої або сухої пари*. Схема такої машини показана на рисунку 5.1, процеси в $T-s$ та $P-h$ діаграмах показані на рисунках 5.2 та 5.3 [5].

Така машина працює таким чином. При всмоктуванні сухої пари, суха насичена пара стану 1 всмоктується в компресор ПК, де стискується до стану 2. Далі утворена перегріта пара охолоджується і конденсується в конденсаторі К, після чого насичена рідина стану 3 адіабатично дроселюється до стану вологої пари 4. Після дроселя паро-рідинна суміш направляється до конденсатора, де випаровується до стану сухої насиченої пари 1, відбираючи теплоту від охолоджуваного середовища, і цикл повторюється. При всмоктуванні вологої пари процеси протікають аналогічно, однак у компресор всмоктується перегріта пара стану 6, яка стискується до стану 7, а в конденсаторі відбувається кипіння та перегрівання пари до стану 6 [5].

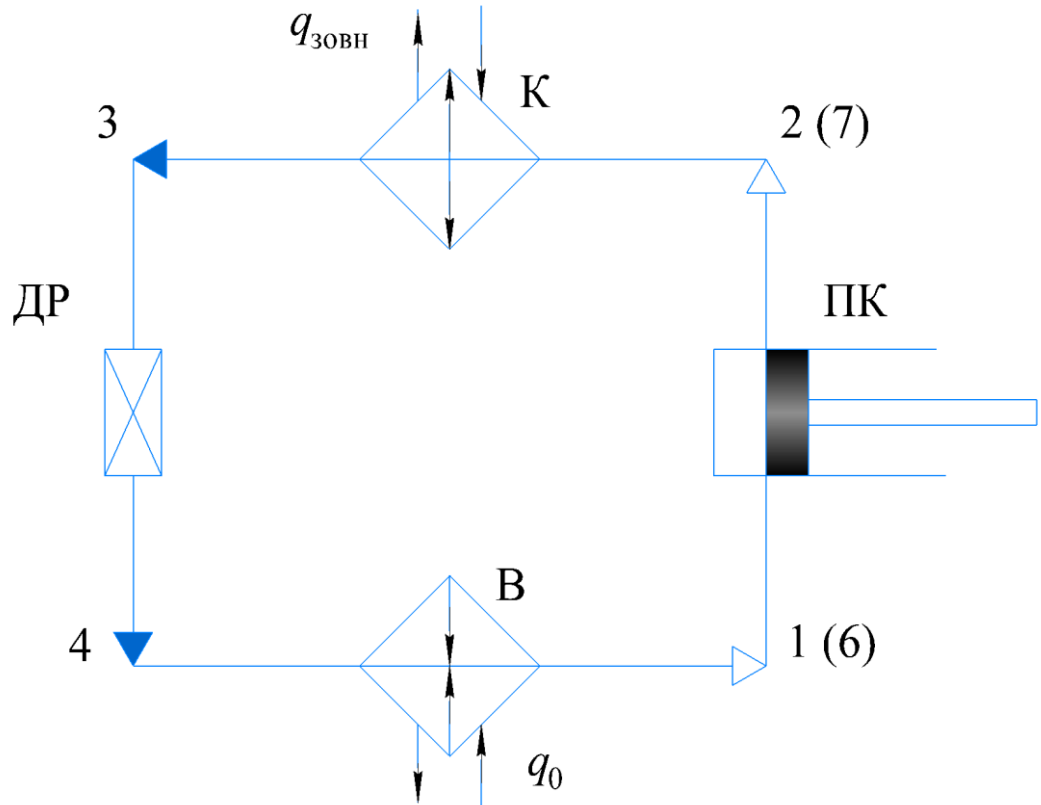


Рисунок 5.1 – Схема парової одноступінчастої холодильної машини з дроселюванням в області вологої пари і всмоктуванням перегрітої пари

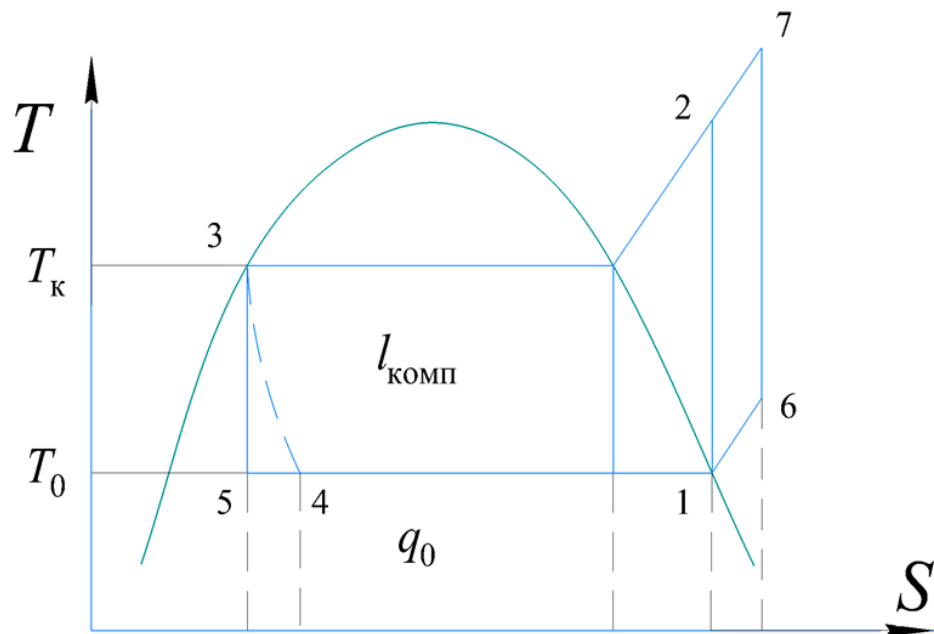


Рисунок 5.2 – $T-s$ – діаграма парової одноступінчастої холодильної машини з дроселюванням в області вологої пари і всмоктуванням перегрітої пари

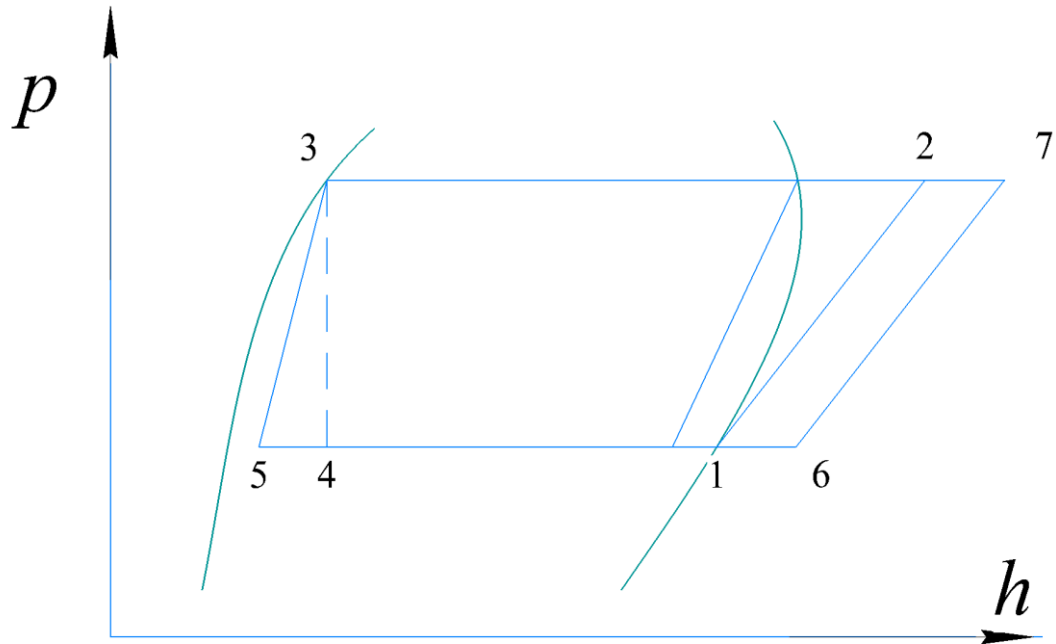


Рисунок 5.3 – $P-h$ – діаграма парової одноступінчастої холодильної машини з дроселюванням в області вологої пари і всмоктуванням перегрітої пари

Заміна детандрування на дроселювання, порівняно з циклом Карно веде до зменшення холодопродуктивності циклу на величину площі під лінією 4-5 на рисунку 5.2. Перехід до стискання сухої насиченої пари веде до збільшення роботи компресора, що також може бути виражене через площу на діаграмі. Тому холодильний коефіцієнт реального циклу буде меншим за холодильний коефіцієнт циклу Карно [5].

Збільшити холодопродуктивність циклу можна шляхом перехолодження рідини перед дроселюванням. Схема такого циклу показана на рисунку 5.4, зображення циклу в $T-s$ та $P-h$ діаграмах показані на рисунках 5.5 та 5.6 [5].

Порівняно з попередньою холодильною машиною (рисунок 5.1), в схему цієї холодильної машини включений теплообмінник для охолодження робочої речовини перед дросельним вентиляем. В цій системі, рідина після конденсатора К охолоджується в теплообміннику ТО водою. При цьому може використовуватися як вода зі свердловин, так і оборотна вода.

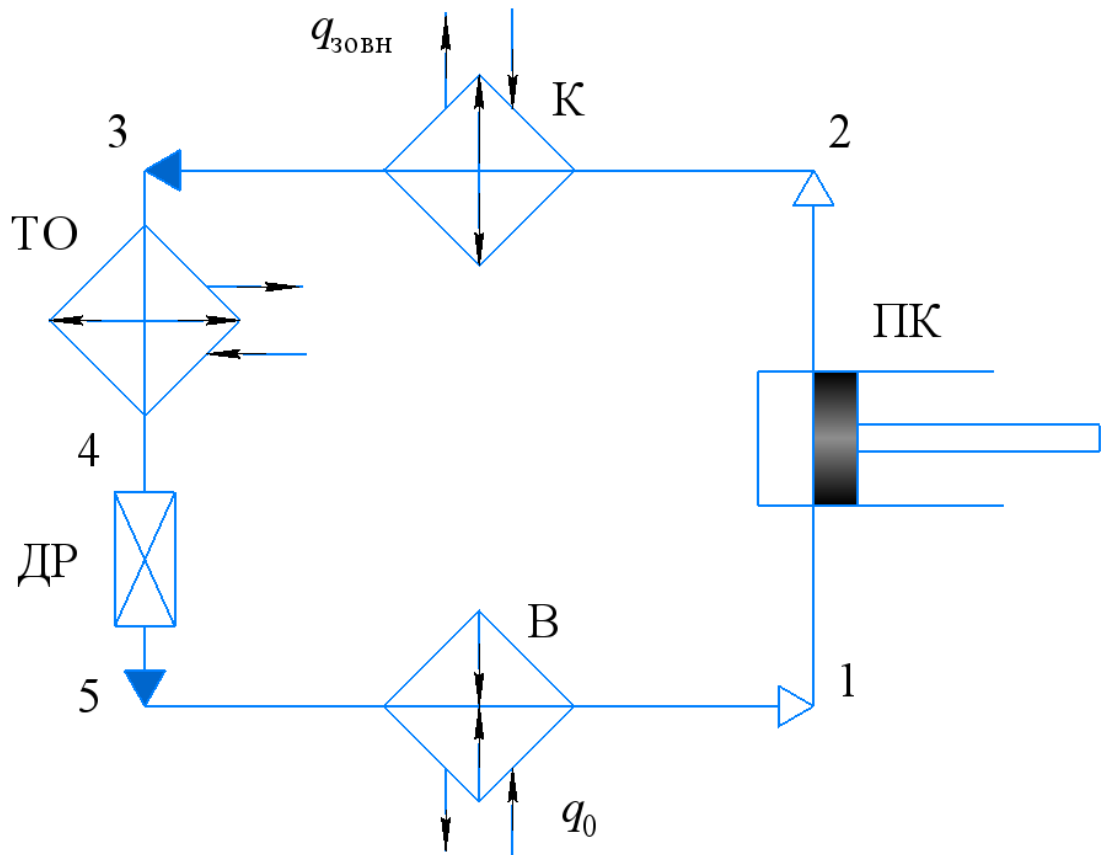


Рисунок 5.4 – Схема парової одноступінчастої холодильної машини з переохолодженням робочої речовини

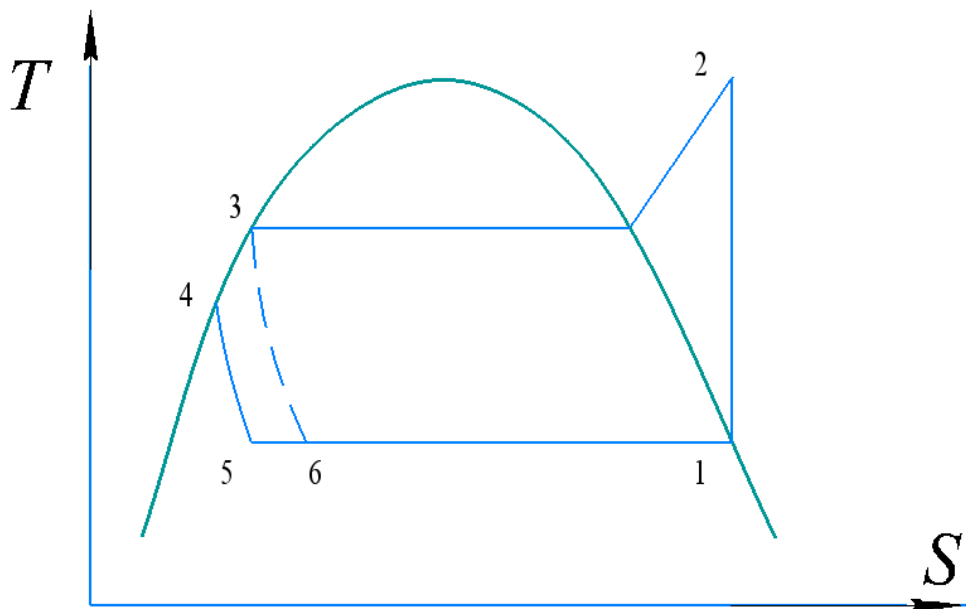


Рисунок 5.5 – $T-s$ – діаграма парової одноступінчастої холодильної машини з переохолодженням робочої речовини

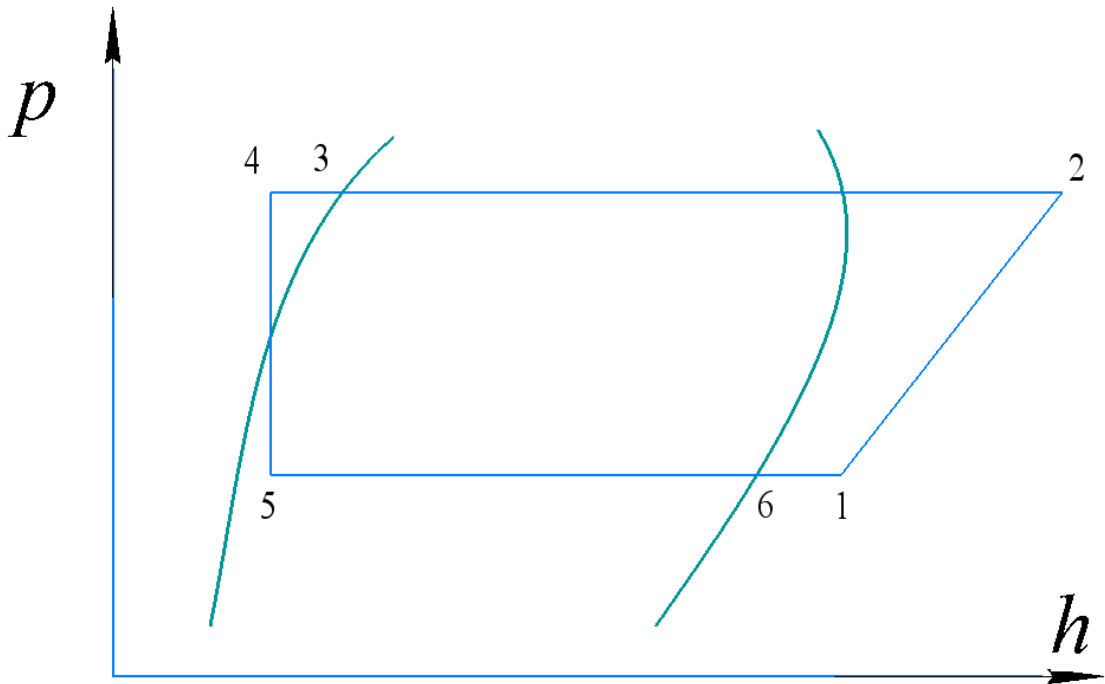


Рисунок 5.6 – $P-h$ – діаграма одноступінчастої холодильної машини з переохолодженням робочої речовини

З рисунку 5.6 видно, що при охолодженні робочої речовини перед дросельним вентиляем, питома холодопродуктивність циклу збільшується на площу під лінією 5-6. Оскільки робота циклу при цьому не змінюється, то холодильний коефіцієнт в такому випадку теж зростає. Необоротні втрати, пов'язані з відведенням теплоти від робочої речовини в теплообміннику відносно невеликі і в практичних розрахунках їх можна не враховувати [5].

Недоліком цього циклу є додаткове споживання води. Проте охолодження робочої речовини перед дросельним вентиляем можна здійснити за рахунок холодної пари, що йде з випарника, тобто застосувати регенерацію. Схема і цикли такої регенеративної холодильної машини показані на рисунках 5.7 – 5.9 [5].

В цій схемі холодна пара робочої речовини з випарника в стані 6 направляєється в теплообмінник, де вона нагрівається (процес 6-1) за рахунок теплоти робочої речовини, що виходить з конденсатора (процес 3-4) [5].

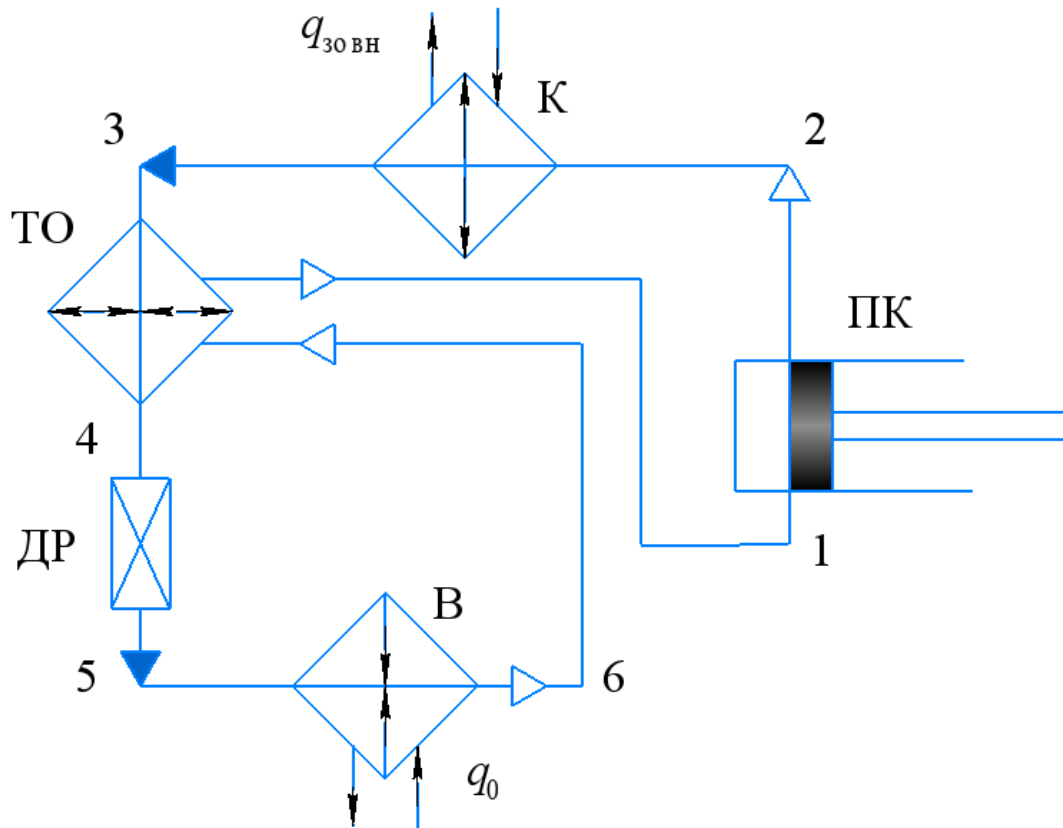


Рисунок 5.7 – Схема парової одноступінчастої холодильної машини з регенерацією

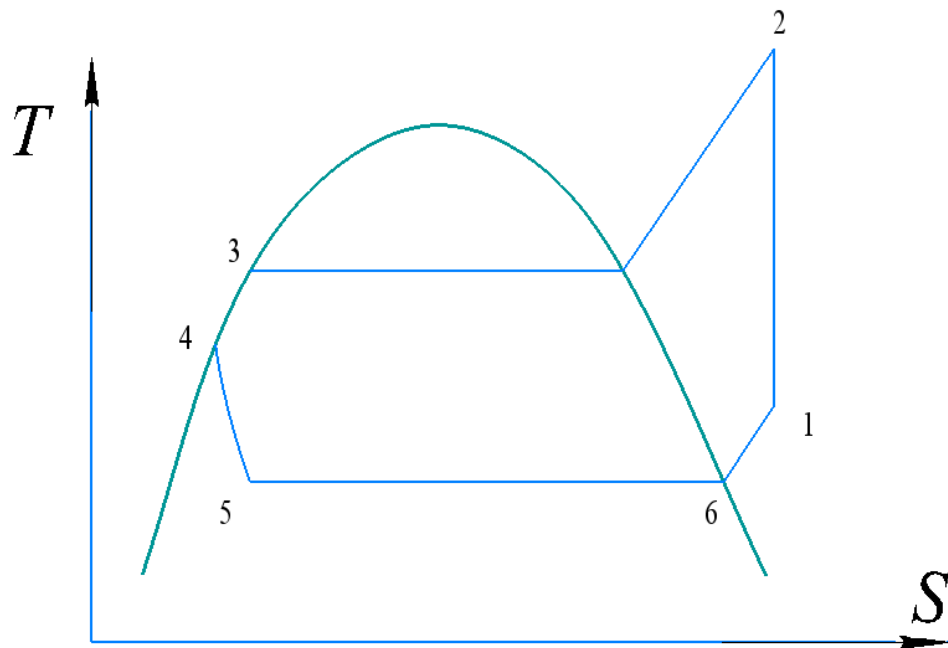


Рисунок 5.8 – $T-s$ – діаграма парової одноступінчастої холодильної машини з регенерацією

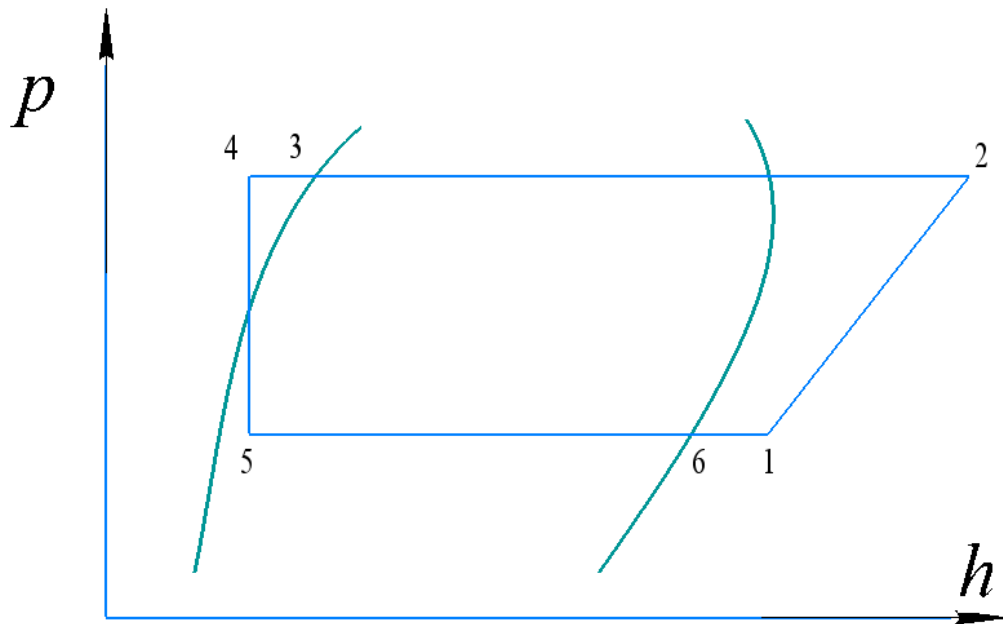


Рисунок 5.9 – $P-h$ – діаграма парової одноступінчастої холодильної машини з регенерацією

У результаті регенерації питома холодопродуктивність збільшується, але одночасно збільшується і робота компресора. Ефективність цього методу залежить від співвідношення цих параметрів, які в свою чергу залежать від властивостей робочих речовин. Тому регенеративний цикл доцільно застосовувати для робочих речовин, з відносно великими втратами, пов'язаними з дроселюванням, і відносно малими втратами, пов'язаними з перегріванням. Такими робочими речовинами є більшість фреонів. Для робочих речовин з відносно великими втратами від перегрівання, наприклад для аміаку, застосовують схему з водяним теплообмінником (рисунок 5.4) [5].

Більшість фреонів має високу взаємну розчинність з мастилом компресора, тому для фреонових холодильних машин з поршневыми компресорами перегрівання пари перед всмоктуванням його в компресор має особливе значення. При цьому відбувається повне відокремлення мастила, внаслідок чого енергетичні та об'ємні коефіцієнти компресора покращуються [5].

За відсутності перегрівання робочої речовини перед всмоктуванням в компресор потрапляють краплини мастила, що містять розчинену в них робочу речовину і краплини рідкої робочої речовини. У процесі зворотного розширення в компресорі відбувається виділення робочої речовини, що з краплин мастила і зменшення корисного об'єму всмоктування. Краплини рідкої робочої речовини, що виходять з випарника, зменшують холодопродуктивність машини і можуть призвести до гідравлічного удару, тому регенеративний теплообмінник служить ще й захистом компресора холодильної машини від гідравлічного удару. Крім того, потрапляння краплин мастила і рідкої робочої речовини сприяють інтенсифікації теплообміну між парою та стінками циліндра компресора і призводять до додаткових втрат [5].

Отже, застосування регенерації з перегріванням робочої речовини перед її всмоктуванням, для фреонових холодильних машин з поршневыми компресорами пояснюється не лише термодинамічними, але й експлуатаційними перевагами [5].

Контрольні запитання

1. Пояснити класифікацію холодильних машин
2. Проаналізувати роботу парової одноступінчастої холодильної машини з дроселюванням в області вологої пари і всмоктуванням перегрітої пари.
3. Проаналізувати роботу парової одноступінчастої холодильної машини з переохолодженням робочої речовини
4. Проаналізувати роботу парової одноступінчастої холодильної машини з регенерацією

6. ЦИКЛИ І ПРИНЦИПОВІ СХЕМИ БАГАТОСТУПІНЧАСТИХ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН

6.1 Причини переходу до багатоступінчастого стиснення

При зниженні температури кипіння чи підвищенні температури конденсації робочої рідини підвищується ступінь стиснення в компресорі та різниця тисків. Це призводить до погіршення об'ємних та енергетичних коефіцієнтів компресорів, що збільшує капітальні та експлуатаційні затрати на отримання штучного холоду при використанні одноступінчастих холодильних машин [1, 5].

Збільшення ступеня підвищення тиску в компресорі призводить до зростання температури нагнітання, що може викликати недопустимі температурні деформації, пригорання мастила в нагнітальних клапанах компресора. Може виникнути і вкрай небезпечний випадок – самозаймання мастила. Зі зростанням ступеню підвищення тиску зменшується питома холодопродуктивність циклу, а також зростають необоротні втрати при дроселюванні, та втрати, пов'язані з відведенням теплоти перегрівання робочої речовини [1, 5].

Всі наведені фактори є причинами, через які, при значеннях ступеню підвищення тиску 8 і більше, необхідно переходити до багатоступінчастого стиснення. Проте, це відношення не є строго постійним і залежить від конкретних умов: робочої речовини, типу компресора й апаратів, від температури зовнішніх джерел [1, 5].

6.2 Вибір проміжного тиску

В циклах двоступінчастих холодильних машин проміжний тиск p_m впливає на їх економічність. Існує декілька способів вибору p_m [2]:

- з умови максимального теоретичного або дійсного холодильного коефіцієнта;
- з умови мінімальної сумарної роботи компресора;
- з умови заданого відношення питомих об'ємних продуктивностей компресорів.

Існують і інші способи визначення проміжного тиску.

6.2.1 Вибір проміжного тиску з умови мінімальної сумарної роботи компресора

Розглянемо вибір проміжного тиску на прикладі двоступінчастих холодильних машин.

Для визначення мінімальної роботи компресора необхідно отримати залежність роботи компресорів від проміжного тиску $l_s = f(P_m)$. Тоді можна буде знайти мінімум функції розв'язавши рівняння [2]:

$$\frac{dl_s}{dP_m} = 0 \quad (6.1)$$

Ізотропна робота компресора може бути виражена як різниця ентальпій до і після стиснення, однак, в цьому випадку, не отримується явна залежність роботи від тиску.

При адіабатичному стисненні ізотропна робота компресора може бути виражена у формі [2]:

$$l_{\text{компр}} = P_1 v \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (6.2)$$

де k – показник адіабати. Ця величина наводиться в довідковій літературі, наприклад в [11].

Використовуючи рівняння (6.2) для двостадійного стиснення (рисунок 6.1), можна записати сумарну роботу компресора [2]:

$$l_s = l_{s_1}^I + l_{s_2}^{II} = P_0 v_{yc}^I \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P_m}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] + P_m v_{yc}^{II} \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P_k}{P_m} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (6.3)$$

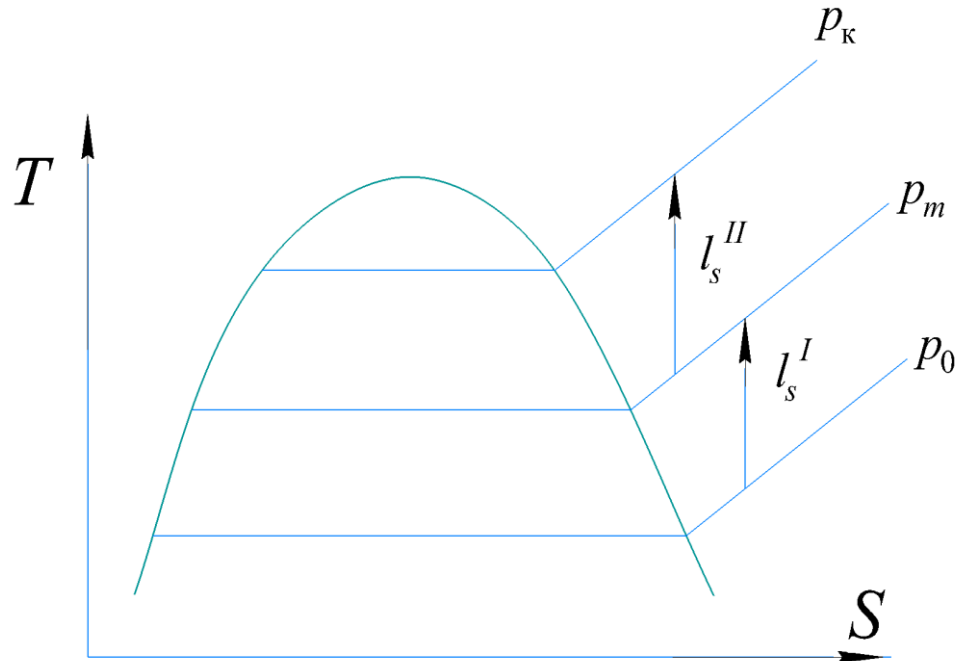


Рисунок 6.1 – До визначення проміжного тиску з умови мінімальної сумарної роботи компресорів

Введемо припущення [2]:

1) температура всмоктування в обидва ступені компресора однакова і дорівнює T_m ;

2) робоча речовина підлягає дії законів для ідеального газу.

В такому разі можна записати [2]:

$$P_0 v_{yc}^I = P_m v_{yc}^{II} = RT_m \quad (6.4)$$

Тоді рівняння (6.3) можна переписати у вигляді [2]:

$$l_s = RT_m \left(\frac{k}{k-1} \right) \left[\left(\frac{P_m}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} + \left(\frac{P_k}{P_m} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 2 \right] \quad (6.5)$$

Розглянемо окремо вирази для ступенів стиснення. Вони можуть бути перетворені в такому вигляді [2]:

$$\left(\frac{P_m}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}} = P_m^{\frac{k-1}{k}} \frac{1}{P_0^{\frac{k-1}{k}}} = P_m^{\frac{k-1}{k}} P_0^{\frac{1-k}{k}} \quad (6.6)$$

$$\left(\frac{P_\kappa}{P_m}\right)^{\frac{k-1}{k}} = P_\kappa^{\frac{k-1}{k}} \frac{1}{P_m^{\frac{k-1}{k}}} = P_\kappa^{\frac{k-1}{k}} P_m^{\frac{1-k}{k}} \quad (6.7)$$

З урахуванням цього, рівняння (6.5) можна записати у вигляді [2]:

$$l_s = RT_m \left(\frac{k}{k-1}\right) \left[P_m^{\frac{k-1}{k}} P_0^{\frac{1-k}{k}} + P_\kappa^{\frac{k-1}{k}} P_m^{\frac{1-k}{k}} - 2 \right] \quad (6.8)$$

Знайдемо похідні [2]:

$$\left(\frac{P_m^{\frac{k-1}{k}} P_0^{\frac{1-k}{k}}}{P_m}\right)' = P_0^{\frac{k-1}{k}} \frac{k-1}{k} P_m^{\frac{k-1}{k}-1} = P_0^{\frac{k-1}{k}} \frac{k-1}{k} P_m^{\frac{k-1}{k} - \frac{k}{k}} = P_0^{\frac{k-1}{k}} \frac{k-1}{k} P_m^{\frac{-1}{k}} \quad (6.9)$$

$$\left(\frac{P_\kappa^{\frac{k-1}{k}} P_m^{\frac{1-k}{k}}}{P_m}\right)' = P_\kappa^{\frac{k-1}{k}} \frac{1-k}{k} P_m^{\frac{1-k}{k}-1} = P_\kappa^{\frac{k-1}{k}} \frac{1-k}{k} P_m^{\frac{1-k}{k} - \frac{k}{k}} = P_\kappa^{\frac{k-1}{k}} \frac{1-k}{k} P_m^{\frac{1-2k}{k}} \quad (6.10)$$

Тоді можна записати [2]:

$$\frac{dl_s}{dP_m} = RT_m \left(\frac{k}{k-1}\right) \left[P_0^{\frac{1-k}{k}} P_m^{\frac{-1}{k}} \left(\frac{k-1}{k}\right) + P_\kappa^{\frac{k-1}{k}} P_m^{\frac{1-2k}{k}} \left(\frac{1-k}{k}\right) \right] = 0 \quad (6.11)$$

Оскільки газова стала, проміжна температура та показник адіабати не можуть дорівнювати нулю, то [2]:

$$P_0^{\frac{1-k}{k}} P_m^{\frac{-1}{k}} \left(\frac{k-1}{k}\right) + P_\kappa^{\frac{k-1}{k}} P_m^{\frac{1-2k}{k}} \left(\frac{1-k}{k}\right) = 0 \quad (6.12)$$

Виконаємо перетворення [2]:

$$P_0^{\frac{1-k}{k}} P_m^{\frac{-1}{k}} = P_\kappa^{\frac{k-1}{k}} P_m^{\frac{1-2k}{k}} \quad (6.13)$$

$$\frac{P_0^{\frac{1-k}{k}}}{P_\kappa^{\frac{k-1}{k}}} = \frac{P_m^{\frac{1-2k}{k}}}{P_m^{\frac{-1}{k}}} = P_m^{\frac{1-2k}{k} - \frac{-1}{k}} = P_m^{2\left(\frac{1-k}{k}\right)} \quad (6.14)$$

звідки [2]:

$$P_0^{\frac{1-k}{k}} P_\kappa^{\frac{1-k}{k}} = P_m^{2\left(\frac{1-k}{k}\right)} \quad (6.15)$$

або

$$P_0 P_k = P_m^2 \quad (6.16)$$

З цього рівняння отримуємо [2]:

$$P_m = \sqrt{P_0 \cdot P_k} \quad (6.17)$$

Рівняння (6.17) широко використовується для визначення проміжного тиску.

З аналогічних міркувань можна отримати вираз для випадку трьохступінчастого стиснення (рисунок 6.2) [2].

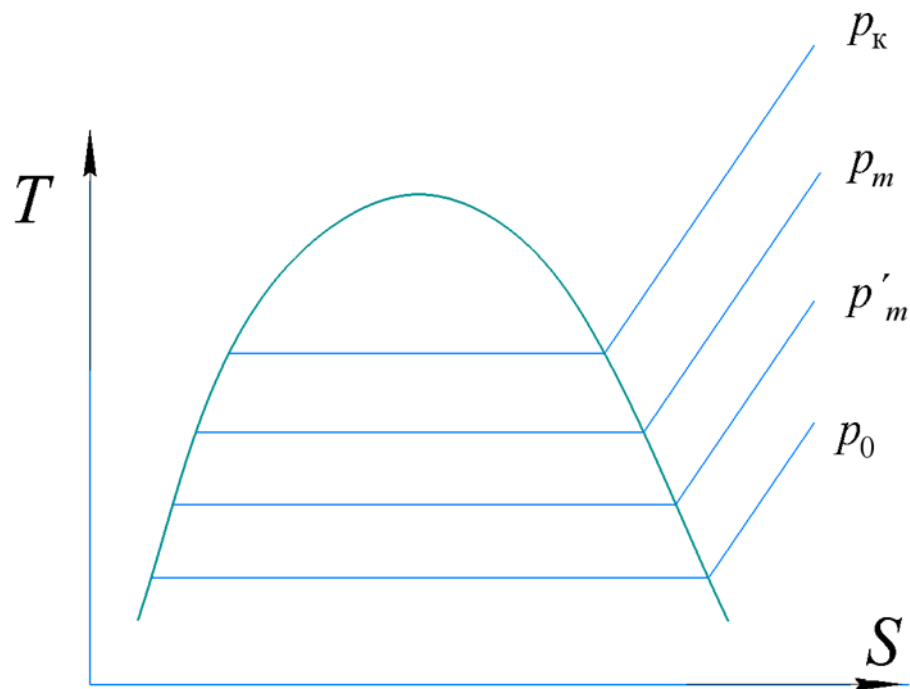


Рисунок 6.2 – До визначення проміжних тисків при трьохступінчастому стисненні

В такому разі сумарна робота буде дорівнювати [2]:

$$l_s = l_{s_1}^I + l_{s_2}^{II} + l_{s_2}^{III} \quad (6.18)$$

Шляхом диференціювання сумарної роботи по проміжних тисках і знаходження екстремуму функції двох змінних можна знайти [2]:

$$\frac{P_k}{P_m} = \frac{P_m}{P'_m} = \frac{P'}{P_0} \quad (6.19)$$

Звідки [2]:

$$P_m = \sqrt[3]{P_k^2 \cdot P_0} \quad (6.20)$$

$$P'_m = \sqrt[3]{P_k \cdot P_0^2} \quad (6.21)$$

Визначений в такий спосіб проміжний тиск також називають оптимальним проміжним тиском [1, 5].

6.2.2 Вибір проміжного тиску з умови максимального теоретичного холодильного коефіцієнта

Такий метод визначення проміжного тиску є більш точним. При цьому задаються значеннями проміжного тиску та розраховують значення теоретичного холодильного коефіцієнту для кожного значення [2].

При цьому необхідно знати тиск кипіння та тиск конденсації та величину перегріву на всмоктуванні. Користуючись $T-s$ чи $P-h$ діаграмою можна знайти значення термодинамічних параметрів холодоагентам у основних вузлових точках, наприклад, як показано на рисунку 6.3.

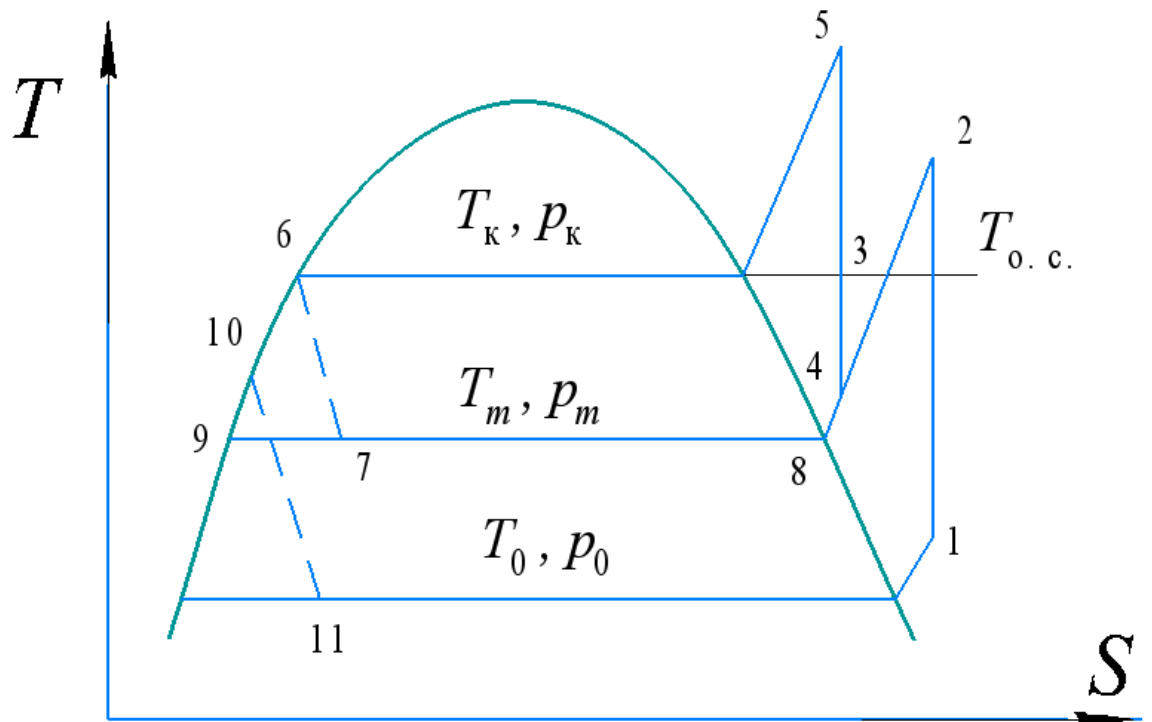


Рисунок 6.3 – Визначення термодинамічних параметрів у вузлових точках циклу двоступінчастої холодильної машини

Далі, залежно від особливостей циклу холодильної машини можна знайти значення холодопродуктивності та сумарну роботу компресорів і, відповідно, знайти теоретичний холодильний коефіцієнт. Далі така процедура повторюється і отримується таблична залежність $\varepsilon_T = f(P_m)$, яка може бути представлена у вигляді графіку (рисунок 6.4) [2].

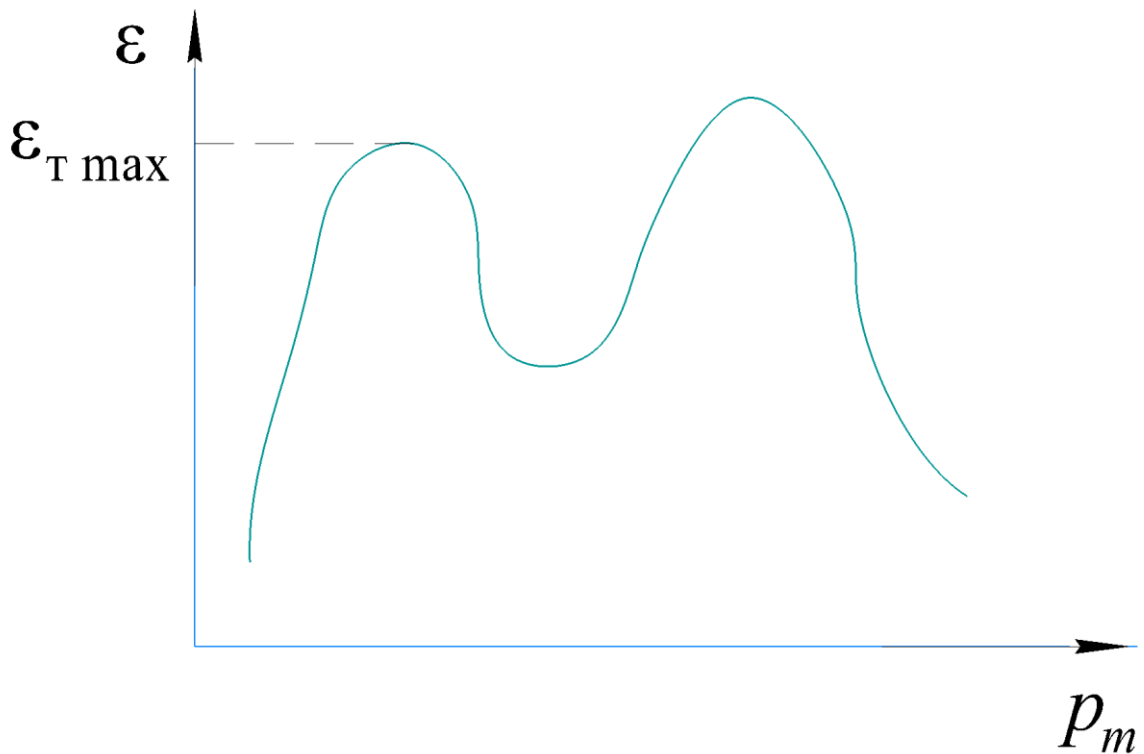


Рисунок 6.4 – Визначення максимального значення теоретичного холодильного коефіцієнта

Після того, як знайдено максимальне значення холодильного коефіцієнту, необхідно перевірити значення ступеня стиснення в компресорі [2]:

$$\frac{P_k}{P_{m,i}} \approx \frac{P_{m,i}}{P_0} \leq 8 \quad (6.22)$$

Якщо ця умова не виконується, то переходять до розгляду наступного максимуму на графіку (рисунок 6.4) [2].

6.3 Цикли та схеми двоступінчастих холодильних машин

6.3.1 Цикли та схеми двоступінчастих холодильних машин з однократним дроселюванням

Прикладом таких машин є двоступінчаста холодильна машина зі змійовиковою проміжною посудиною і неповним проміжним охолодженням. Принципова схема такої машини показана на рисунку 6.5, цикли в теплових діаграмах показані на рисунках 6.6 та 6.7 [5].

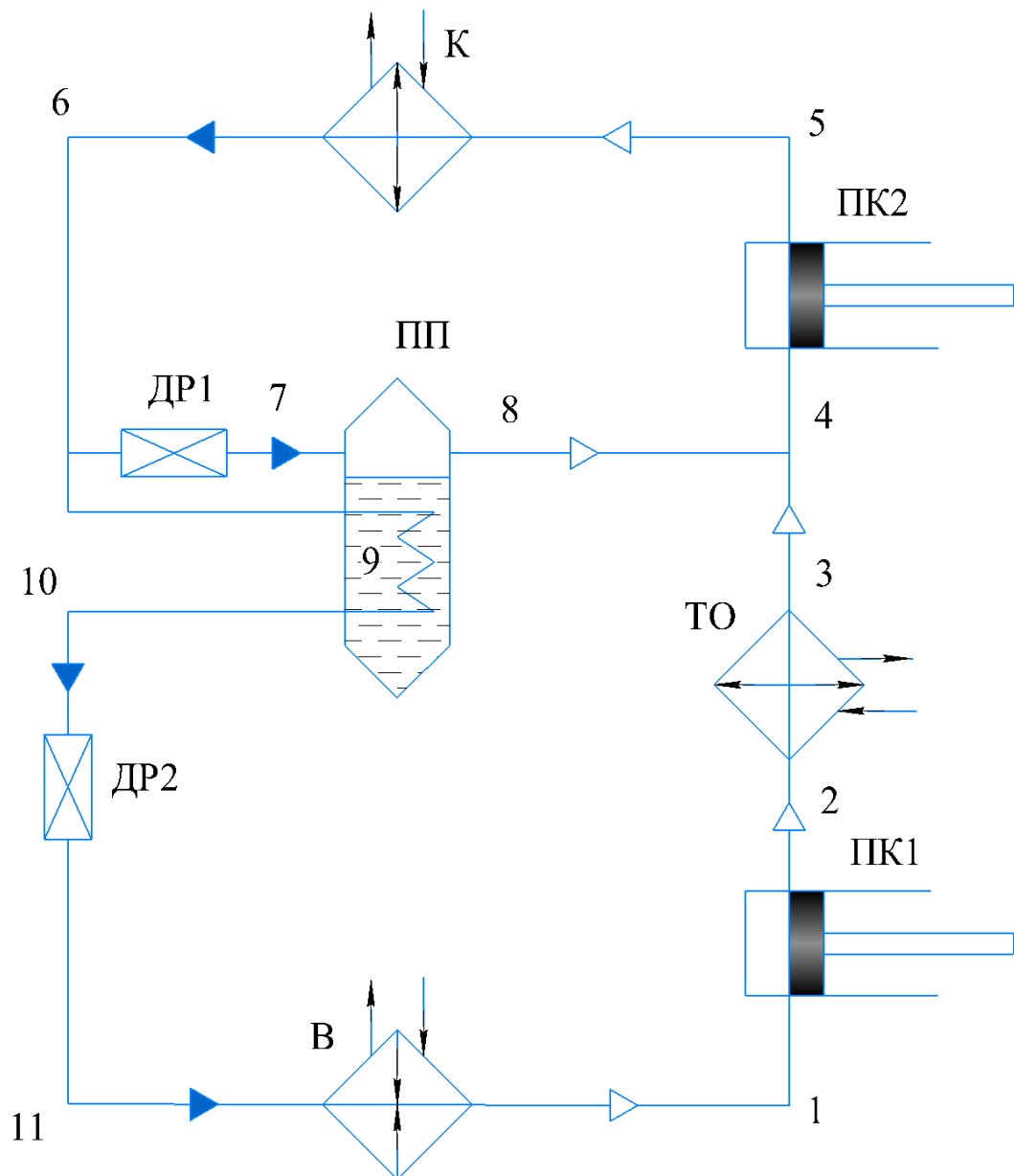


Рисунок 6.5 – Схема двоступінчастої холодильної машини зі змійовиковою посудиною і неповним проміжним охолодженням

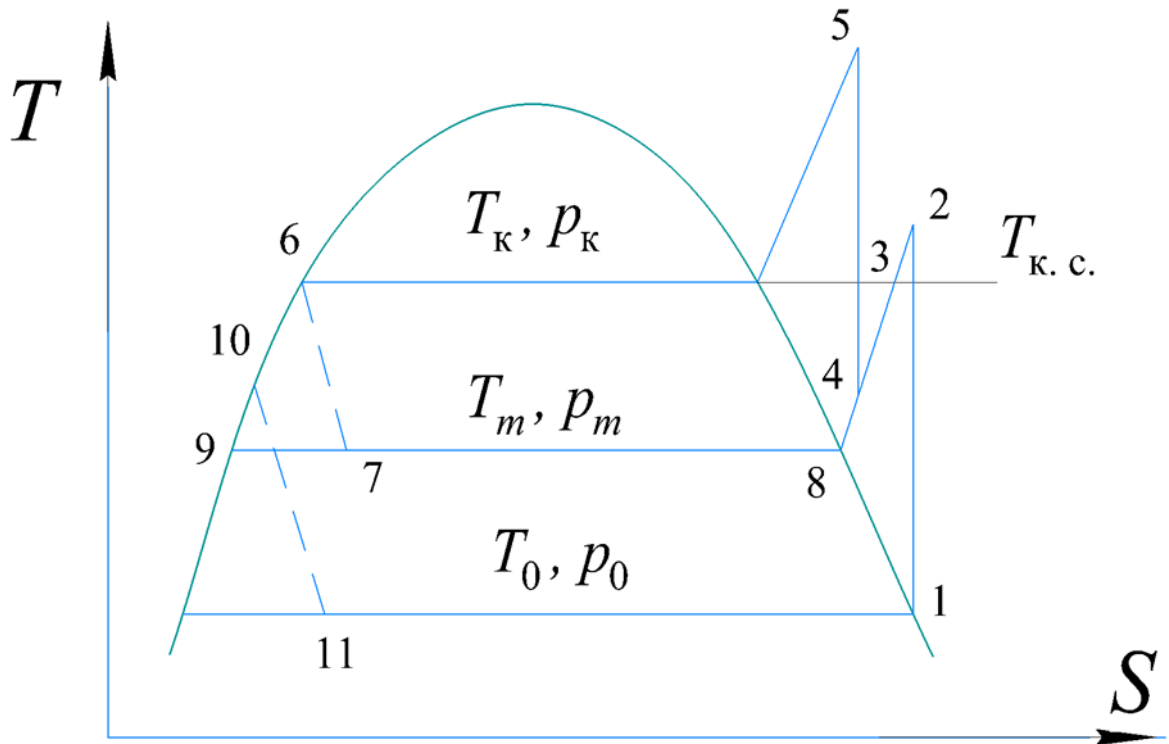


Рисунок 6.6 – $T-s$ – діаграма двоступінчастої холодильної машини зі зміювикою посудиною і неповним проміжним охолодженням

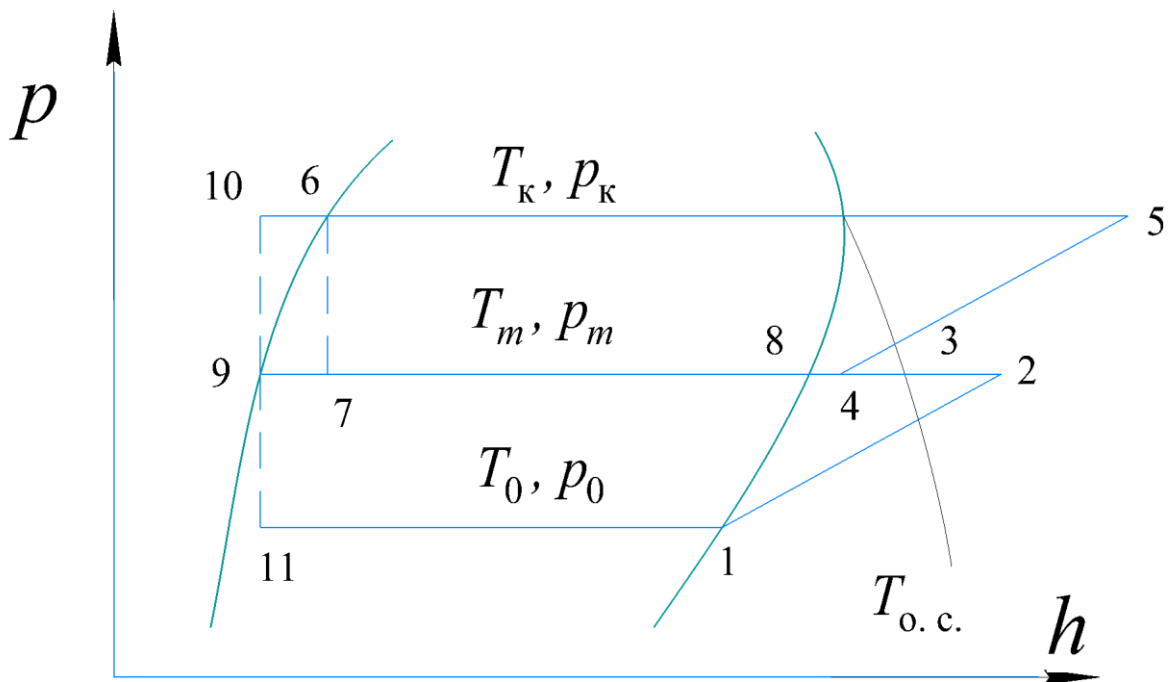


Рисунок 6.7 – $P-h$ – діаграма двоступінчастої холодильної машини зі зміювикою посудиною і неповним проміжним охолодженням

Робоча речовина кипить у випарнику В (процес 1-11) стикується в компресорі першого ступеня ПК1 (процес 1-2), охолоджується в проміжному теплообміннику ТО (процес 2-3), після чого пара робочої речовини в стані 3 змішується з холодною парою стану 8, що надходить з проміжної посудини ПП. Після змішування стан робочої речовини перед всмоктуванням в компресор другого ступеня ПК2 визначається точкою 4. Далі робоча речовина стискається в компресорі другого ступеня (процес 4-5), охолоджується та конденсується в конденсаторі К (процес 5-6) і направляється до проміжної посудини [5].

Перед проміжною посудиною робоча речовина розділяється на два потоки: більша частина робочої речовини іде в змійовик проміжної посудини, менша – дроселюється в допоміжному дросельному вентилі ДР1 (процес 6-7) до проміжного тиску і поступає в проміжну посудину. У проміжній посудині, за рахунок різниці густин рідини та пари, відбувається розділення вологої пари (стану 7) на рідину (стан 9) та суху насичену пару (стан 8). Суха насичена пара засмоктується компресором другого ступеня, а рідина кипить (процес 9-8) за рахунок теплоти, що відбирається від рідкої робочої речовини, що тече по змійовику. Суха насичена пара, що утворюється при кипінні в процесі 9-8, відсмоктується компресором другого ступеня. Рідка робоча речовина, що йде по змійовику при цьому охолоджується (процес 6-10) і далі дроселюється до тиску кипіння P_0 . Після дроселювання робоча речовина поступає у випарник, де кипить за тиску P_0 та температури T_0 [5].

Схема та цикли холодильної машини зі змійовиковою проміжною посудиною та повним проміжним охолодженням показані на рисунках 6.8-6.10 [2].

Відмінність цієї схеми від попередньої в тому, що робоча речовина після охолодження у проміжному холодильнику ТО направляється в проміжну посудину ПП, де охолоджується до стану сухої насиченої пари (точка 4) і потім надходить в компресор другого ступеня [5].

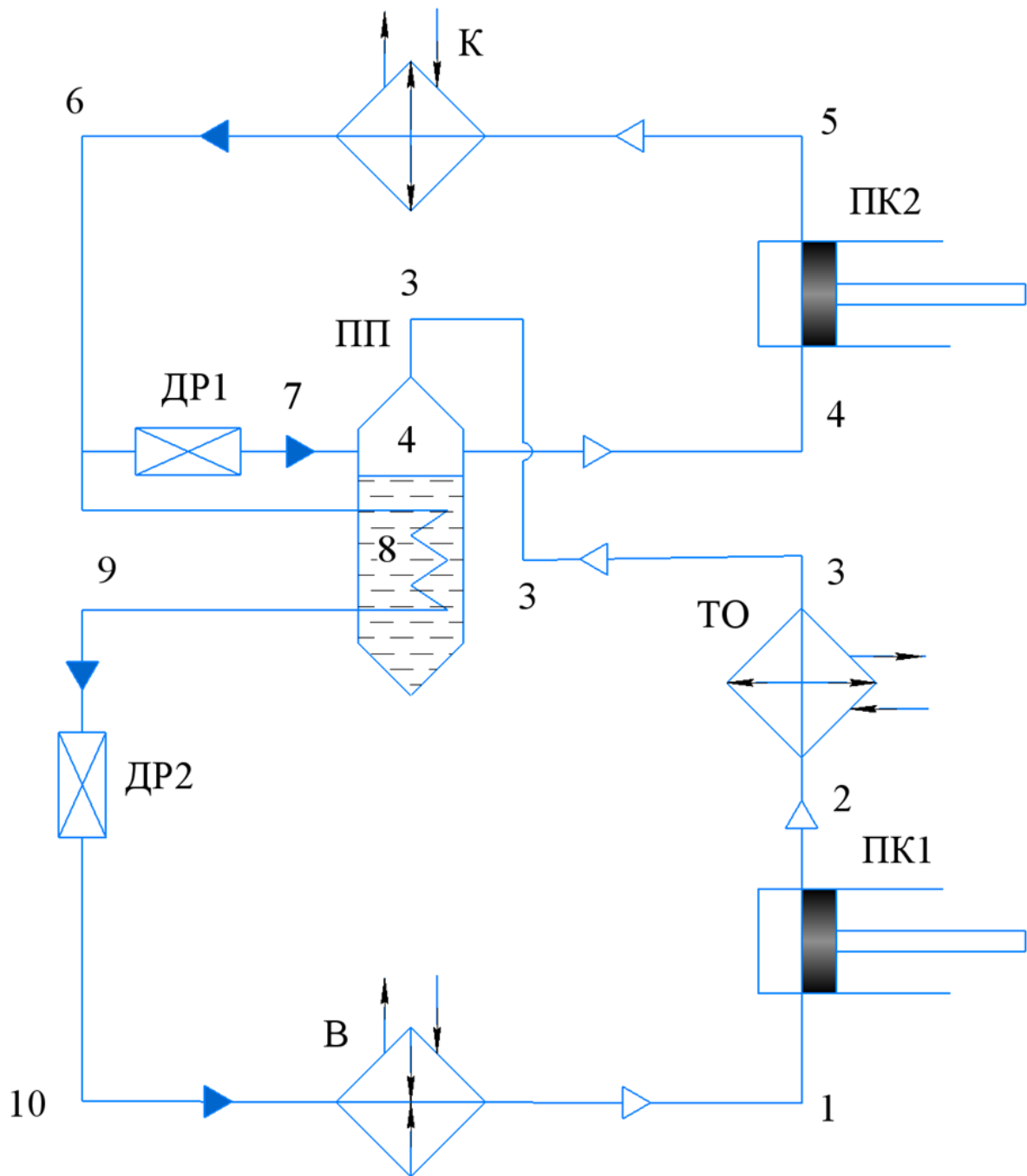


Рисунок 6.8 – Схема холодильної машини зі змійовиковою проміжною посудиною та повним проміжним охолодженням

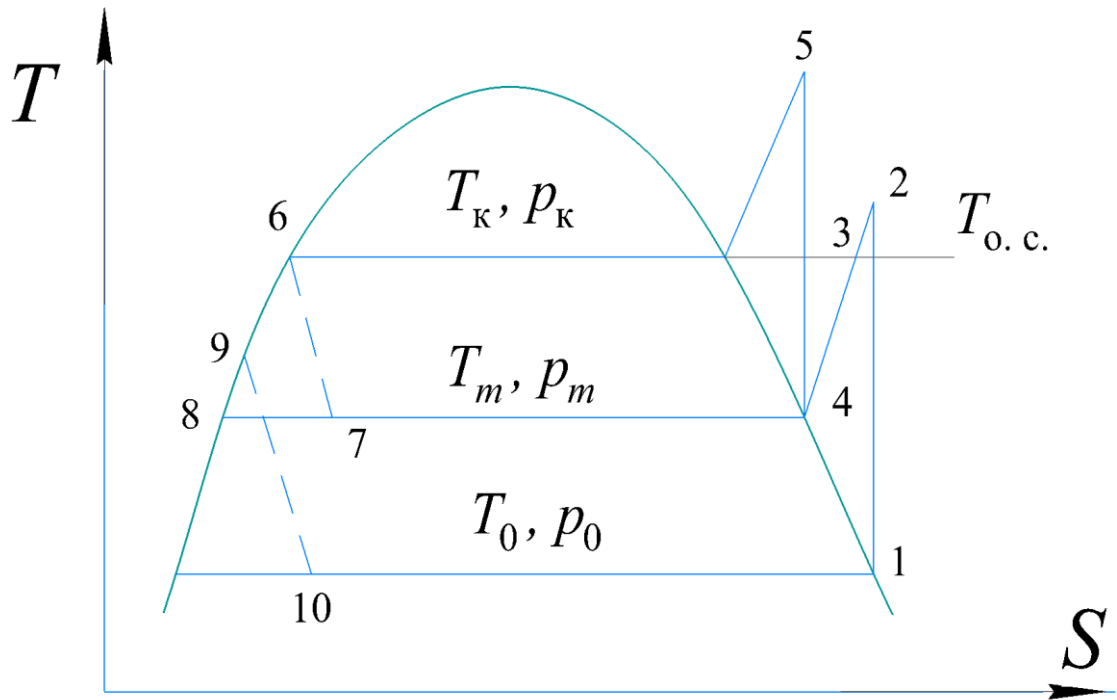


Рисунок 6.9 – $T-s$ – діаграма холодильної машини зі змішувковою проміжною посудиною та повним проміжним охолодженням

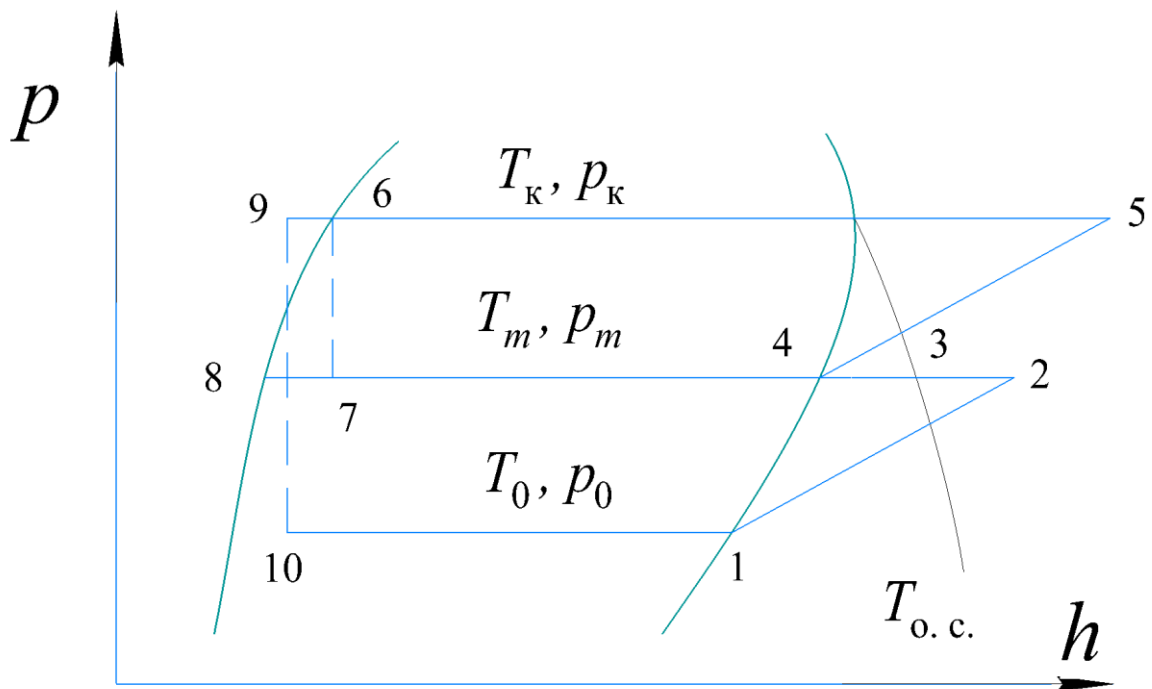


Рисунок 6.10 – $P-h$ – діаграма холодильної машини зі змішувковою проміжною посудиною та повним проміжним охолодженням

В двоступінчастій холодильній машині з теплообмінниками, цикли та схеми якої показані на рисунках 6.11–6.13, в якості робочої речовини найчастіше використовуються фреони, тоді як у попередніх випадках частіше використовується аміак [5].

Робоча речовина стискається компресором першого ступеня ПК1 (процес 1-2), охолоджується в проміжному холодильнику ПХ (процес 2-3) і подається до другого ступеня. Перед компресором другого ступеня ПК2 пара, що йде з проміжного холодильника змішується з холодною парою (стан 11), яка поступає з рідинного теплообмінника ТО2. Робоча речовина в результаті змішування охолоджується до стану, що характеризується точкою 4. Таким чином, в компресорі другого ступеня стискається більша за масою кількість робочої речовини, ніж в компресорі першого ступеня [5].

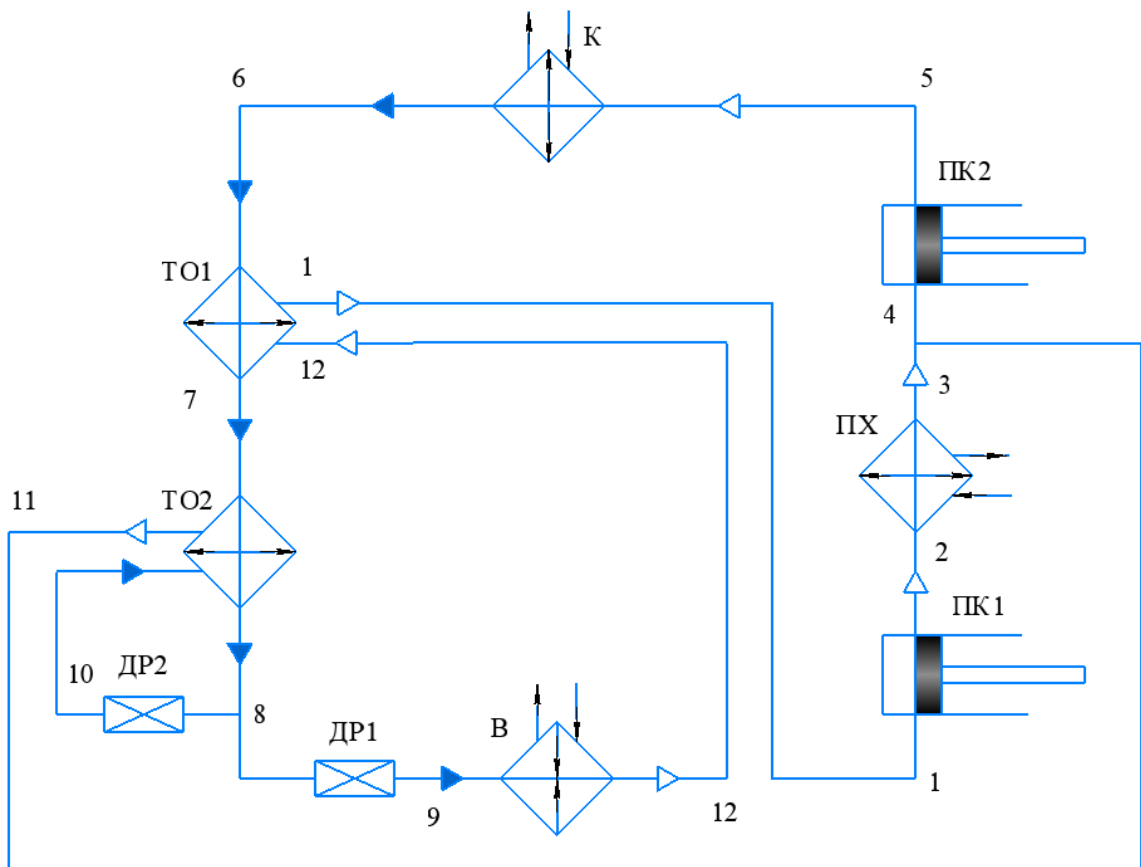


Рисунок 6.11 – Схема двоступінчастої холодильної машини з теплообмінниками

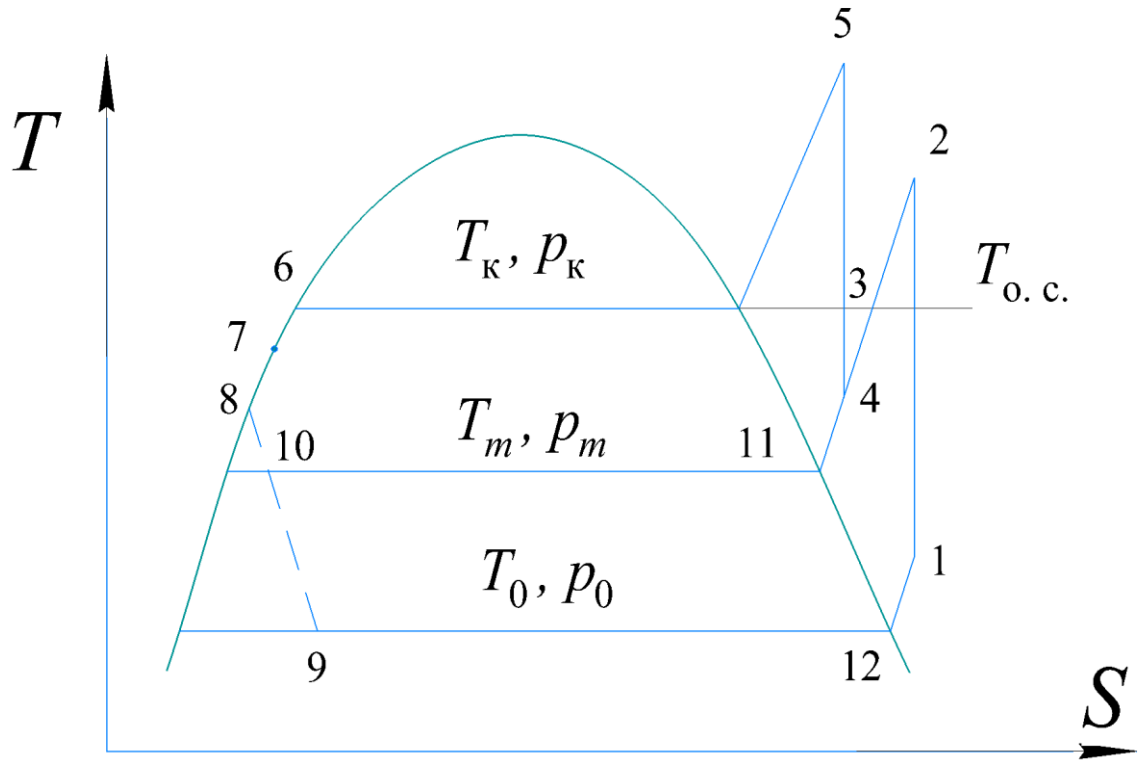


Рисунок 6.12 – $T-s$ – діаграма двоступінчастої холодильної машини з теплообмінниками

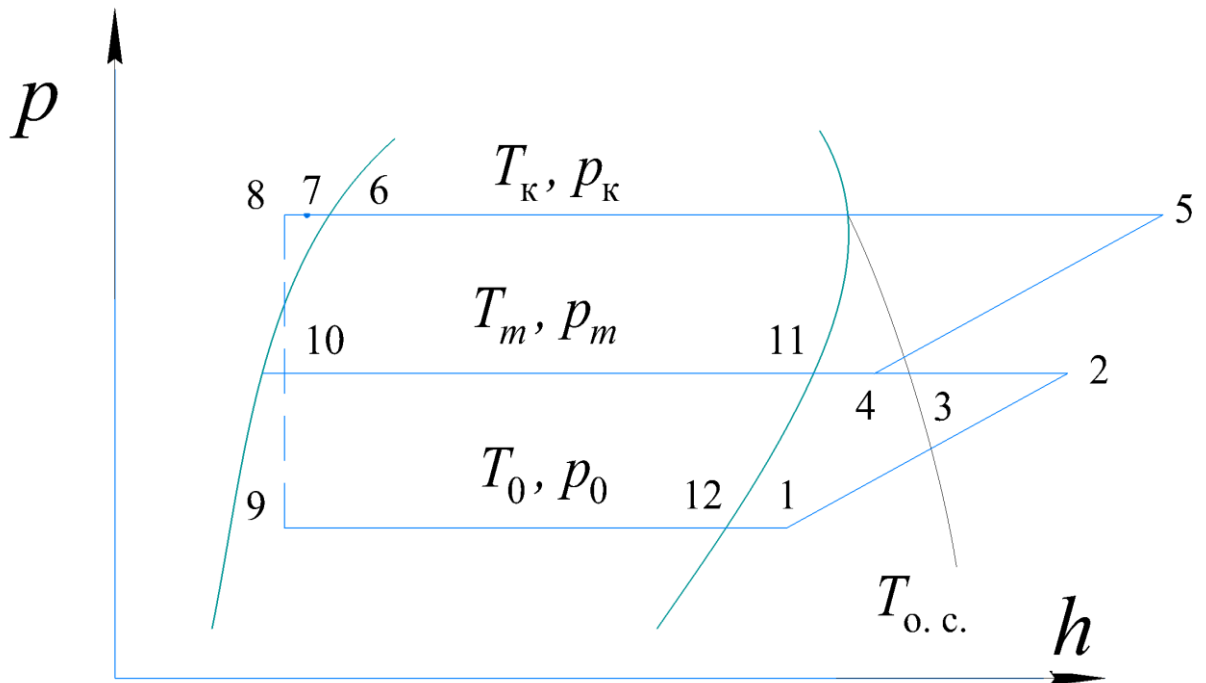


Рисунок 6.13 – $P-h$ – діаграма двоступінчастої холодильної машини з теплообмінниками

Після стискування в компресорі другого ступеня (процес 4-5) робоча речовина охолоджується і конденсується в конденсаторі К (процес 5-6). Далі, робоча рідина поступає в парорідинний теплообмінник ТО1, де охолоджується (процес 6-7) холодною парою робочої речовини, що йде з випарника В. Після цього, робоча речовина направляється в рідинний теплообмінник ТО1, де охолоджується (процес 7-8). Охолодження відбувається за рахунок теплообміну з киплячою рідиною, що дроселюється через допоміжний дросельний вентиль ДР2 (процес 8-10). Більша частина робочої речовини дроселюється в основному дросельному вентилі ДР1 (процес 8-9) і поступає у випарник, де кипить (процес 9-12) за рахунок теплоти джерела низької температури (охолоджуваного середовища) [5].

З випарника пара робочої речовини поступає в парорідинний теплообмінник, де нагрівається (процес 12-1) за рахунок теплоти, що відбирається від рідкої робочої речовини, що рухається з конденсатора, і потім поступає в компресор першого ступеня. Пара, що утворюється в рідинному теплообміннику, змішується з робочою речовиною, що поступає з компресора першою ступені і поступає в компресор другого ступеня [5].

Як впливає з опису роботи машини, парорідинний та рідинний теплообмінники служать, перш за все, для охолодження рідкої робочої речовини перед дроселюванням, і підвищує питому масову холодопродуктивність циклу. Нагрівання пари в парорідинному теплообміннику (в тому випадку, якщо компресор поршневий) гарантує захист компресору першого ступеня від гідравлічного удару та підвищує його об'ємні й енергетичні коефіцієнти [5].

Двоступінчаста холодильна машина з проміжним відбором пари з одноступінчастим гвинтовим компресором показана на рисунку 6.14. Цикли цієї машини показані на рисунках 6.15 та 6.16. В цій схемі застосовується гвинтовий компресор ГК. Робоча речовина стану 1 заповнює робочу порожнину компресора, яка після цього від'єднується від вікна всмоктування. Потім за рахунок зменшення об'єму робочої порожнини відбувається

підвищення тиску речовини, що там знаходиться. В той момент, коли в робочій порожнині досягається значення P_m (процес стиснення 1-2), вона з'єднується з вікном, через яке в порожнину потрапляє пара робочої речовини стану 9 з теплообмінника ТО. В результаті змішування отримується пара стану 3, яка далі стискається в тій же порожнині до стану 4 (процес 3-4) [5].

Після конденсатора К рідка робоча речовина розділяється на два потоки: менша частина дроселюється в допоміжному дросельному вентилі ДР2 (процес 5-6) і потрапляє в міжзмійовиковий простір теплообмінника ТО, більша частина іде по змійовику теплообмінника і охолоджується (процес 5-7) в результаті теплообміну з киплячою в міжзмійовиковому просторі при температурі T_m та тиску P_m робочою речовиною, пара якої поступає в компресор [5].

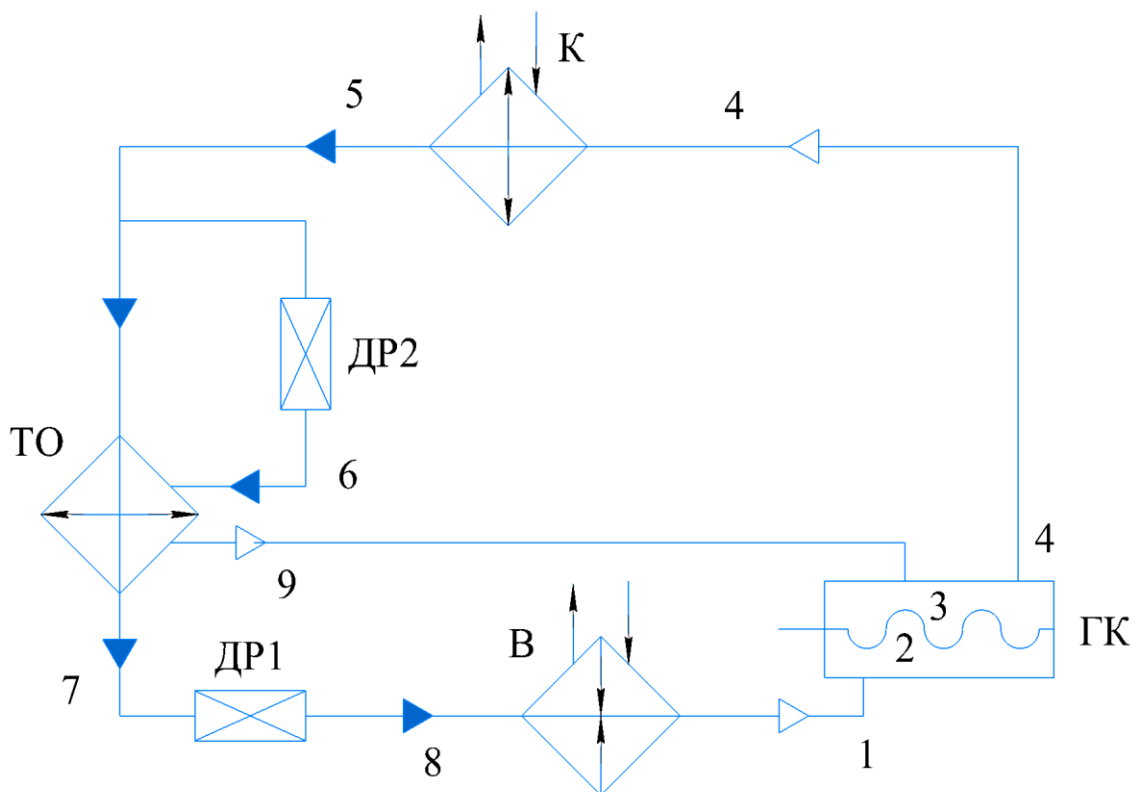


Рисунок 6.14 – Схема двоступінчастої холодильної машини з проміжним відбором пари з одноступінчастим гвинтовим компресором

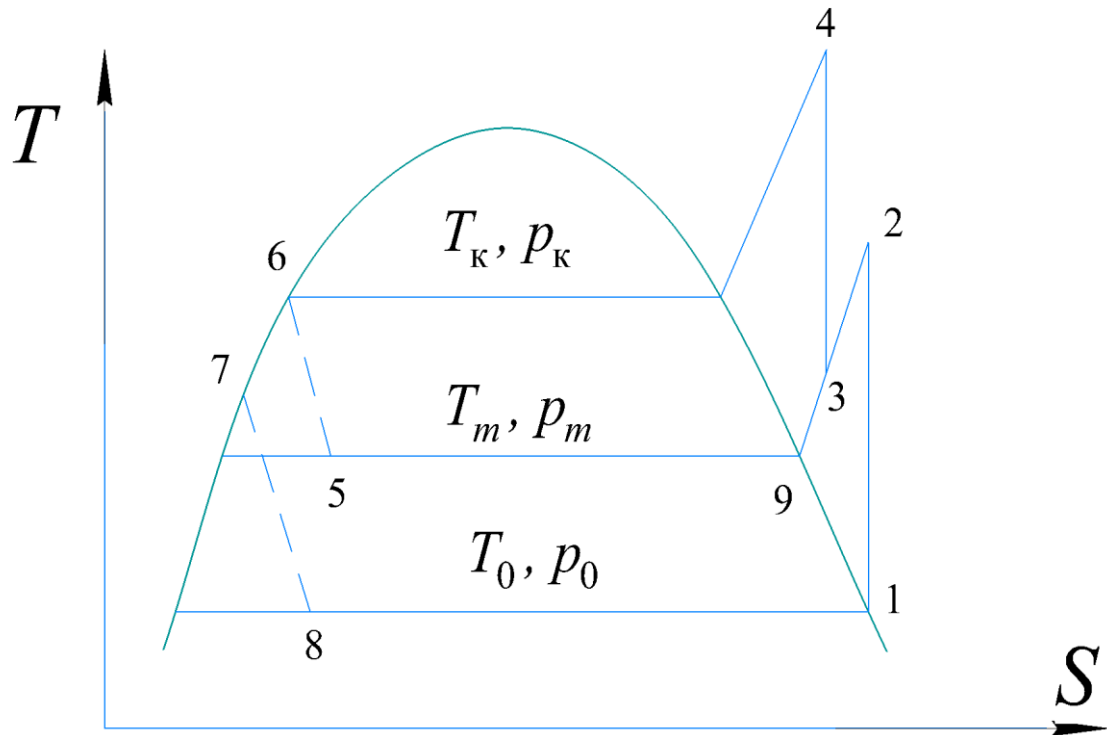


Рисунок 6.15 – $T-s$ – діаграма двоступінчастої холодильної машини з проміжним відбором пари з одноступінчастим гвинтовим компресором

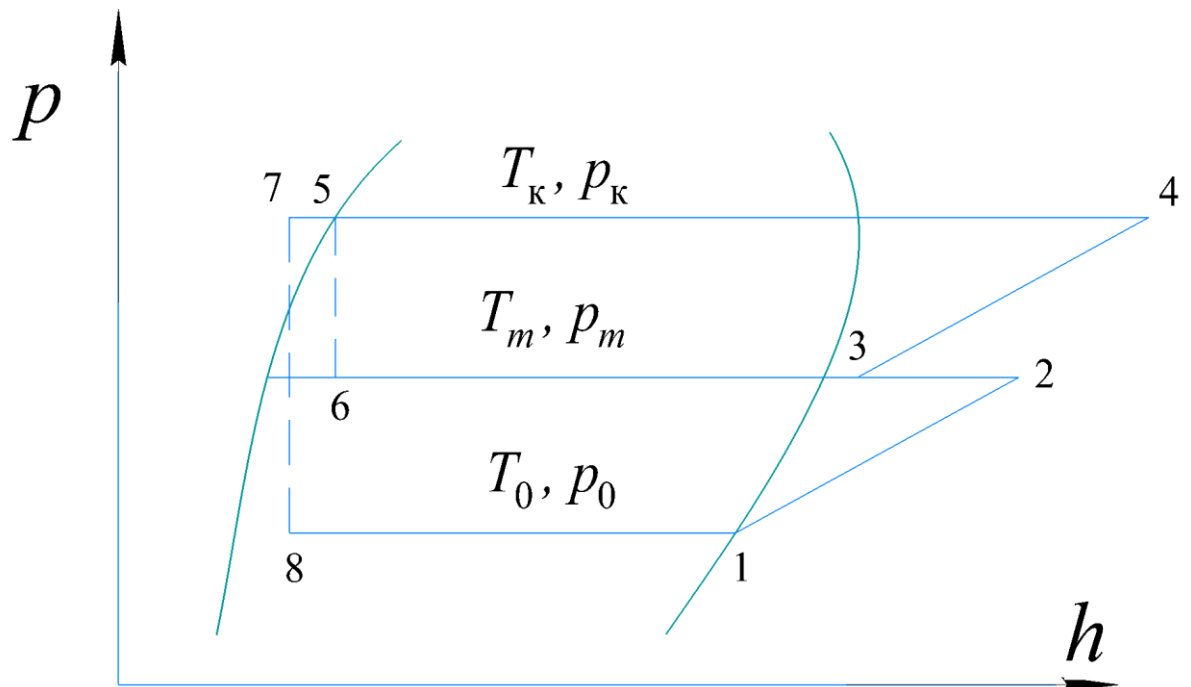


Рисунок 6.16 – $P-h$ – діаграма двоступінчастої холодильної машини з проміжним відбором пари з одноступінчастим гвинтовим компресором

Охолоджена рідина дроселюється в основному дросельному вентилі ДР1 (процес 7-8) та поступає до випарника В. Таким чином, в розглядуваній схемі двоступінчасте стиснення робочої речовини з проміжним охолодженням за рахунок холодної пари, що поступає з теплообмінника, відбувається в одному компресорі. В усьому іншому ця схема нічим не відрізняється від звичайної схеми з однократним дроселюванням та проміжним відбором пари [5].

Всі наведені вище двоступінчасті холодильні машини за своїми енергетичними показниками переважають одноступінчасті. В двоступінчастій холодильній машині з проміжним холодильником це відбувається завдяки охолодженню робочої речовини перед всмоктуванням в компресор другого ступеня, в інших двоступінчастих холодильних машинах – внаслідок охолодження пари робочої речовини перед компресором другого ступеня і охолодження рідкої робочої речовини перед дроселюванням. Однак, при двоступінчастому стисненні можна ще підвищити енергетичну ефективність машини, застосувавши двократне дроселюванням робочої речовини, що поступає у випарник. Це використовується в схемах, які будуть розглянуті нижче [5].

6.3.1 Цикли та схеми двоступінчастих холодильних машин з двократним дроселюванням

Однією з таких машин є двоступінчаста холодильна машина з неповним проміжним охолодженням. Схема і цикли цієї машини показані на рисунках 6.17 – 6.19 [5].

Робоча речовина після стиснення в компресорі першого ступеня ПК1 (процес 1-2) та охолодження в проміжному холодильнику ТО (процес 2-3) поступає на всмоктування в компресор другого ступеня ПК2, де змішується з холодною парою робочої речовини, що виходить з проміжної посудини. В результаті змішування робоча речовина охолоджується до стану 4, всмоктується в компресор другого ступеня, стикується (процес 4-5) і після конденсації та охолодження в конденсаторі К (процес 5-6) дроселюється в

першому дросельному вентилю ДР1 (процес 6-7). На відміну від схем з однократним дроселюванням, в цій схемі, як і в інших схемах з двократним дроселюванням, дроселюється вся робоча речовина, а не менша її частина [5].

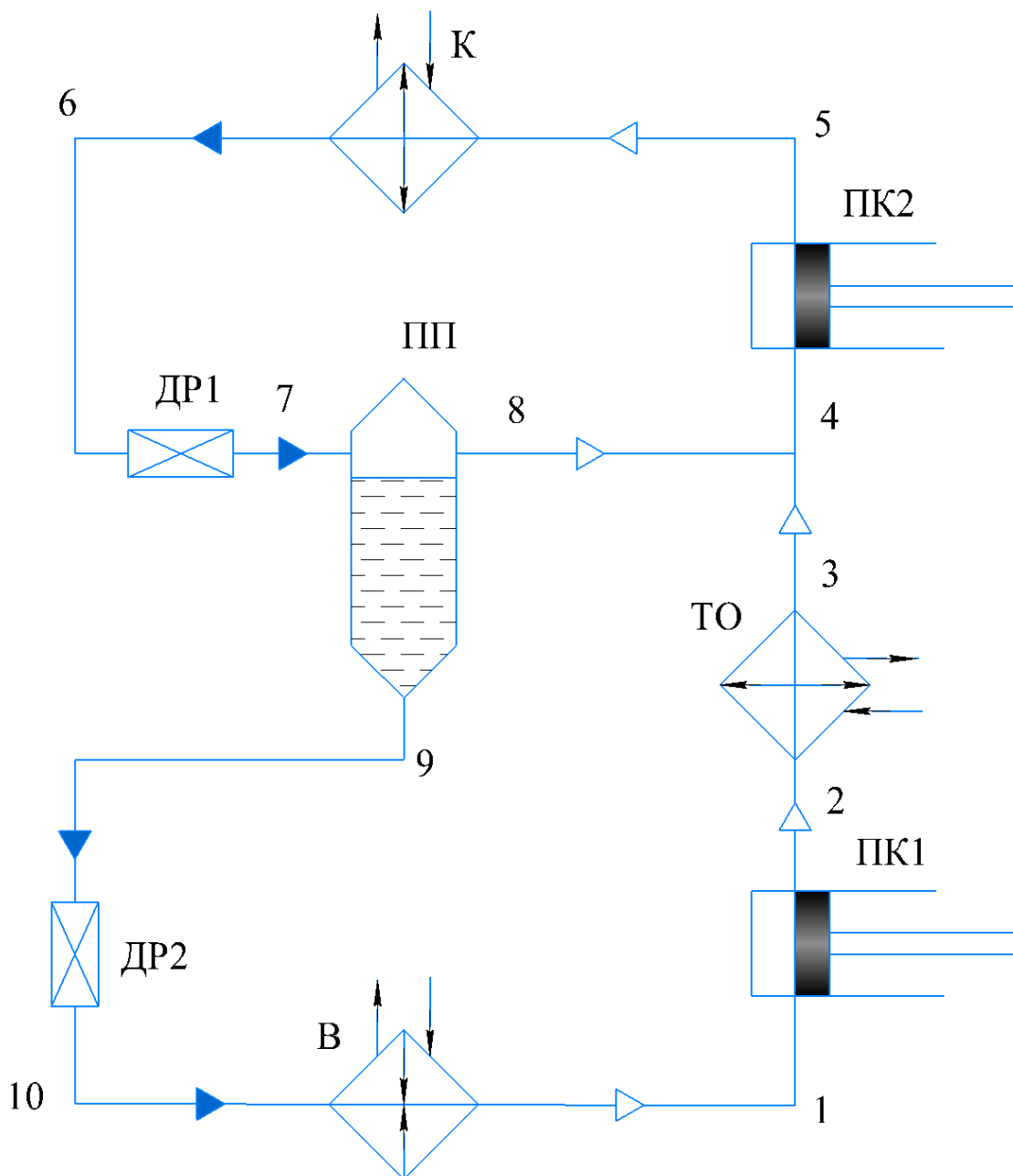


Рисунок 6.17 – Схема двоступінчастої холодильної машини з неповним проміжним охолодженням

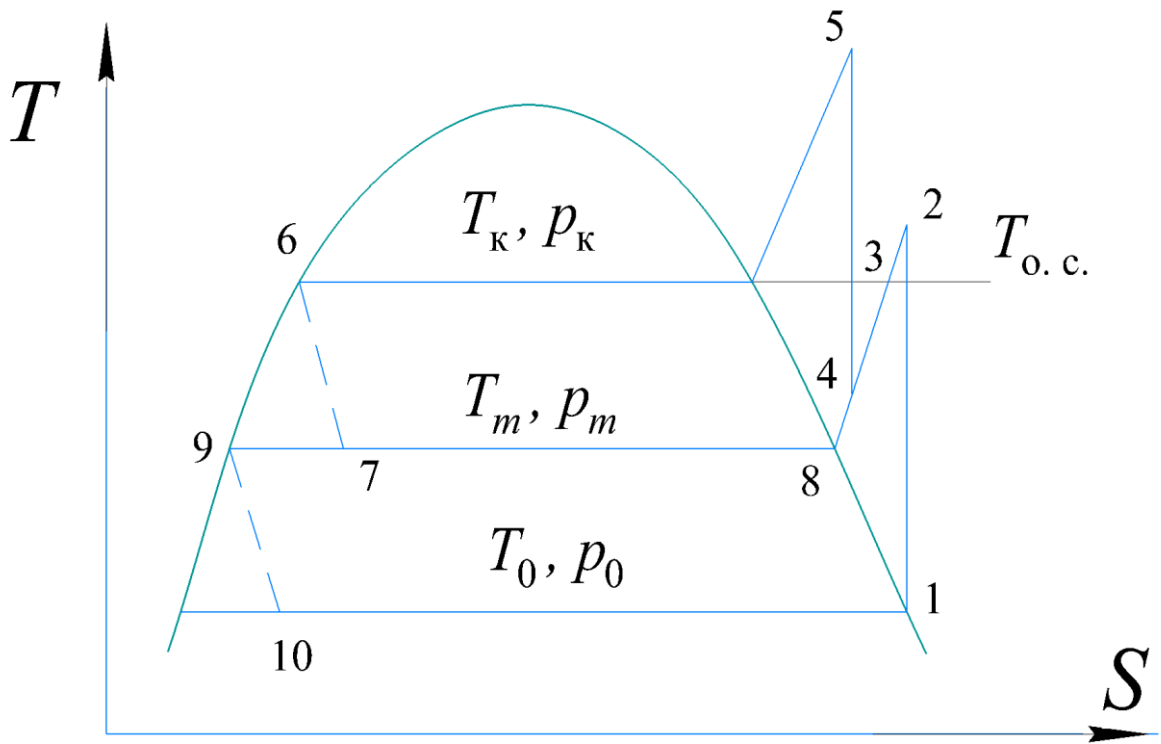


Рисунок 6.18 – $T-s$ – діаграма двоступінчастої холодильної машини з неповним проміжним охолодженням

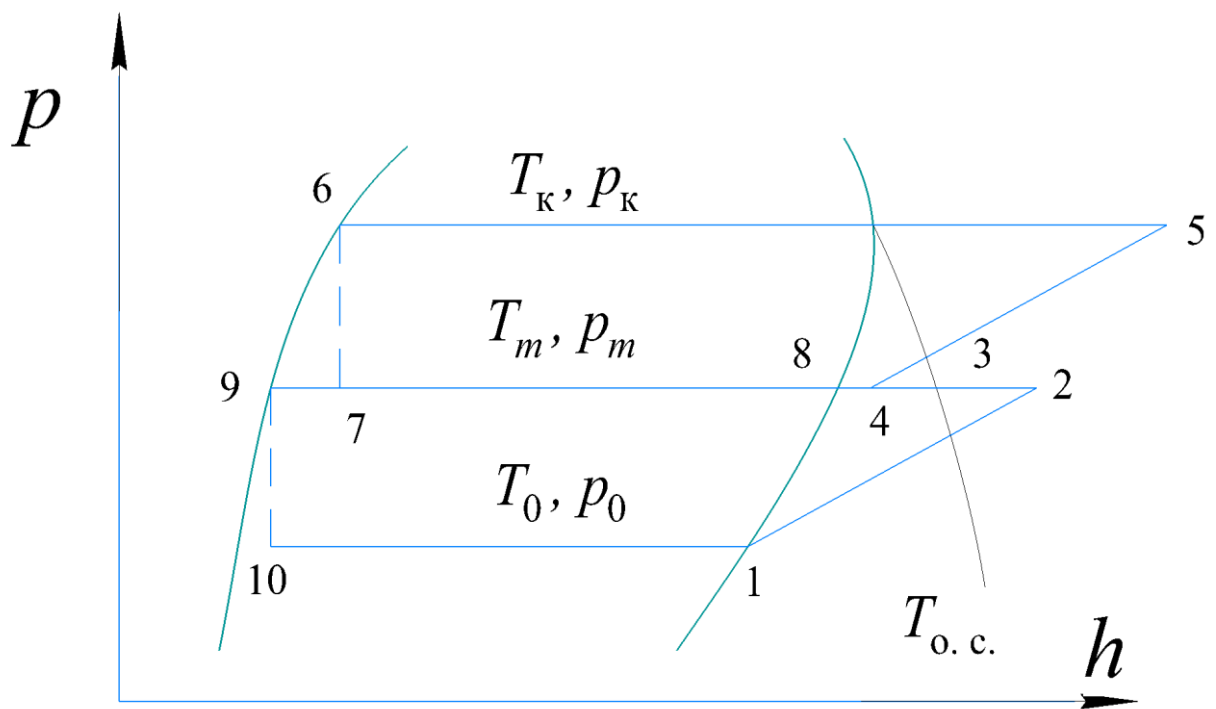


Рисунок 6.19 – $P-h$ – діаграма двоступінчастої холодильної машини з неповним проміжним охолодженням

В проміжній посудині ПП, за рахунок різниці густин, відбувається розділення вологої пари, отриманої в кінці процесу дроселювання, на рідину стану 9 та пару стану 8. Пара йде на всмоктування в компресор другого ступеня, де змішується з робочою речовиною, що йде з першого ступеня. Рідина направляється до другого дросельного вентиля ДР2, дроселюються в ньому (процес 9-10) і поступає у випарник В, де кипить за рахунок теплоти, яка відбирається від охолоджуваного середовища (процес 10-1). Утворена пара робочої речовини відсмоктується компресором першого ступеня, підтримується у випарнику постійний тиск кипіння [5].

Двоступінчаста холодильна машина з повним проміжним охолодженням (рисунок 6.20-6.22) [5].

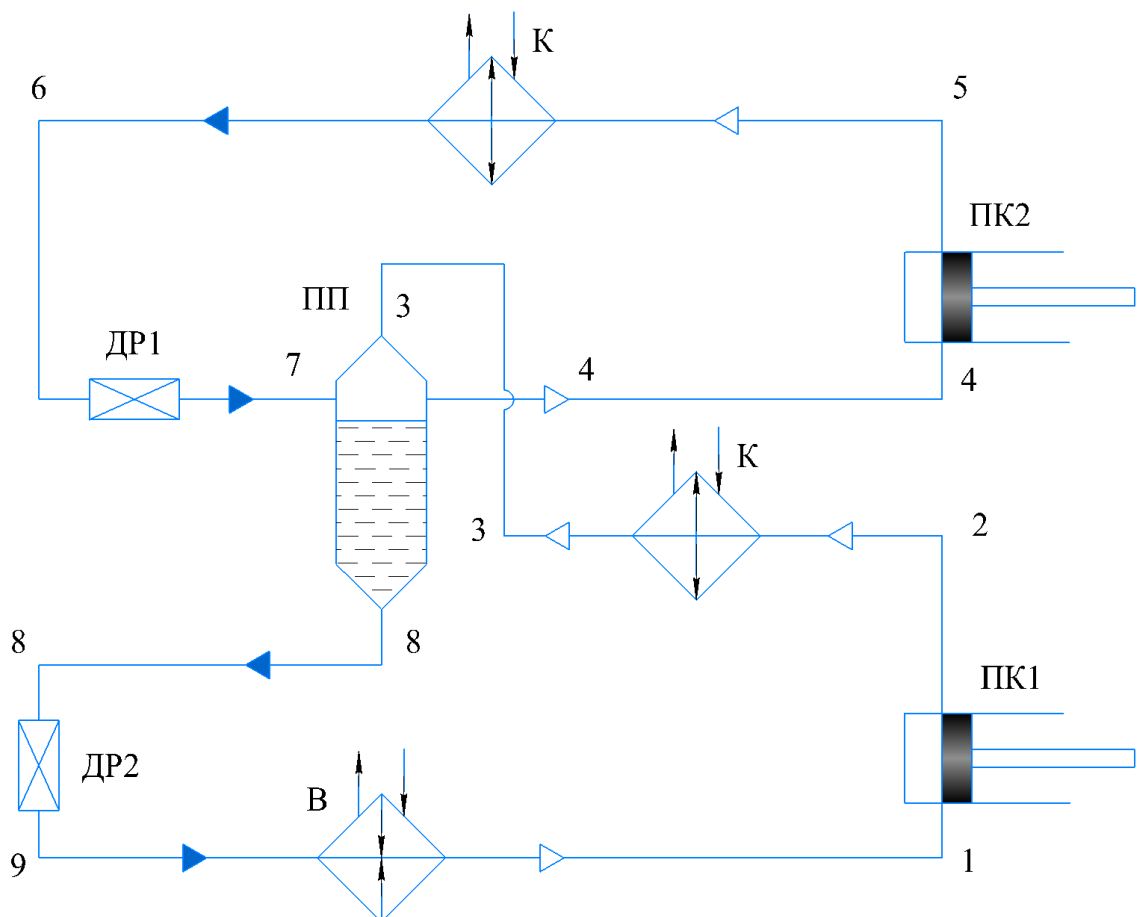


Рисунок 6.20 – Схема двоступінчастої холодильної машини з повним проміжним охолодженням

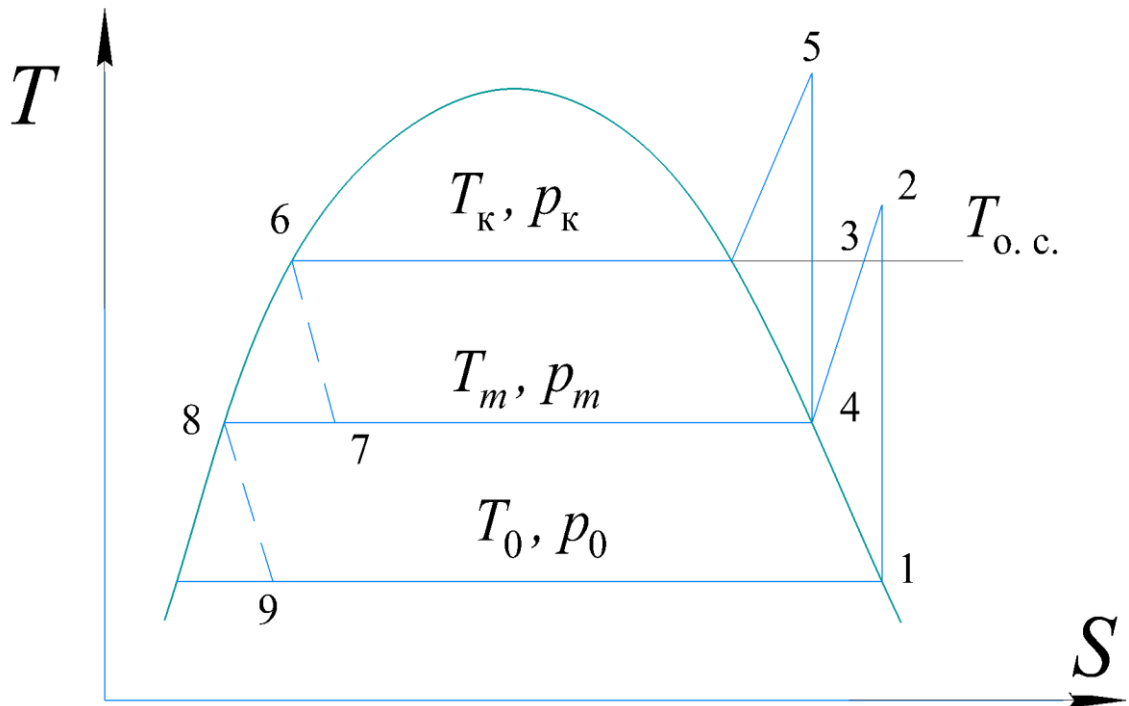


Рисунок 6.21 – $T-s$ – діаграма двоступінчастої холодильної машини з повним проміжним охолодженням

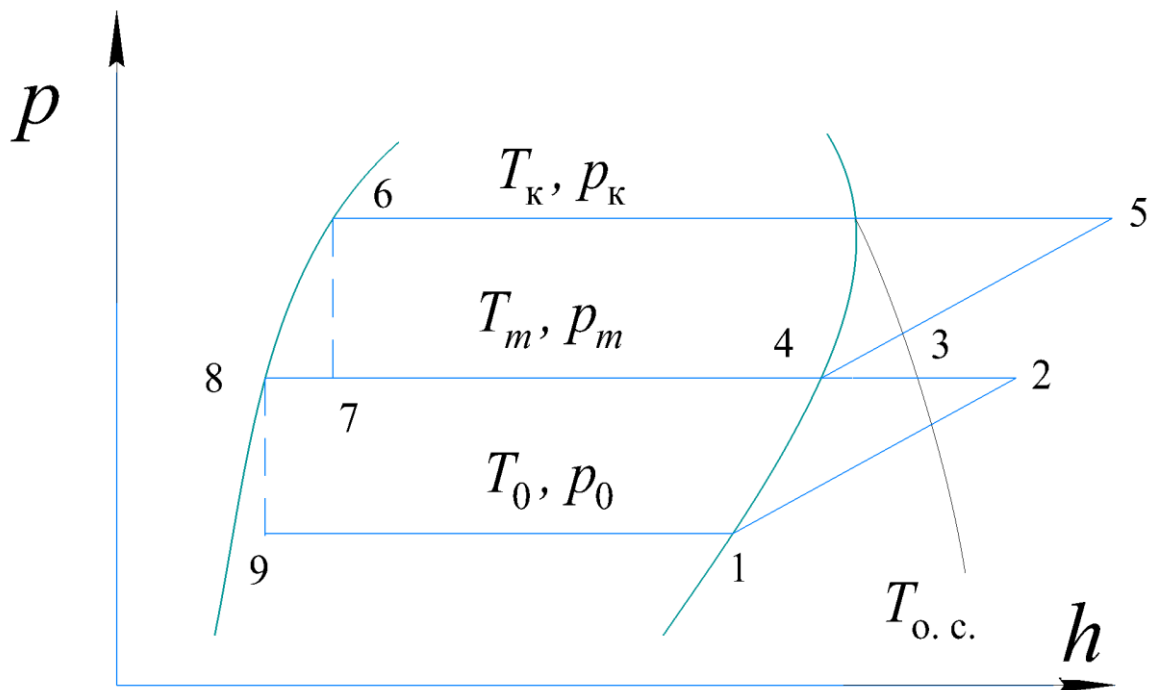


Рисунок 6.22 – $P-h$ – діаграма двоступінчастої холодильної машини з повним проміжним охолодженням

Відмінність цієї схеми від попередньої полягає в тому, що робоча речовина після проміжного холодильника ТО поступає в проміжну посудину ПП, де охолоджується до стану сухої насиченої пари при безпосередньому контакті з рідкою робочою речовиною, що кипить при температурі T_m [5].

Двоступінчаста холодильна машина з двома випарниками показана на схемі на рисунку 6.23, теплові діаграми показані на рисунках 6.24 та 6.25 [5].

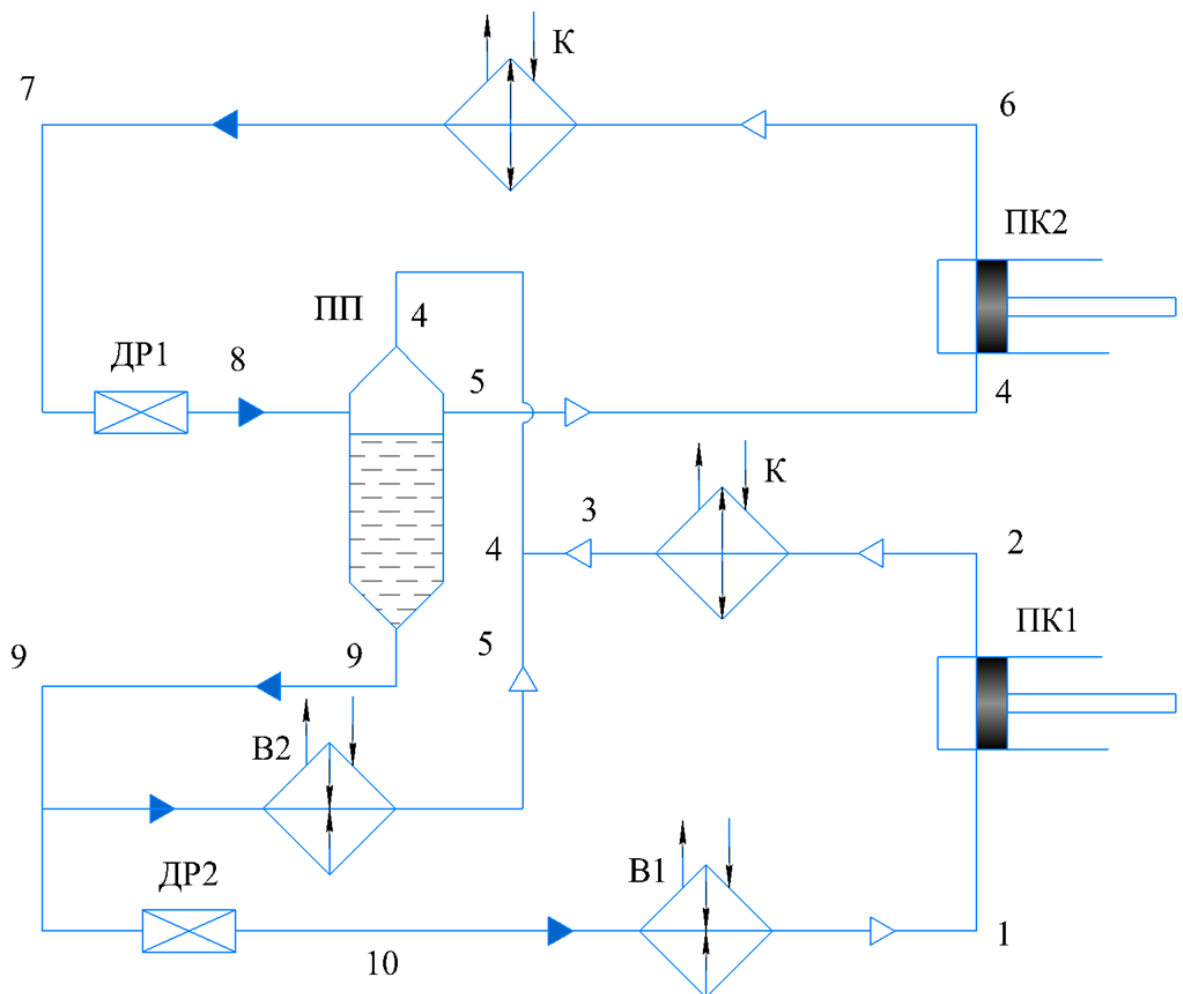


Рисунок 6.23 – Схема двоступінчастої холодильної машини з двома випарниками

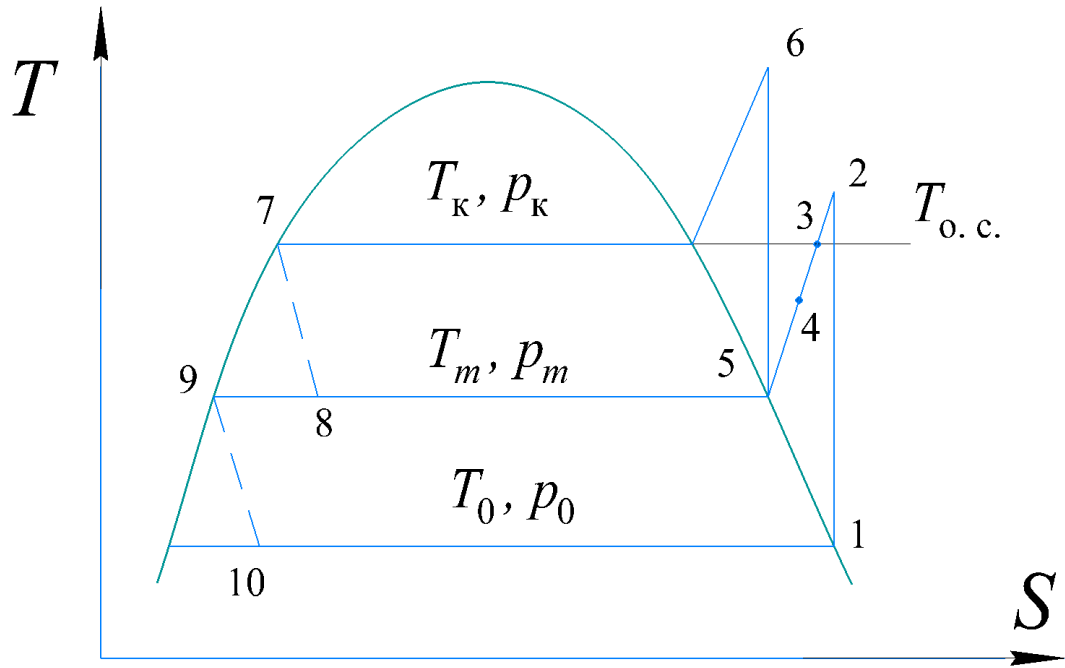


Рисунок 6.24 – $T-s$ – діаграма двоступінчастої холодильної машини з двома випарниками

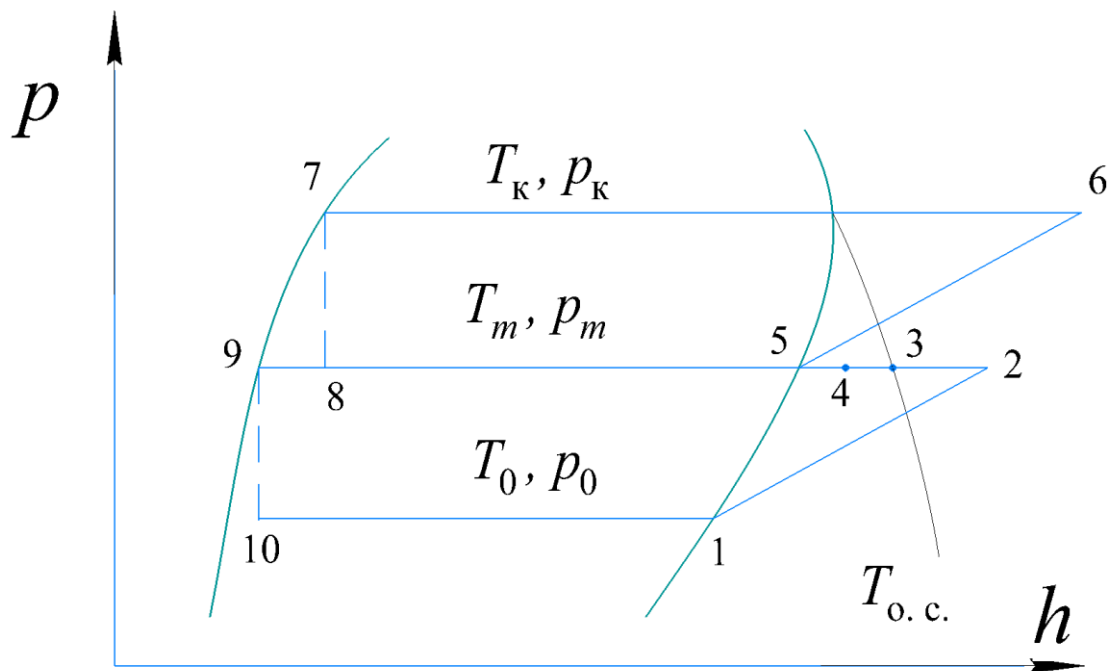


Рисунок 6.25 – $P-h$ – діаграма двоступінчастої холодильної машини з двома випарниками

Відмінність цієї схеми полягає в тому, що частина робочої речовини після проміжної посудини ПП направляється у другий випарник В2. Робоча речовина в цьому випарнику кипить при температурі T_m та тиску P_m за рахунок теплоти другого джерела низької температури. Температура T_0 нижча за температуру кипіння T_m . Пара робочої речовини, утворена в другому випарнику (стан 5), змішується з парою робочої речовини, що йде з першого ступеня і направляється в проміжну посудину. Після змішування стан робочої речовини буде характеризуватися точкою 4 і визначається з матеріальних балансів [5].

Холодильна машина з пароструменевим апаратом. Нижня границя діапазону температур кипіння в компресорних холодильних машинах визначається тиском біля 0,01 МПа, що для фреону R22, наприклад, відповідає температурі кипіння 193 К. Із застосуванням пароструменевого апарата (ежектора) можна отримати тиск у випарнику 0,002 МПа і температуру для фреону R22 173 К [10, 12]. Головна перевага пароструменевого апарата полягає в тому, що зі зниженням тиску його робочі коефіцієнти не погіршуються. Крім того, в пароструменевому апараті немає рухомих частин. Тому простота – його друга перевага [5].

Розглянемо найпростішу схему парової холодильної машини з одноступінчастим компресором і пароструменевим апаратом, показану на рисунках 6.25-6.27 [5].

Для роботи пароструменевого апарата, пара робочої речовини в стані 4, відбирається після компресора ПК і направляється в сопло пароструменевого апарата ПА. Іноді відбір пари відбувається з верхньої частини конденсатора К. Це стосується переважно аміачних машин, оскільки подача в пароструменевий апарат після компресора може призвести до значного підвищення температури нагнітання. В соплі швидкість пари зростає до критичних та надкритичних значень. Після розширення (процес 4-b) тиск робочої речовини знижується від P_k до P_0 [5].

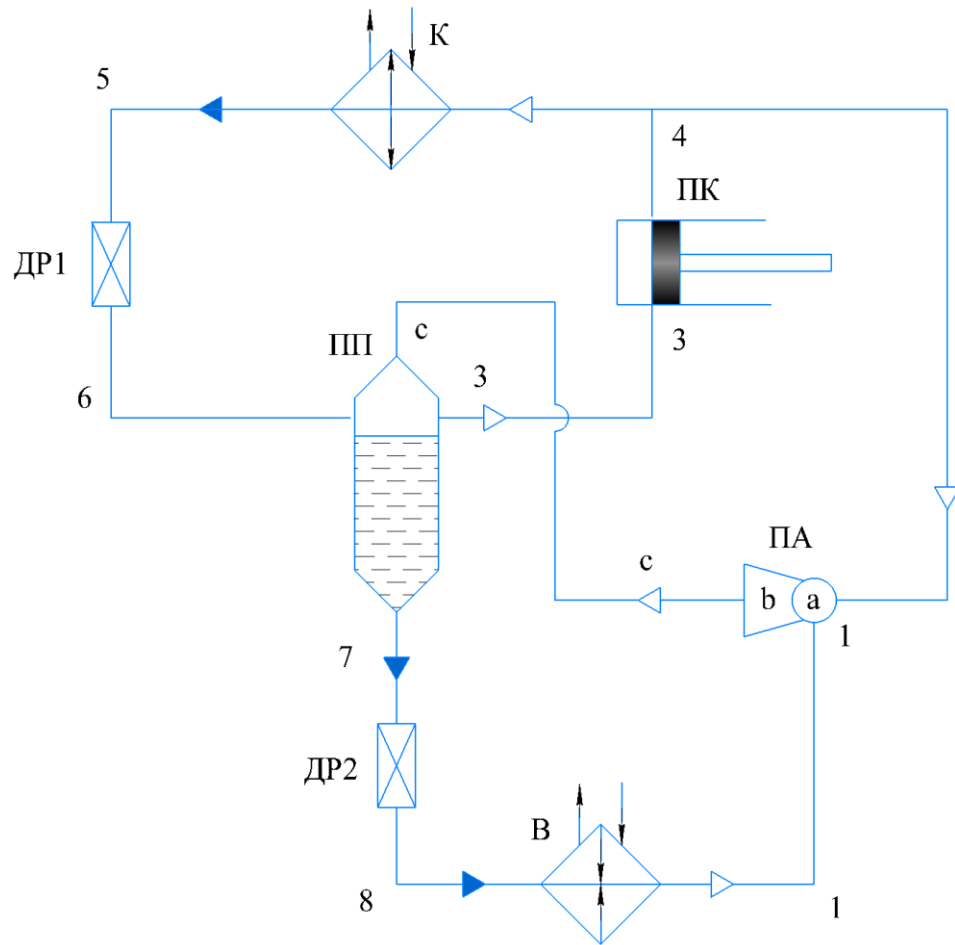


Рисунок 6.26 – Схема парової холодильної машини з одноступінчастим компресором і пароструменевим апаратом

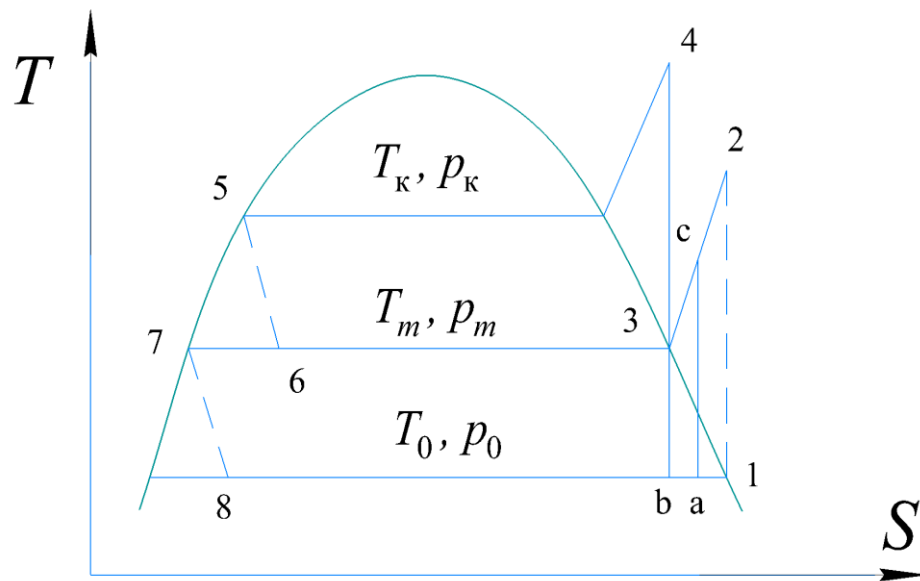


Рисунок 6.27 – $T-s$ – діаграма парової холодильної машини з одноступінчастим компресором і пароструменевим апаратом

В камеру змішування холодна пара підсмоктується з випарника В (стан 1), що йде з сопла (стан b). В результаті змішування створюється суміш, яка характеризується точкою а. Далі суміш стискається до тиску P_m (процес а-с). Пара в стані с поступає в проміжну посудину ПП, охолоджується там і в стані 3 всмоктується компресором. З проміжної посудини в компресор також іде пара, котра утворилася в результаті кипіння рідкої робочої речовини (за рахунок підведення теплоти від парів, що йдуть від пароструменевого апарата), а також пара, утворена при першому дроселюванні. В компресорі робоча речовина стискається (процес 3-4), після чого частина робочої речовини направляється до пароструменевого апарата, а інша частина конденсується і направляється до проміжної посудини і далі у випарник. До проміжної посудини можна підключити другий випарник, як це показано на рисунку 6.23 [5].

Пароструменеві апарати встановлюються на всмоктувальних трубопроводах камерних пристроїв охолодження. При завантаженні отеплених продуктів в якусь з камер, в роботу вмикається пароструменевий апарат, температура кипіння при цьому знижується на 6-10°C, в решті камер вона залишається постійною. Це виявляється більш вигідним, ніж зниження температури кипіння у всіх камерах [5].

6.4 Цикли та схеми трьохступінчастих холодильних машин

Прикладом таких машин є трьохступінчаста холодильна машина з повним проміжним охолодженням. Такі машини розповсюджені набагато менше, ніж двоступінчасті і застосовуються в основному в хімічній промисловості, для випробування приладів і виробів при низьких температурах. Принципова схема і цикл трьохступінчастої холодильної машини з повним проміжним охолодженням показана на рисунках 6.28 та 6.29 [5].

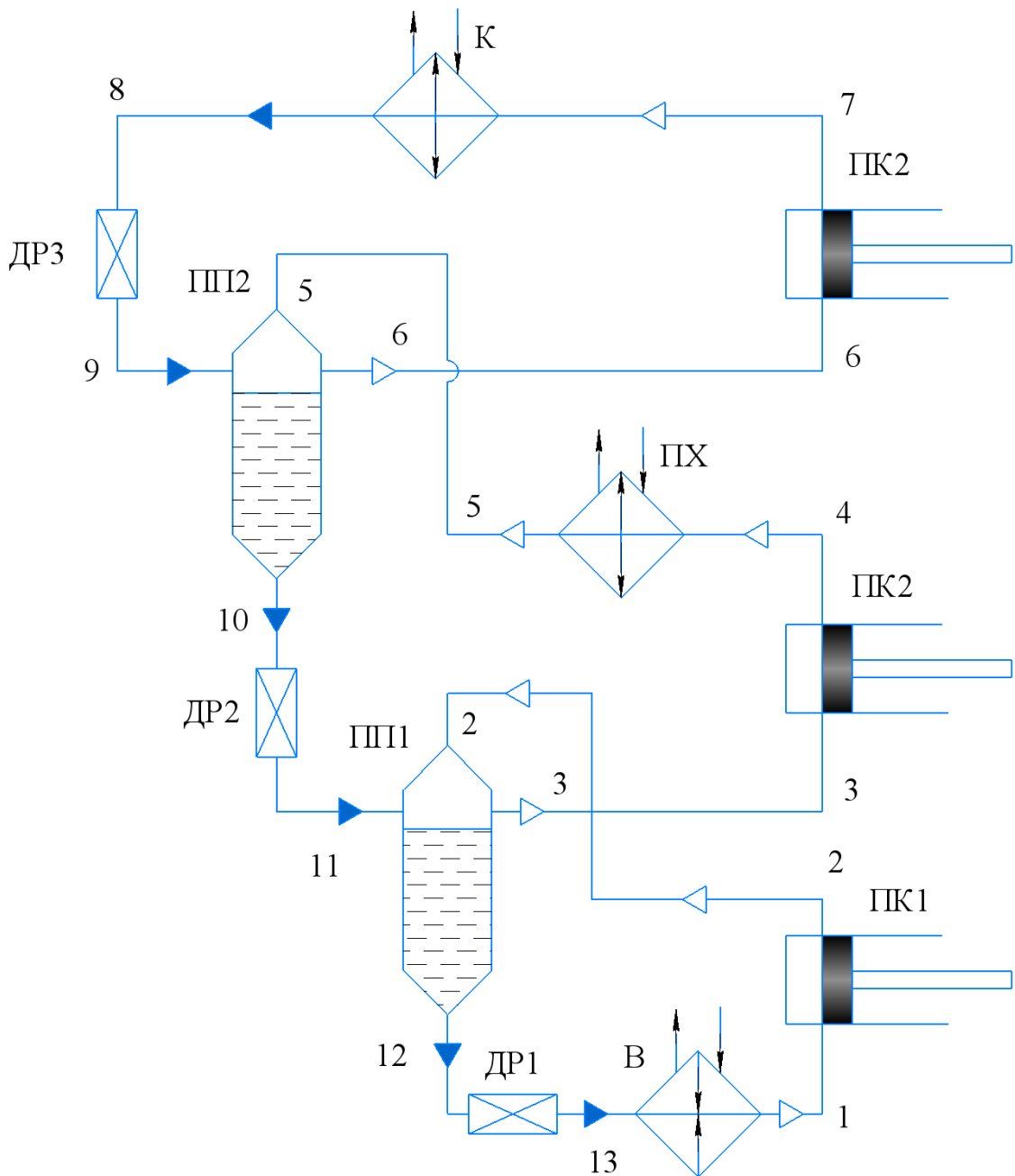


Рисунок 6.28 – Схема трьохступінчастої холодильної машини з повним проміжним охолодженням

Суха насичена пара, що утворюється у випарнику В, стискається в компресорі першого ступеня ПК1 (процес 1-2) і направляється в проміжну посудину ПП1, де вона охолоджується до стану 3 і направляється в компресор другого ступеня ПК2. Охолодження відбувається в результаті теплообміну з рідкою робочою речовиною, яке відбувається в проміжній посудині при

температурі T'_m . Рідка робоча речовина при цьому кипить, утворена при кипінні пара відсмоктується компресором другого ступеня [5].

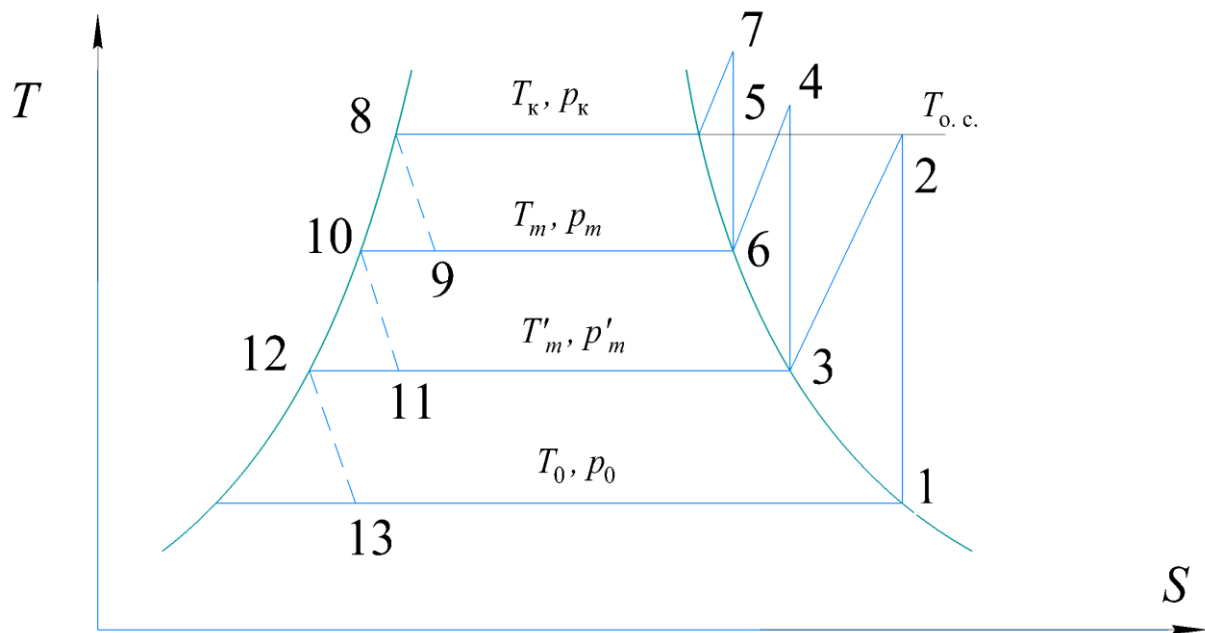


Рисунок 6.29 – T - s – діаграма трьохступінчастої холодильної машини з повним проміжним охолодженням

При дроселюванні в дросельному вентилі ДР2 (процес 10-11) частина рідкої робочої речовини переходить в пару, яка також відсмоктується компресором другого ступеня. Після стиснення в компресорі другого ступеня (процес 3-4) робоча речовина охолоджується в проміжному холодильнику ПХ (процес 4-5) і поступає в другу проміжну посудину ПП2, в якій відбуваються такі ж процеси, як і ПП1. Після стиснення в компресорі третього ступеня ПКЗ (процеси 6-7) робоча речовина направляється в конденсатор К, де охолоджується і конденсується (процес 7-8). Після цього рідка робоча речовина дроселюється в дросельному вентилі ДР3 (процес 8-9) і в дросельному вентилі ДР2 (процес 10-11). Далі проходячи дросельний вентиль ДР3 (процес 12-13), робоча речовина потрапляє у випарник В, де вона знову кипить (процес 13-1) [5].

Охолодження робочої речовини перед всмоктуванням у компресорах другого і третього ступеня може бути неповним. Ступінь охолодження залежить від конкретних робочих умов, робочої речовини, типу компресорів, тощо. Робоча речовина, що поступає в компресор першого ступеня, також може бути в перегрітому стані [5].

Трьохступінчаста машина для отримання сухого льоду. Робоча речовина в цій машині здійснює розривний цикл (квазіцикл). При цьому з машини робоча речовина – діоксид вуглецю – виводиться не в рідкому, а в твердому стані. Пояснюється це тим, що діоксид вуглецю за своїми властивостями в рідкому стані може знаходитися лише за умови, якщо температура буде вище 216,6 К при тиску 0,53 МПа. При вказаній температурі та тиску діоксид вуглецю може знаходитися одночасно в трьох фазах: рідкій, газоподібній та твердій. Якщо температуру та тиск дещо збільшити, то вуглекислий газ буде знаходитися лише в двох фазах: рідкій та газоподібній. Таким чином, при температурах вище 216,6 К діоксид вуглецю може застосовуватися як робоча речовина парової холодильної машини. При тиску та температурі більш низькими, ніж в потрійній точці, вуглекислий газ знаходиться лише в твердому і газоподібному стані [5].

Отже, якщо рідкий діоксид вуглецю дроселювати до тиску нижче 0,53 МПа (наприклад до атмосферного), то отриманий твердий діоксид вуглецю можна виводити з машини і використовувати для охолодження поза нею, замінюючи виведену кількість твердого діоксиду вуглецю газоподібним. В результаті дроселювання рідкого діоксиду вуглецю утворюється велика кількість пари. Ця пара повертається в машину [5].

Розглянемо детальніше роботу вуглекислотної машини (рисунки 6.30 та 6.30). Якщо припустити, що 1 кг рідкого діоксиду вуглецю дроселюється в дросельному вентилі ДРЗ (процес 9-10), то в кінці процесу дроселювання утворюється волога пара, яка в проміжній посудині ППЗ розділяється на x_{10} кг сухої насиченої пари стану 11 та $1 - x_{10}$ кг рідини стану 12 [5].

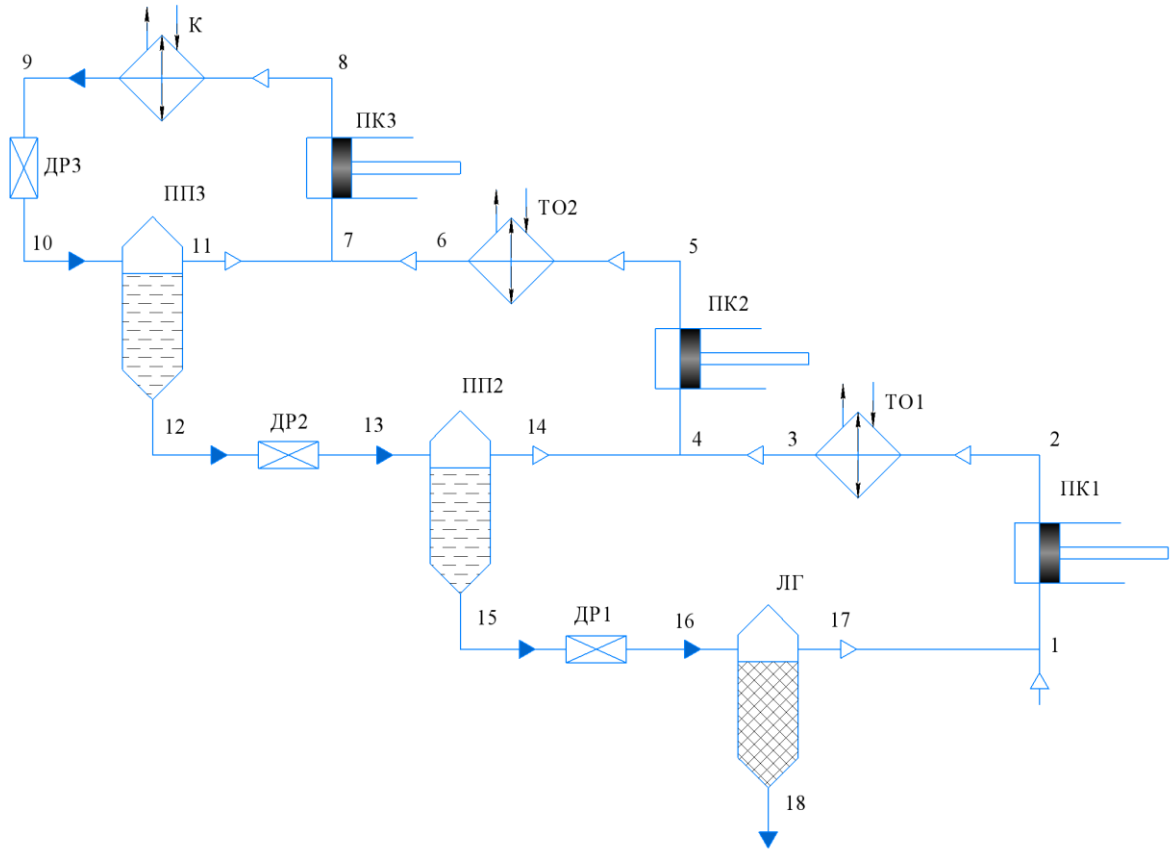


Рисунок 6.30 – Схема вуглекислотної холодильної машини

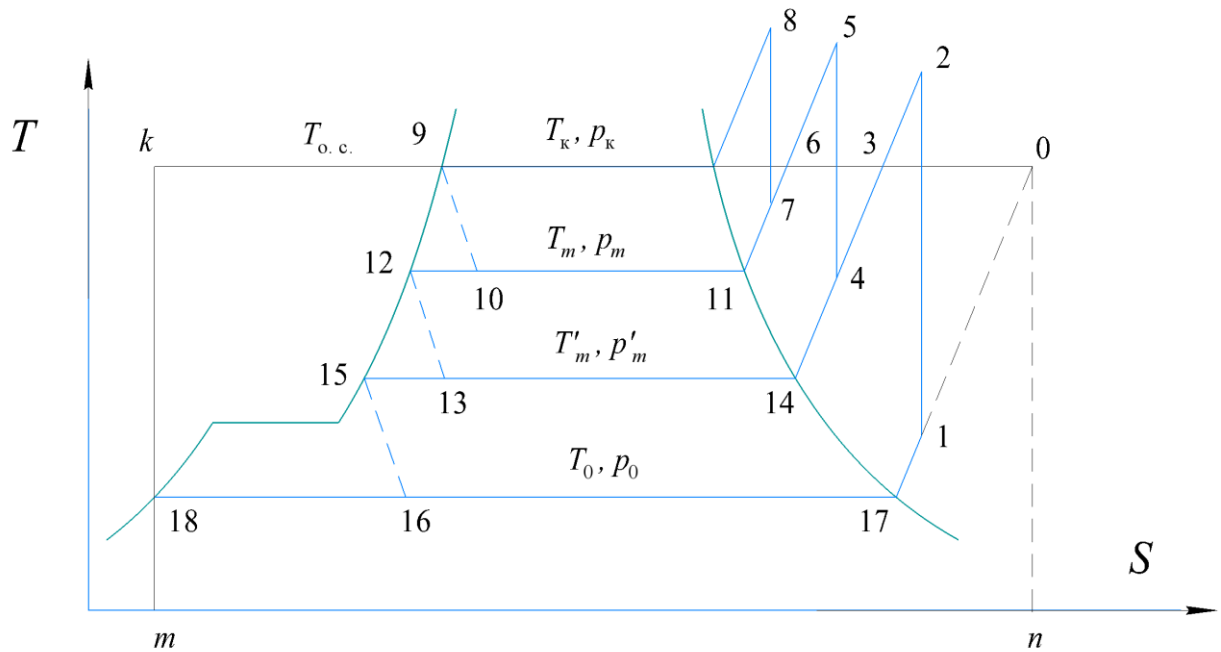


Рисунок 6.31 – $T-s$ – діаграма вуглекислотної холодильної машини

Утворена пара поступає на всмоктування в компресор високого ступеня ПК3, де, після змішування з діоксидом вуглецю, що йде з теплообмінника

середнього ступеня ТОЗ, стискується і поступає в конденсатор К. Рідина з проміжної посудини ППЗ дроселюється в дросельному вентилі ДР2 (процес 12-13). Утворена в процесі дроселювання пара в кількості $(1-x_{10})x_{13}$ кг направляється в середню ступінь (стан пари визначається точкою 14). Рідина, стан якої визначається точкою 15, в кількості $(1-x_{10})(1-x_{13})$ дроселюється в дросельному вентилі ДР1 (процес 15-16), при цьому утворюється $(1-x_{10})(1-x_{13})x_{16}$ кг пари стану 17, яка йде на всмоктування в компресор низького ступеня ПК1, і $(1-x_{10})(1-x_{13})(x_{16}-1)$ кг твердого діоксиду вуглецю в стані 18, котрий виводиться з машини за допомогою льодогенератора ЛГ [5].

На всмоктування компресора низького ступеня додається $(1-x_{10})(1-x_{13})(x_{16}-1)$ кг пари ззовні, замість видаленої твердої фази [5].

Контрольні запитання

1. Пояснити причини переходу до багатоступінчастого стиснення
2. Навести основні методи визначення проміжного тиску
3. Обґрунтувати вибір проміжного тиску з умови мінімальної сумарної роботи компресора
4. Пояснити вибір проміжного тиску з умови максимального теоретичного холодильного коефіцієнта
5. Проаналізувати роботу двоступінчастої холодильної машини зі змійовиковою посудиною і неповним проміжним охолодженням
6. Проаналізувати роботу холодильної машини зі змійовиковою проміжною посудиною та повним проміжним охолодженням
7. Проаналізувати роботу двоступінчастої холодильної машини з теплообмінниками
8. Проаналізувати роботу двоступінчастої холодильної машини з проміжним відбором пари з одноступінчастим гвинтовим компресором
9. Проаналізувати роботу двоступінчастої холодильної машини з неповним проміжним охолодженням

10. Проаналізувати роботу двоступінчастої холодильної машини з повним проміжним охолодженням
11. Проаналізувати роботу двоступінчастої холодильної машини з двома випарниками
12. Проаналізувати роботу парової холодильної машини з одноступінчастим компресором і пароструменевим апаратом
13. Проаналізувати роботу трьохступінчастої холодильної машини з повним проміжним охолодженням
14. Проаналізувати роботу вуглекислотної холодильної машини

7. КАСКАДНІ ХОЛОДИЛЬНІ МАШИНИ

7.1 Сфера застосування каскадних холодильних машин

Каскадні холодильні машини – це доцільний вибір у випадках, коли температура випаровування дуже низька (нижче -60°C), коли тиски конденсації є такими, що, в раціональних границях, один і той же холодоагент має високий питомий об'єм при дуже малих температурах, що вимагають великих компресорів. Тиск випаровування може бути нижче атмосферного, що може спричинити проникнення в систему вологи та повітря. Іншими словами, коли різниця температур середовища, яке повинно бути охолоджене та навколишнього середовища є надто високою щоб, працювати з одним холодоагентом, доцільно використовувати різні холодоагенти на різних стадіях [1].

Отже, в каскадних холодильних машинах використовується дві (чи декілька) робочих речовин. Одна з них – робоча речовина високого тиску (низькотемпературна робоча речовина). Як вже зазначалося, це пов'язано з тим, що теоретичний об'єм компресора, що працює при низькому тиску значно більший, ніж у компресорів, що працюють при більш високому тиску. Так, наприклад, в двоступінчастих холодильних машинах це відношення становить 3–4 і чим нижчий тиск, тим більший теоретичний об'єм компресора першого ступеня, а це веде до зростання капітальних витрат, збільшує потужність тертя компресора. Крім того, при зниженні тиску всмоктування, газодинамічні втрати в клапанах стають близьким за порядком до роботи стиснення компресора. Це також погіршує енергетичну ефективність холодильної машини. Одним з методів зниження теоретичного об'єму компресорів низького ступеня та потужності приводу компресора є використання робочих речовин низького тиску. Однак, при температурі навколишнього середовища тиск конденсації у таких робочих речовин надмірно високий, тому використання їх в циклах двоступінчастих чи

трьохступінчастих холодильних машин ускладнено. Тому такі робочі речовини застосовують лише в каскадних холодильних машинах [5].

7.2 Найпростіша каскадна холодильна машина

Схема і цикл такої холодильної машини показані на рисунках 7.1 та 7.2. Машина складається з двох одноступінчастих холодильних машин, які називаються верхньою і нижньою гілками каскаду. В нижній гілці каскаду використовується робоча речовина високого тиску, отримуючи теплоту у випарнику В від охолоджуваного середовища, кипить (процес 4-1), пара стикається в компресорі ПК2 (процес 1-2), охолоджується і конденсується в конденсаторі-випарнику КВ (процес 2-3), а потім дроселюється в дросельному вентилі ДР2 (процес 3-4) [5].

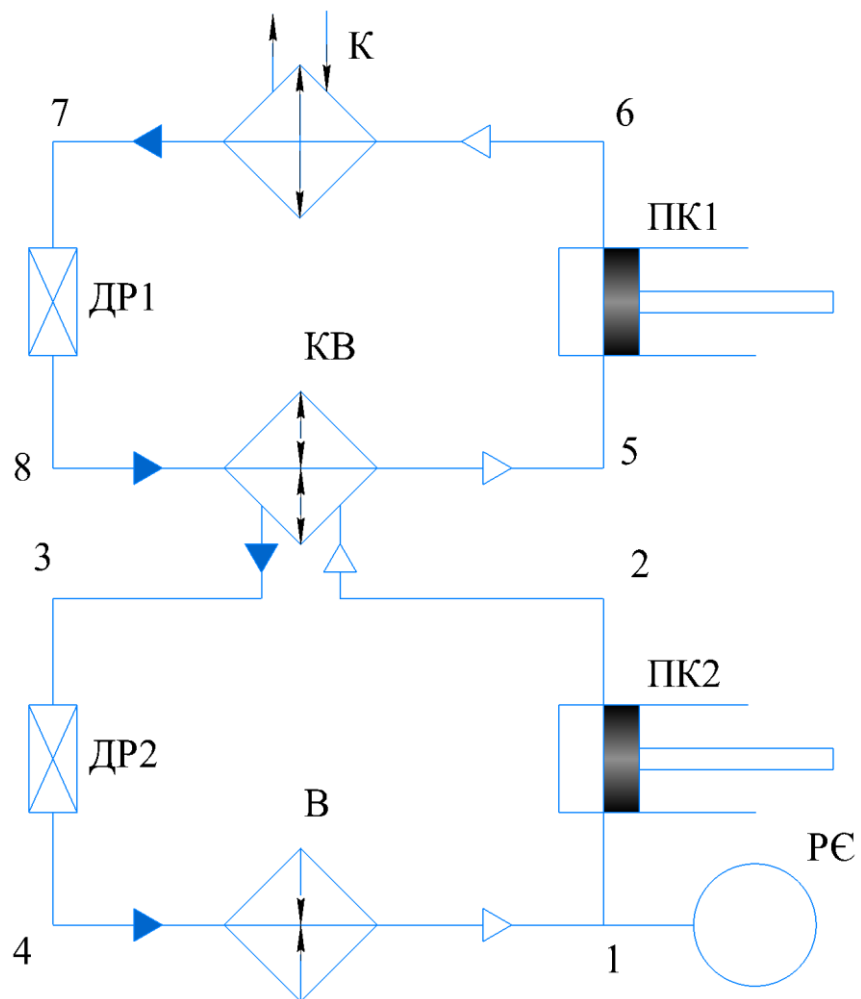


Рисунок 7.1 – Схема найпростішої каскадної машини

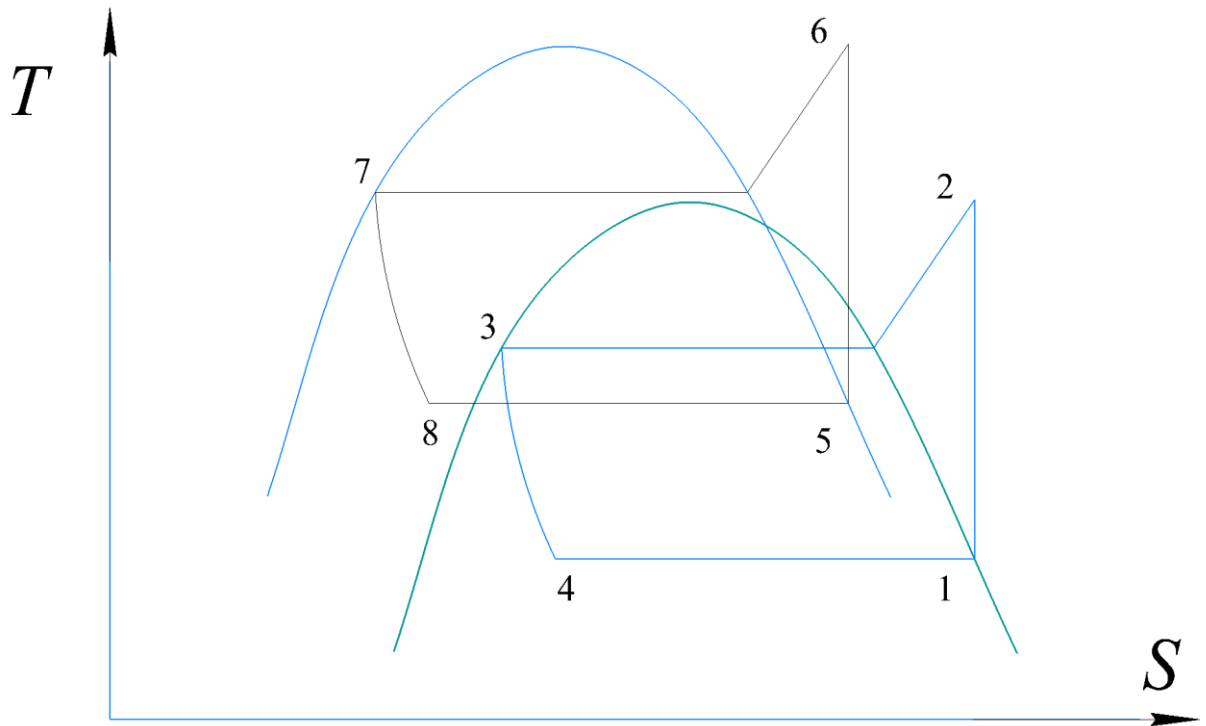


Рисунок 7.2 – T - s діаграми в гілках найпростішої каскадної холодильної машини

Теплота конденсації робочої речовини відбирається робочою речовиною холодильної машини верхньої гілки каскаду – як правило, це робоча речовина середнього тиску, яка кипить в конденсаторі-випарнику. Пара робочої речовини верхньої гілки каскаду стискується компресором ПК1 (процес 5-6), потім робоча речовина верхньої речовини каскаду направляється в конденсатор К (процес 7-8), дроселюється в дросельному вентилі ДР1 (процес 7-8) і поступає в конденсатор-випарник. Таким чином, робоча речовина в машині нижнього ступеня каскаду здійснює цикл 1-2-3-4, а у верхній гілці каскаду – цикл 5-6-7-8, і ці машини об'єднані конденсатором-випарником [5].

7.3 Каскадна холодильна машина з теплообмінниками

На рисунку 7.3 - 7.5 показані схема та цикл холодильної машини з теплообмінниками. Ця машина призначена для роботи при температурах

кипіння від -70°C до -90°C . В нижній гілці каскаду застосовується фреон R13. Пара робочої речовини виходить з випарника В у стані 8, поступає в теплообмінник ТО1, де перегрівається до температури $-50^{\circ}\text{C} \dots -30^{\circ}\text{C}$ (процес 8-9) за рахунок більш теплої рідини, що йде з конденсатора-випарника КВ. Подальше перегрівання до стану 1 (температури $-15^{\circ}\text{C} \dots 0^{\circ}\text{C}$) відбувається в теплообміннику ТО2 за рахунок гарячої пари, що йде з компресора нижньої гілки каскаду ПК1. Це перегрівання веде до збільшення роботи з компресора, але, з іншого боку, відбувається зменшення теплового потоку на конденсатор-випарник, що веде до деякого зниження температури кипіння в верхній гілці каскаду та температури конденсації в нижній гілці каскаду. Застосування теплообмінника ТО2 має сенс лише в тому випадку, якщо встановлений теплообмінник ТО3, котрий охолоджується водою. В іншому випадку зростає тепловий потік на конденсатор-випарник через зменшення роботи стиснення більше перегрітої пари. Перегрівання парів робочої речовини в теплообміннику ТО2 покращує температурний режим роботи компресора, оскільки всмоктування в компресор пари з низькою температурою може призвести до температурних деформацій деталей компресора [5].

Доцільність теплообмінника ТО1 пояснюється тим, що в цьому теплообміннику за рахунок холодної пари охолоджується рідка робоча речовина перед дросельним вентилям, а це збільшує питому холодопродуктивність і зменшує необоротні втрати циклу. Щоправда, за наявності такого теплообмінника виникають деякі експлуатаційні труднощі, наприклад, закипання рідини від контакту з теплою парою, що йде з випарником в період пуску. Однак це явище суттєво не збільшується в період пуску [5].

Таким чином, виключити теплообмінник ТО1 зі схеми недоцільно. У верхній гілці каскаду застосовують фреон R22. Цей каскад представляє собою одноступінчасту холодильну машину з регенеративним теплообмінником. Для того, щоб під час простою тиск в машині нижньої гілки каскаду надмірно не збільшувався, в схемі передбачена розширювальна ємність РС [5].

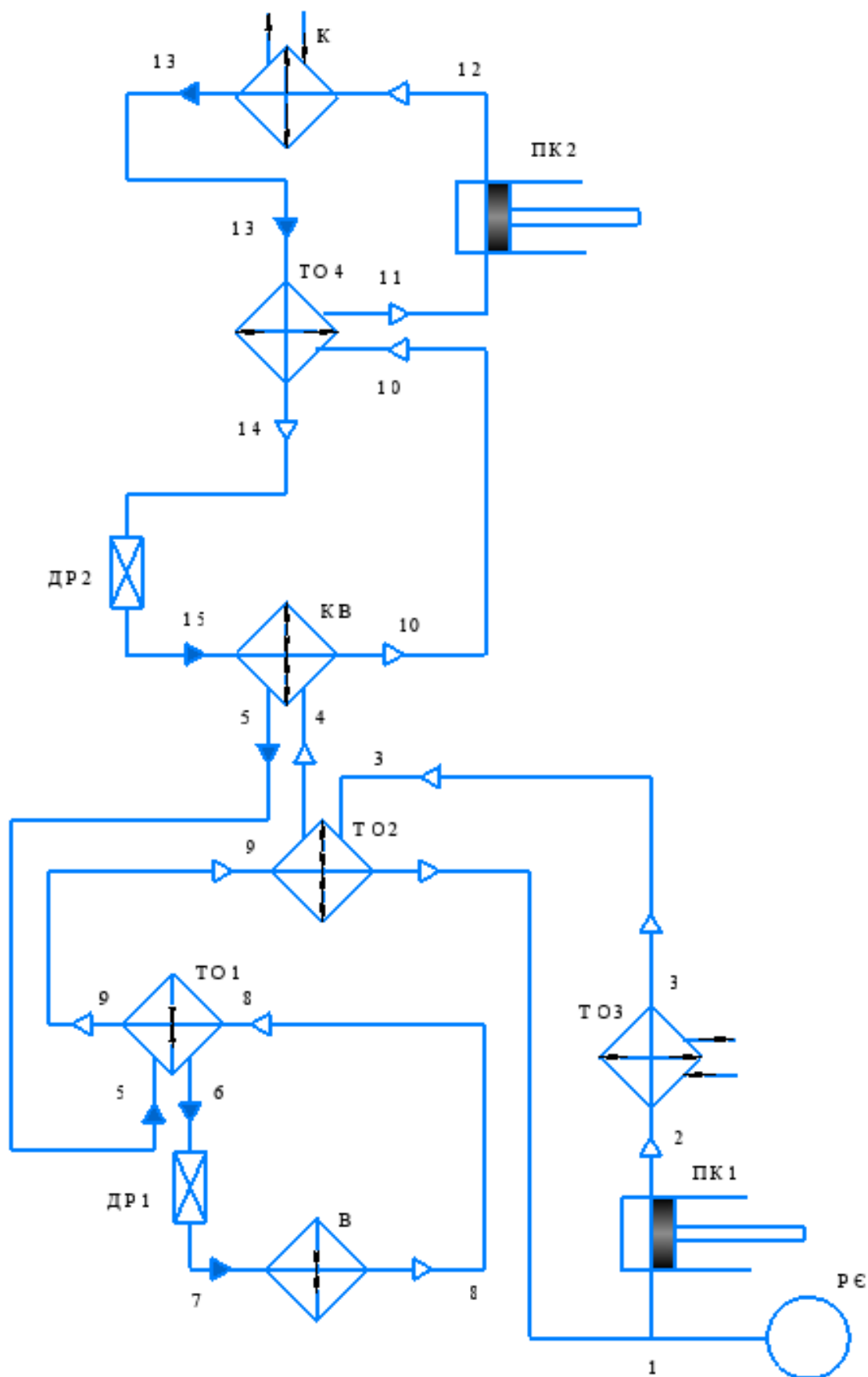


Рисунок 7.3 – Схема каскадної холодильної машини з теплообмінниками

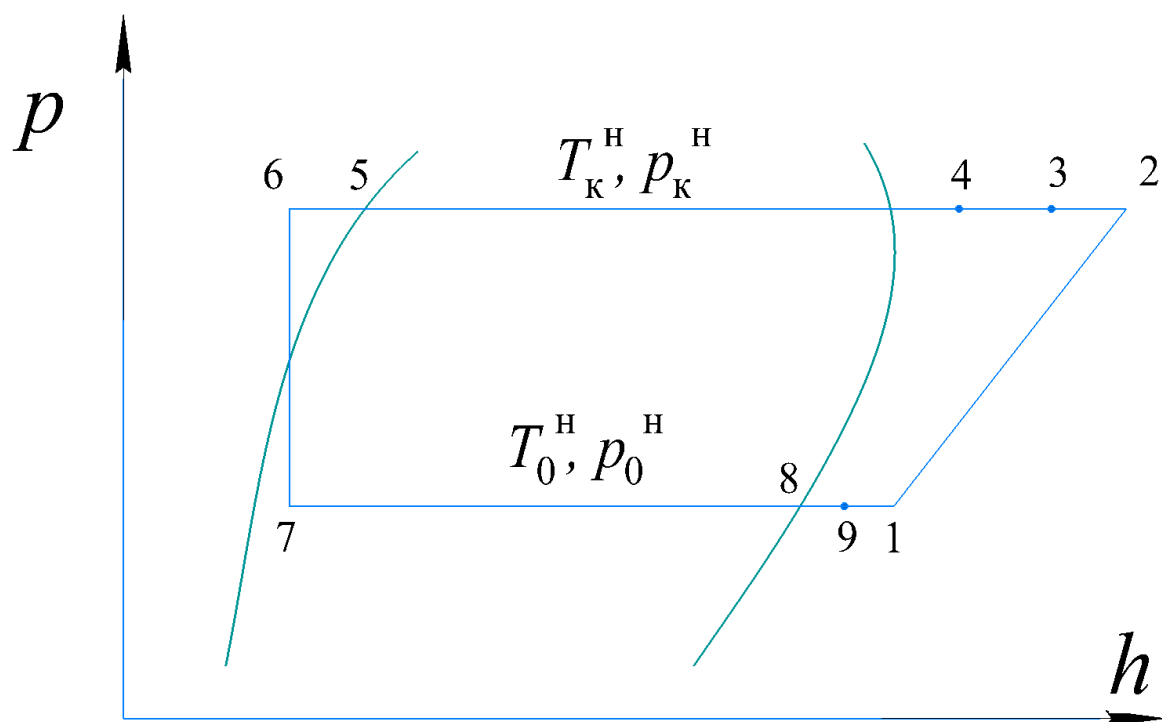


Рисунок 7.4 – $P-h$ діаграма нижньої гілки каскадної холодильної машини з теплообмінниками

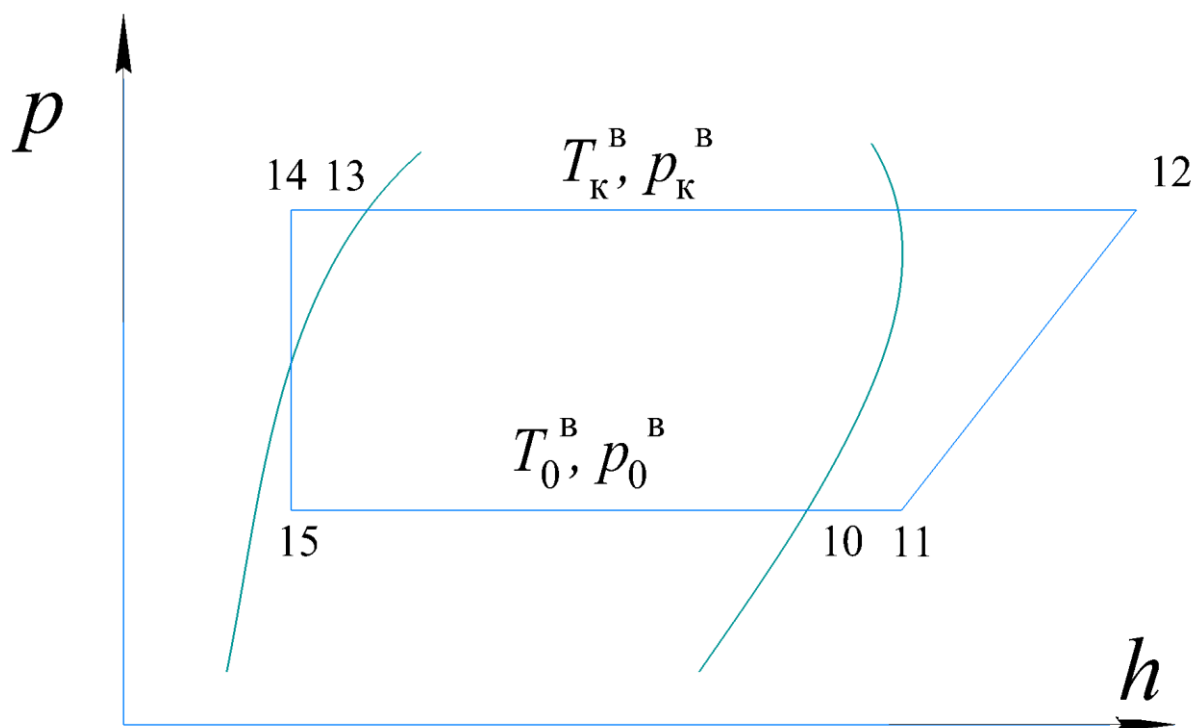


Рисунок 7.5 – $P-h$ діаграма верхньої гілки каскадної холодильної машини з теплообмінниками

Як видно з рисунків 7.3–7.5, схема каскадної машини складніша, ніж розглянуті в розділі 6 схеми двоступінчастих холодильних машин. Складність схеми та наявність конденсатора випарника є недоліком каскадних машин: з одного боку конденсатор-випарник значно збільшує вартість машини, а з другого, як вже зазначалося раніше, через наявність необоротності в процесі теплообміну знижується коефіцієнт оборотності циклу, тобто зростають експлуатаційні витрати [5].

Контрольні запитання

1. Охарактеризувати сферу застосування каскадних холодильних машин
2. Пояснити принцип роботи найпростішої каскадної машини
3. Проаналізувати роботу каскадної холодильної машини з теплообмінниками

8. ІНШІ ХОЛОДИЛЬНІ СИСТЕМИ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ В ПРОМИСЛОВОСТІ

8.1 Абсорбційні холодильні системи

В промисловості використовуються дві основні абсорбційні холодильні системи: бромід літію-вода та аміак-вода. Застосування системи бромід літію – вода обмежена температурами замерзання (тобто може працювати при вищих температурах) оскільки в якості холодоагенту використовується вода. В той же час в системі вода-аміак – холодоагентом є аміак, який відповідно може бути застосований для нижчих температур [1].

Цикл з бромідом літію одиничного ефекту та непрямой дії показаний на рисунку 8.1.

Машина містить п'ять основних компонентів [1]:

Випарник – це теплообмінник, де холодоагент (вода) випаровується (будучи розпиленим над трубами) через низький тиск в посудині. Внаслідок випаровування, охолоджується вода в середині труб, яка нагрівається від зовнішньої системи, що охолоджується.

Абсорбер – це компонент, де міцний абсорбційний розчин використовується для поглинання парів води, виділеної у випарнику. Насос розчину розпилює бромід літію над трубною секцією абсорбера. Прохолодна вода проходить крізь труби приймаючи холодильне навантаження, теплоту розведення, теплоту для охолодження сконденсованої води та теплоту для охолодження розчину.

Теплообмінник використовується для покращення ефективності циклу, зменшуючи споживання пари та сконденсованої води.

Генератор – це компонент, де теплота вноситься у систему в трубному просторі та використовується для відновлення концентрації розчину шляхом випаровування парів води, поглинутих в абсорбері.

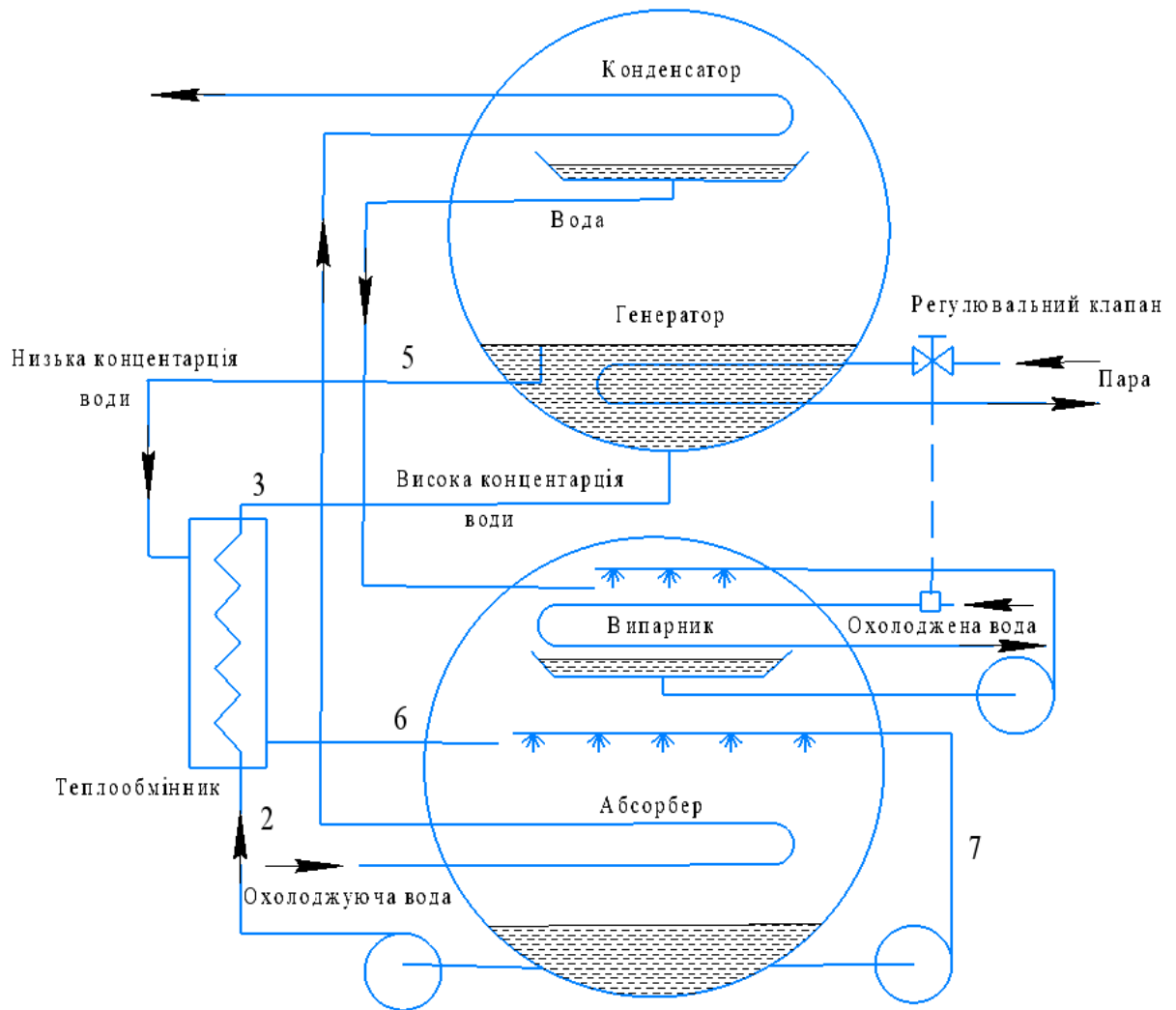


Рисунок 8.1 – Цикл двокорпусної абсорбційної холодильної установки системи бромід літію – вода

Конденсатор – це елемент, де пара, випарювана в генераторі, конденсується, внаслідок чого отримують чисту воду (холодоагент) для завантаження до випарника.

Теплота, що подається до генератора випаровує слабкий (розбавлений) розчин абсорбенту з протилежного боку труб. Випарювана вода конденсується зовні труб конденсатора. Вода, що використовується для охолодження конденсатору, зазвичай охолоджується в охолоджуючих баштах (градирнях). Конденсатор та генератор розташовані в одній посудині, в якій підтримується абсолютний тиск 6 кПа. Конденсат води проходить через крапельловлювач та потрапляє у випарник. Холодоагент (вода) кипить у трубах випарника та

охолоджує потік води, що вносить холодинне навантаження. Холодоагент, що не випаровувався, тече до циркуляційного насоса для подальшого розпилення над трубами випарника. Розчин з високою концентрацією води, входить у генератор, де випаровується вода та зростає концентрація бромиду літію. Отриманий міцний розчин абсорбенту (розчин з низькою концентрацією води) виходить з генератора та подається до теплообмінника. Тут потік з високою концентрацією води, що тече до генератора, охолоджує потік розчину з низькою концентрацією, що тече до вторинної посудини. Розчин з низькою концентрацією води розподіляється над абсорбційними трубами. Абсорбер та випарник розташовані в одній посудині, тому холодоагент випаровується у трубах випарника та легко абсорбується розчином абсорбенту. Тиск у другій посудині в ході роботи становить 7 кПа (абсолютний). Теплота абсорбції та розбавлення вилучається охолоджуваною водою. Результуючий розчин з високою концентрацією подається через теплообмінник до генератора, завершує цикл. Теплообмінник збільшує ефективність системи попереднім нагріванням, тобто, зменшує кількість теплоти, яка повинна бути додана до висококонцентрованого розчину води перед тим, як він почне випаровуватися в генераторі [1].

Робота абсорбційної машини аналізується з використанням діаграми рівноваги бромід-літію-вода, яка показано на рисунку 8.2. Тиск пари побудований як функція від масової концентрації бромиду літію в розчині. Відповідна температура насичення для даного тиску пари показана на лівому боці діаграми. Лінія в нижньому правому куті є лінією кристалізації. Вона показує точку, в якій розчин почне змінюватися від рідини до твердого тіла, і це є границею циклу. Якщо розчин стає пересиченим, цикл абсорбції буде перерваний через кристалізацію та потужність не буде відновлена, доки установка не буде очищена від твердого матеріалу. Це, зазвичай, потребує додавання теплоти до зовнішнього боку теплообмінника та нагнітання розчину насосом [1].

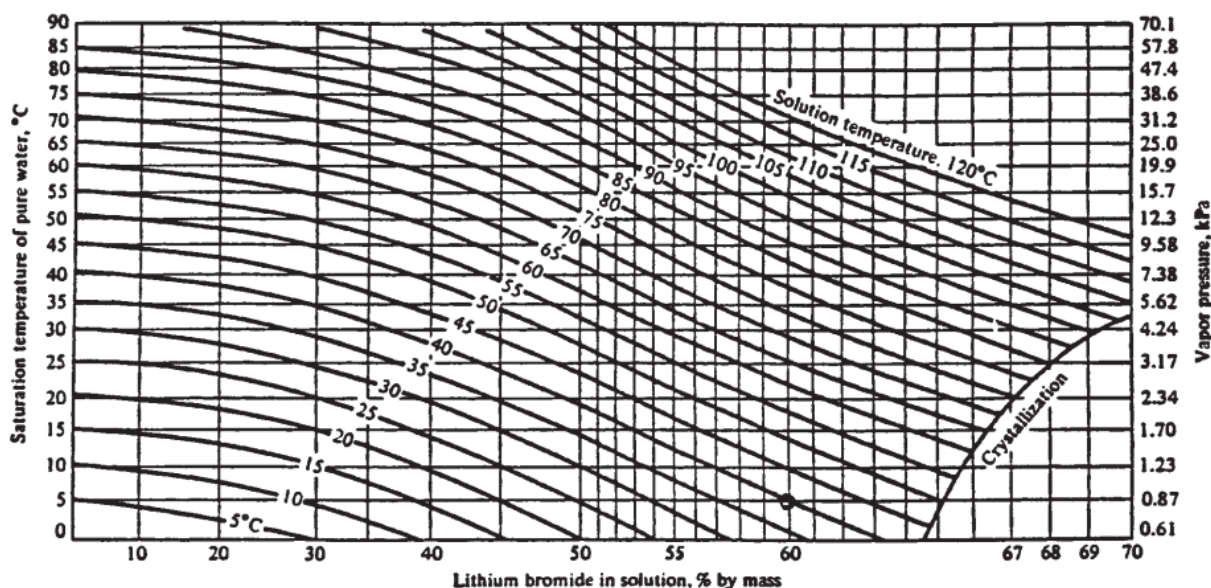


Рисунок 8.2 – Діаграма температура-тиск-концентрація насиченого розчину броміду літію у воді [1]

Діаграма на рисунку 8.3 представляє дані ентальпії для розчину броміду літію в воді, які необхідні для теплових розрахунків циклу. Ентальпії для води та водяної пари можуть бути визначені з таблиць властивостей води. Дані на рисунку 8.3 можуть бути застосовані для насиченого або переохолодженого розчину та ґрунтуються на нульовій ентальпії рідкої води при 0°C та нульовій ентальпії твердого броміду літію при 25°C. Оскільки нульова ентальпія для води в розчині є такою ж як в традиційних таблицях властивостей води, таблиці властивостей води можуть бути використані в поєднанні з діаграмою на рисунку 8.3 [1].

Холодильний коефіцієнт абсорбційного циклу визначається за тим же самим принципом, що для парокompресійних машин, тобто відношенням кількості теплоти, що відбирається (корисний ефект) до кількості теплоти, що подається в генератор (витрати енергії) [1]:

$$\varepsilon_{\text{abs}} = \frac{Q_0}{Q_{\text{gen}}} \quad (8.1)$$

Але слід відзначити, що в знаменнику для ε_{abs} стоїть теплота, тоді як для парокompресійного холодильного циклу – робота. Оскільки ці дві форми

енергії не еквівалентні, ϵ_{abs} не такий низький (0,6-0,8) як він здається порівняно з ϵ для парокompресійних машин (2,5–3,5) [1].

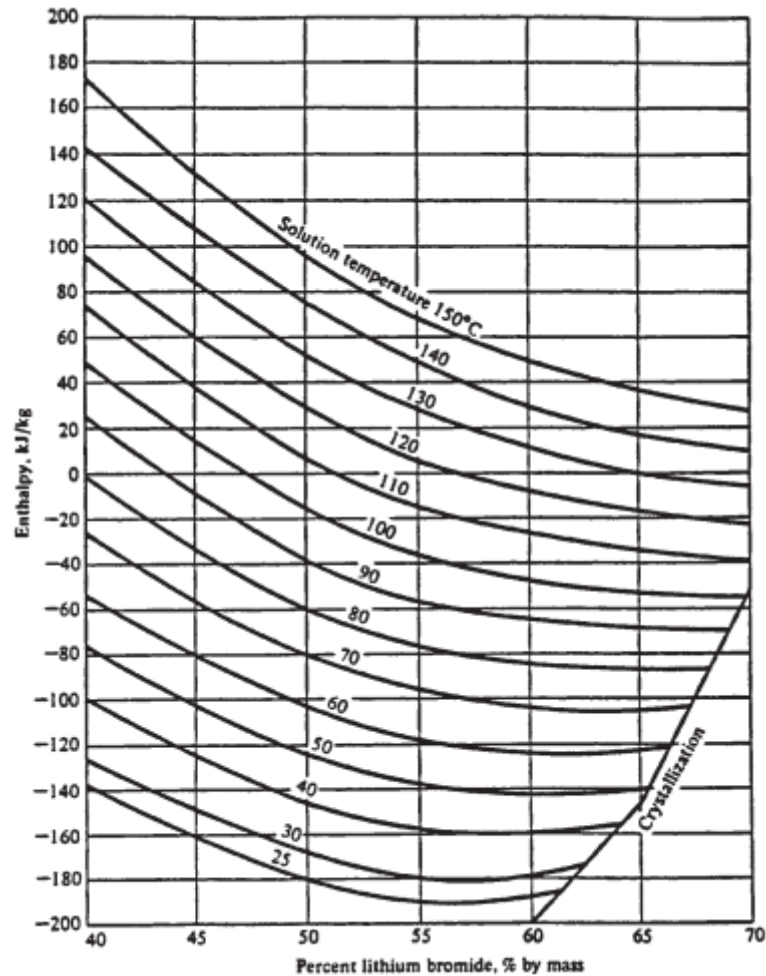


Рисунок 8.3 – Ентальпія для розчину броміду літію у воді

Абсорбційна установка з подвійним ефектом показана на рисунку 8.4. Всі основні компоненти та робота двостадійної абсорбційної машини аналогічні до одностадійної машини. Перший генератор, розташований в посудині 1, використовує зовнішнє джерело теплоти для випаровування води з розбавленого розчину абсорбенту (висока концентрація води). Пара води самочинно тече до генератора II, де вона конденсується на трубах. Проміжний розчин абсорбенту (LiBr) з генератора I буде проходити через теплообмінник на шляху до генератора II, де він нагрівається за рахунок конденсації водяної пари. Дросельний клапан зменшує тиск з посудини 1 (близько 103 кПа (абсолютного)) до тиску в посудині 2. Після зменшення тиску певна кількість

води в розчині переходить в пару, яка зріджується в конденсаторі. В високотемпературному теплообміннику проміжний розчин нагріває потік слабого (висока концентрація води) розчину з низькотемпературного теплообмінника. В низькотемпературному теплообміннику міцний розчин охолоджується перед тим, як потрапити в абсорбер. Тиск в абсорбері такий самий, як у випарнику. Двостадійна абсорбційна холодильна установка дозволяє досягти вищих значень холодильного коефіцієнтів, ніж одностадійна [1].

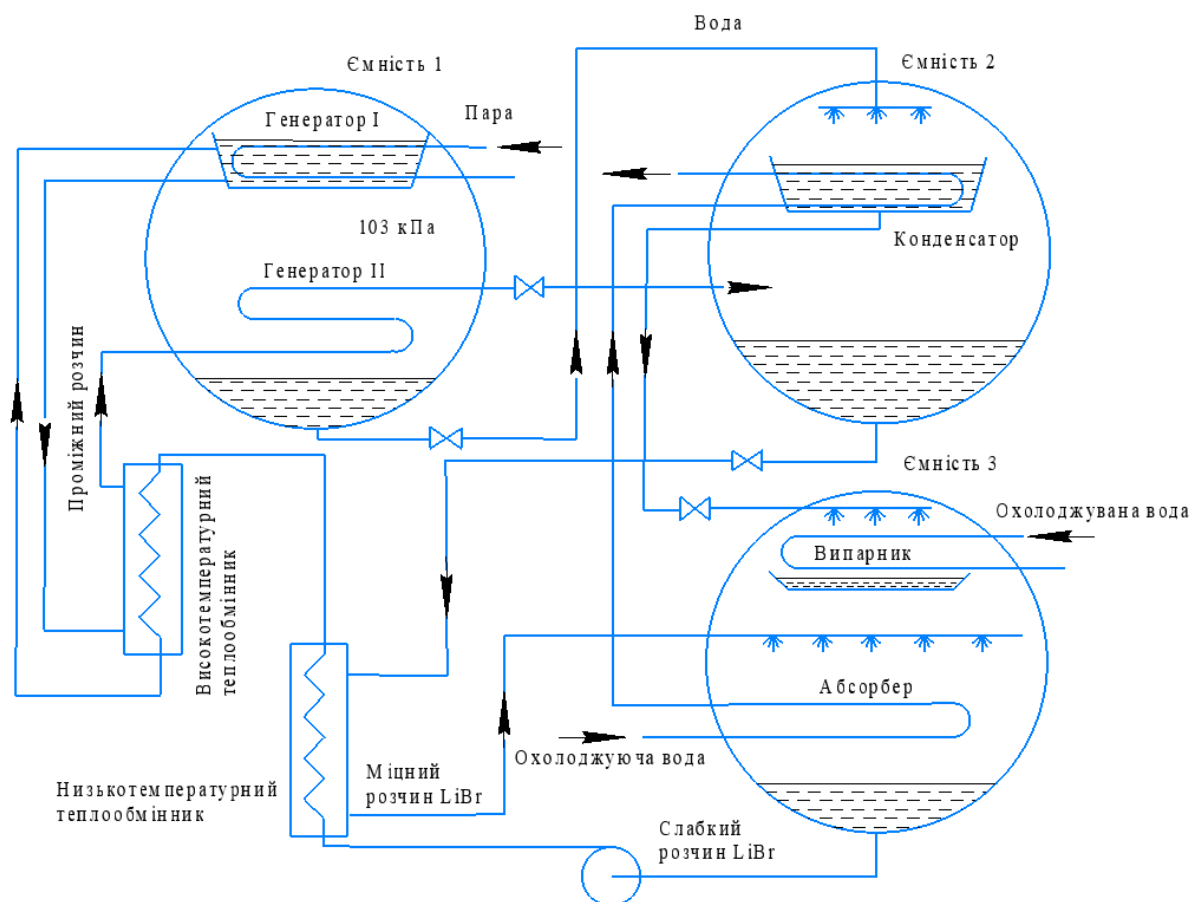


Рисунок 8.4 – Двостадійна абсорбційна установка

Аміачно-водна абсорбційна система екстенсивно використовувалася до 1950-х, коли почали розвиватися установки на основі системи бромід літію - вода. Рисунок 8.5 показує спрощену схему аміачно-водного абсорбційного циклу. Холодоагентом є аміак, та абсорбентом є розбавлений водний розчин аміаку. Система аміак-вода використовує різне обладнання порівняно з системою вода-бромід літію, що є основною відмінністю. Вода (тут абсорбент)

є також легкою, тому регенерація слабого водного розчину до сильного водного розчину здійснюється фракційною дистиляцією. Різні холодоагенти (аміак) спричиняє відмінні, значно вищі тиски: близько 1100-2100 кПа (абсолютний) в конденсаторі [1].

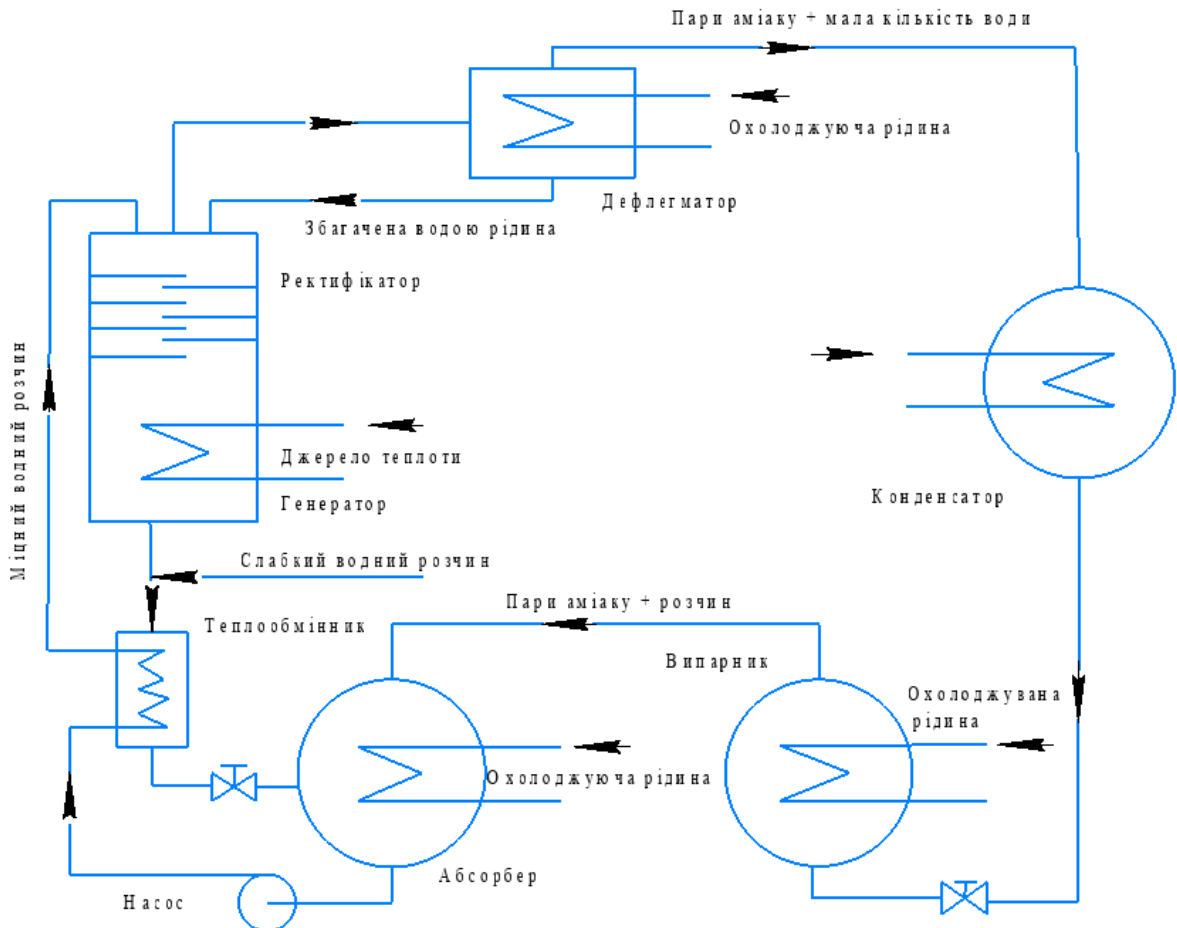


Рисунок 8.5 – Спрощений аміачно-водний абсорбційний цикл

Пара аміаку з випарника та слабкий водний розчин з генератора контактують в абсорбері з утворенням міцного водного розчину. Міцний водний розчин далі розділяється в ректифікаційній установці, в результаті чого утворюється аміак з деяким вмістом парів води та дуже міцний водний розчин в кубі, який також називається генератором. В генератор поступає теплота від зовнішнього джерела, внаслідок чого випаровується аміак та слабкий розчин повертається до абсорбера. На шляху до абсорбера потік слабого розчину проходить крізь теплообмінник, нагріваючи міцний розчин

з абсорбера на шляху до ректифікаційної установки. Інший потік, переважно пари аміаку, але з деяким вмістом парів води рухаються до конденсатора. Щоб вилучити воду так сильно, наскільки це можливо, пара з ректифікаційної установки проходить крізь дефлегматор, де додатково охолоджується. Після дефлегматора пари аміаку з невеликим домішками води проходять крізь конденсатор, де конденсуються та охолоджуються, далі дроселюються і потрапляють у випарник, де киплять, відбираючи теплоту від охолоджуваного середовища. Після цього, пари аміаку повертаються в абсорбер і цикл повторюється [1].

Аміачно-водний модуль може бути організований для одностайної чи каскадної двостадійної роботи. Перевагою двостадійної роботи є те, що вона створює можливість утилізації лише частини теплоти на вищому та залишок на нижньому температурному рівні, але зростає величина капітальних витрат та витрати теплоти [1].

Аміачно-водні та бромідно літієво-водні системи працюють з порівняними ККД. Аміачно-водні системи здатні досягати температур випаровування нижче 0°C , оскільки холодоагентом є аміак. Перевагою бромідно літієво-водних систем є те, що вони потребують менше обладнання та працюють при нижчих тисках. Але це також може бути недоліком, оскільки тиск нижчий за атмосферний, що спричиняє інфільтрацію повітря в систему, яка повинна періодично очищатися. Через проблеми з корозією в системах бромід літію-вода повинні бути використані спеціальні інгібітори. Інфільтрація повітря в системах аміак-вода також можлива, але коли температура випаровування нижче -33°C . Це може призвести до утворення корозійно активного карбонату амонію [1].

8.2 Пароструменеві (ежекторні) системи

В таких системах механічні компресори замінюються ежекторами. Оскільки холодоагентом є вода, підтримка температур, нижче за навколишню

середовище вимагає, щоб тиск води у випарнику був меншим за атмосферний. Типова схема пароструменевого холодильного циклу показана на рисунку 8.6 [1].

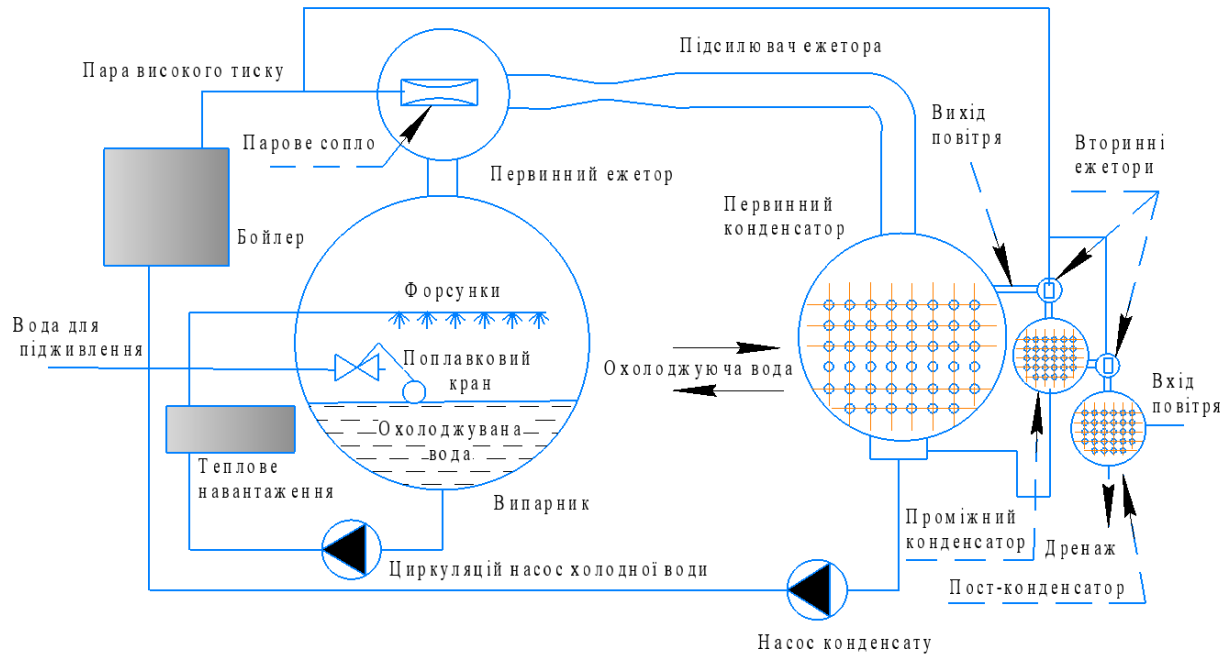


Рисунок 8.6 – Ежекційний (пароструменевий) холодильний цикл (з конденсатором поверхневого типу)

Основними компонентами пароструменевих холодильних систем є [1]:

1. *Основний паровий ежектор*. Кінетичний пристрій, який використовує кількість руху високошвидкісного сопла, щоб приймати та пришвидшувати середовище, що рухається повільніше і направляється в пристрій. Потік високого тиску подається в сопло ежектора. Пара розширюється, в той час як протікаючи через сопло швидкість різко зростає. Швидкість потоку на виході з сопла близько 1200 м/с. Через таку високу швидкість, свіжа пара з ємності неперервно прямує до рухомого потоку. Суміш парів після цього входить в секцію дифузора, де швидкість поступово зменшується через зростання площі поперечного перерізу. Енергія високошвидкісного потоку стискає пару при її проходженні через дифузор, збільшуючи її температуру вище температури конденсатора охолоджуючої води [1].

2. *Конденсатор.* Компонент системи, де пара конденсується та вилучається теплота. Кількість вилученої теплоти становить [1]:

$$Q_{\text{cond}} = (W_s + W_w)r \quad (8.2)$$

де Q_{cond} – вилучена теплота, кВт;

W_s – масова витрата первинної пари, кг/с

W_w – масова витрата затягнутих парів, кг/с

r – питома теплота пароутворення, кДж/кг.

Конструкція конденсатора, площа поверхні та якість охолоджуючої води повинні визначатися, ґрунтуючись на найвищій температурі охолоджуючої води, яка імовірно може виникати. Якщо вхідна температура охолоджуючої води вища за проектну, первинний прискорювач (ежектор) може перестати функціонувати, через зростання тиску в конденсорі [1].

Можуть бути використані два типи конденсаторів: поверхневі конденсатори (показані на рисунку 8.6) та барометричні струменеві конденсатори (рисунок 8.7). Поверхневі конденсатори мають кожухотрубну конструкцію з подачею води в труби та конденсацією пари на зовнішній поверхні. В струменевих конденсаторах, конденсуюча вода та пара, що конденсується, безпосередньо змішуються, тому немає труб. Струменевий конденсатор може бути барометричного чи низькорівневого типу. Барометричний конденсатор потребує висоту труби в 10 м вище рівня води в ємності гарячої води. Необхідна стічна труба такої висоти, щоб конденсаційна вода та конденсат могли стікати під дією гравітації. В низькорівневих струменевих конденсаторах стічна труба усунена, і виникає необхідність вилучати конденсаційну воду та конденсат нагнітанням з конденсатора до ємності гарячої води. Основною перевагою струменевого конденсатора є низькі витрати на обслуговування з відсутністю труб, та той факт, що вода для конденсації може використовуватися з різним ступенем чистоти [1].

3. *Випарник.* Це випарники ежекторної системи та вони зазвичай є посудинами великого об'єму, де великі поверхні води необхідні для

ефективної охолоджуючої дії при випаровуванні. Тепла вода, що повертається з процесу, розпилюється в випарній камері через форсунки (іноді необхідний каскад для мінімізації контактної поверхні, які менш чутливі до проблеми перевантаження) та охолоджений залишок перекачується з дна до форсунок [1].

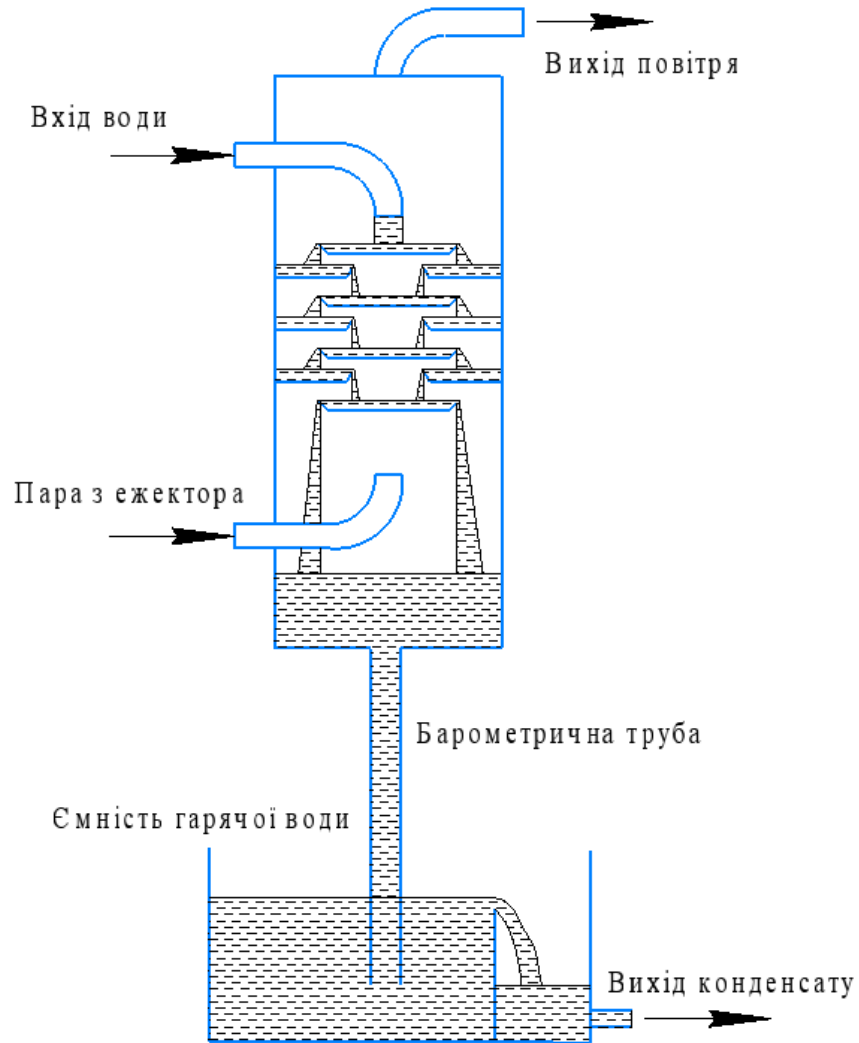


Рисунок 8.7 – Барометричний конденсатор для пароструменевої системи

При перекритті подачі пари на один ежектор групи, необхідно вживати заходів для уникнення вирівнювання тиску в конденсаторі та випарній ємності зі значенням тиску в ежекторі. Для таких цілей іноді використовують випарну ємність, розділену на частини. За цією схемою, забезпечується розділення так, що кожне сопло працює зі своєю власною ємністю для випарювання [1].

Поплавковий клапан встановлюється для контролю подачі промивної води для заміни випаровуваної. Випарник повинен бути ізольований [1].

8.2.1 Застосування

Пароструменеве охолодження прийнятне до практичного застосування у таких випадках [1]:

1. Процесів, де пряме випаровування використовується для концентрації або висушування теплочутливих харчових та хімічних продуктів, де окрім усунення теплообмінника, важливою перевагою є збереження якості продукту.

2. Там, де дозволяється використання жорсткої чи навіть морської води для вилучення теплоти, наприклад для адсорбції газів (CO_2 , SO_2 , ClO_2 ...) в охолоджуваній воді (десорбція забезпечується одночасно з охолодженням), коли використовується барометричний конденсатор прямої дії.

Незважаючи на те, що вони прості, міцні, надійні, дешеві у обслуговуванні, та не мають вібрацій, пароструменеві системи не мають широкого використання для охолодження води для кондиціонування повітря через характеристики циклу [1].

8.1.2 Фактори, що впливають на холодопродуктивність

Ежекторні (пароструменеві) установки стають економічно привабливими, коли відбувається охолодження відносно високотемпературної охолоджувальної води з джерелом скидної пари з тиском біля 7 бар (0,7 МПа) та використовується відносно прохолодна вода для конденсації. Фактори, пов'язані з холодопродуктивністю пароструменевих установок, включають такі [1]:

1. *Тиск пари.* Основне сопло може працювати з тисками пари від 0,15 бар (0,015 МПа) до 7 бар (0,7 МПа) надлишку. Кількість необхідної пари різко зростає зі зниженням тиску пари (рисунок 8.8). Найкраще відношення пари досягається з тиском біля 7 бар (0,7 МПа). Вище цього тиску зміна в кількості

необхідної пари стає практично нехтовною. Ежектори повинні бути сконструйовані для найвищих доступних тисків пари, щоб мати перевагу меншого споживання тиску для різних вхідних тисків пари.

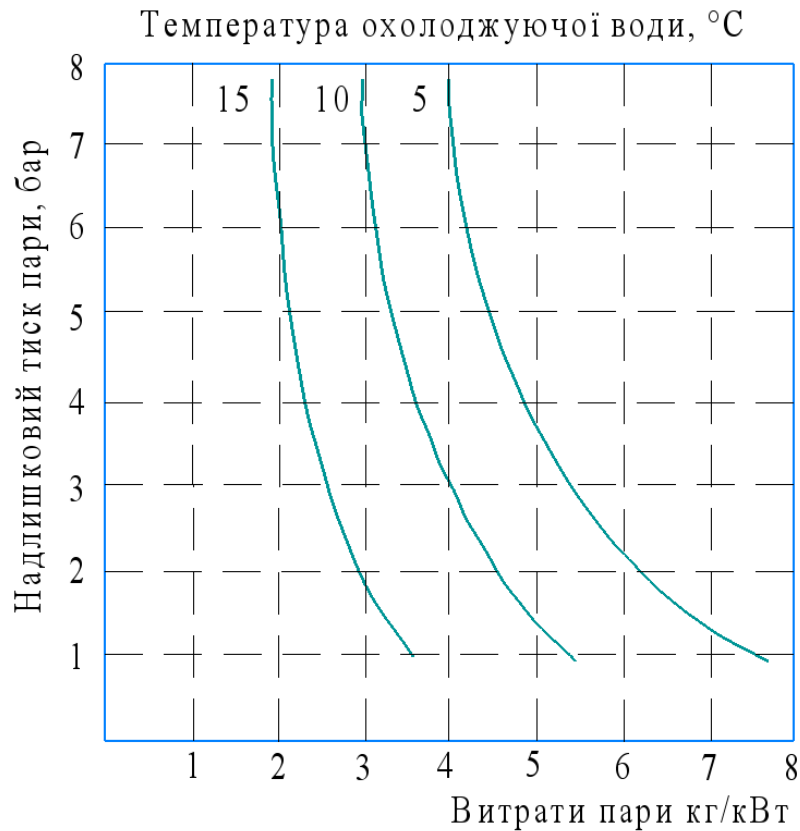


Рисунок 8.8 – Вплив тиску пари на витрати пари при температурі конденсації 38°C [1]

Вторинна ежекторна система, що використовується для вилучення повітря, потребує тиску пари в 2,5 бар (0,25 МПа) або вище. Коли доступний тиск пари нижчий за цей, вакуум-насос з електричним приводом використовується як кінцевий вторинного ежектора, так і для всієї вторинної групи. Вторинний ежектор зазвичай вимагає 0,2-0,3 кг/год пари на кВт холодопродуктивності.

2. *Температура води для конденсації.* В порівнянні з іншими парокompресійними системами, пароструменеві машини вимагають відносно великих кількостей води для конденсації. Вища вхідна температура води вимагає більших витрат (рисунок 8.9). Тиск за температури конденсації води

має важливий вплив на кількість пари та на холодильний ефект, швидко зменшуючись з холоднішою температурою води для конденсації. Рисунок 8.10 представляє дані з кількості пари залежно від входу води для конденсації для даної температури охолоджуючої води та тиску пари.

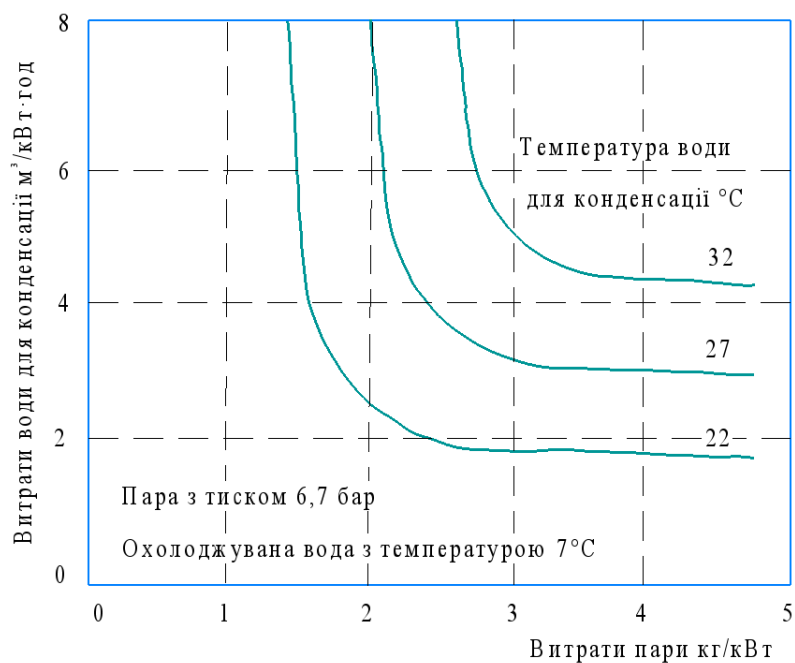


Рисунок 8.9 – Витрата пари залежно від витрат води для конденсації

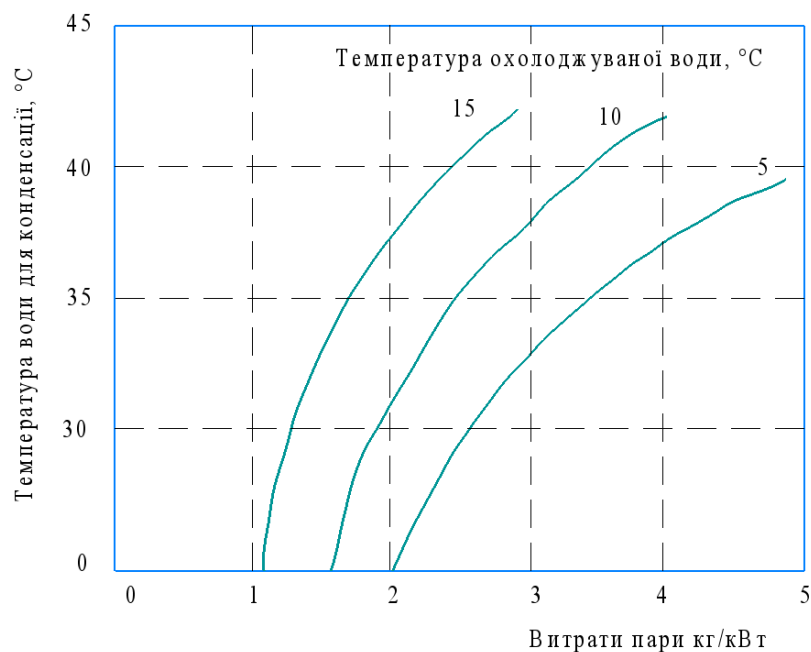


Рисунок 8.10 – Витрата пари як функція від температури охолоджуючої води для типової ежекторної системи

3. *Температура охолоджуючої води.* Якщо температура охолоджуючої води зменшується, відношення пара/охолоджуючий ефект також зменшується, отже збільшується температура конденсації та/або зростають витрати води для конденсації.

На відміну від інших холодильних систем, витрата охолоджуючої води не має особливого значення в конструкції ежектора, оскільки тут немає прямого теплообміну і жодного впливу швидкості у трубах випарника та відповідної різниці температур на інтенсивність теплообміну. Широкі варіації в температурі оборотної охолоджуваної води мають незначний вплив на ежекторне обладнання [1].

Контрольні запитання

1. Пояснити принцип роботи двокорпусної абсорбційної холодильної установки системи бромід літію – вода
2. Проаналізувати роботу двостадійної абсорбційна установка
3. Проаналізувати аміачно-водний абсорбційний цикл
4. Проаналізувати ежекційний (пароструменевий) холодильний цикл (з конденсатором поверхневого типу)
5. Проаналізувати особливості обладнання ежекційних циклів
6. Пояснити фактори, що впливають на холодопродуктивність ежекційних машин

9. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЛАДНАННЯ ХОЛОДИЛЬНИХ УСТАНОВОК

9.1 Компресори

Вони можуть класифікуватися за одним критерієм (шляхом, яким досягається зростання тиску) як компресори об'ємного принципу дії та динамічного типу, як показано на рисунку 9.1. Компресори об'ємного принципу дії (ОПД) – це машини, які збільшують тиск пари зменшенням об'єму камери. Типовими ОПД є поршневі (різних типів) або обертові як гвинтові (з одним та двома роторами), лопатеві, спіральні тощо. Відцентрові або турбокомпресори є машинами, де тиск збільшується шляхом перетворення деякої кількості кінетичної енергії, отриманої обертанням механічних елементів, які неперервно додають кутовий імпульс до стаціонарної течії рідини, аналогічно до вентиляторів чи насосів [1].

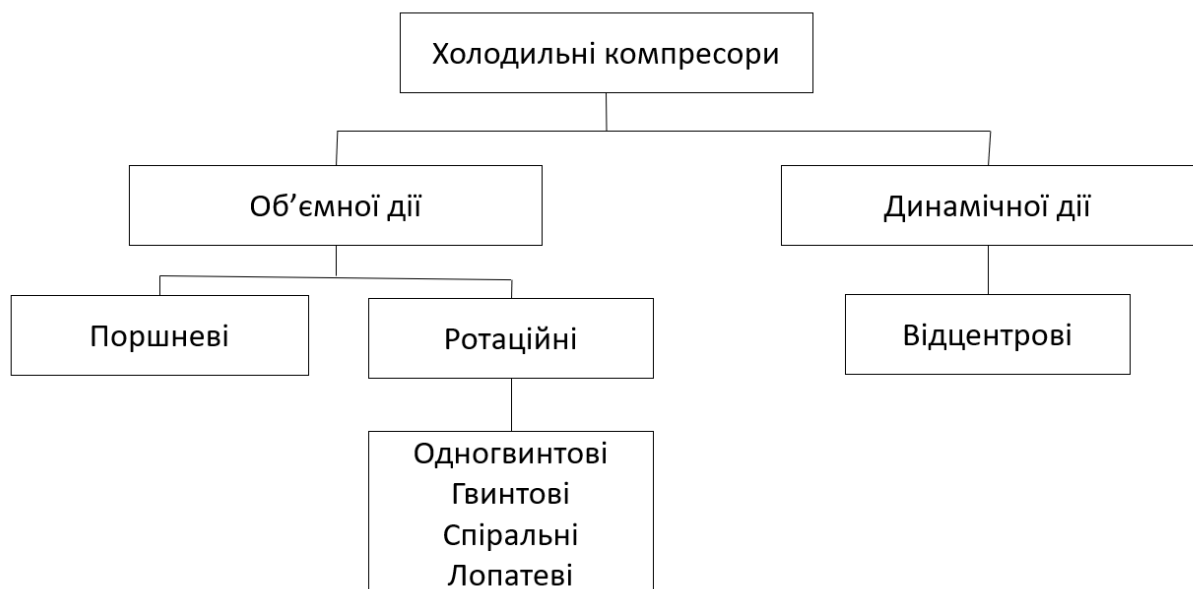


Рисунок 9.1 – Типи холодильних компресорів

У загальному випадку, поршневі компресори домінують в діапазоні холодопродуктивності до 300 кВт. Відцентрові компресори більш прийнятні для діапазону понад 500 кВт, тоді як гвинтові компресори є проміжними з

тенденцією наближатися до менших продуктивностей. Лопатеві та спіральні компресори використовуються в дуже вузькому діапазоні холодопродуктивностей (домашні холодильники та кондиціонери), хоча лопатеві компресори можуть знайти і промислове застосування. Часто, гвинтові компресори працюють як допоміжні, для базової установки, тоді як поршневі компресори забезпечують варіацію холодопродуктивності на високому ступені. Основною причиною таких конструктивних рішень є переважна робота гвинтових компресорів за більш повного завантаження в їх проектних умовах, тоді як поршневі компресори видаються такими, що мають вищу ефективність при частковому завантаженні, порівняно з гвинтовими [1].

Використовуючи інший критерій, компресори класифікуються як відкриті, напівгерметичні (доступні) або герметичні. Відкритий тип характеризується виведенням валу за межі компресора, де він з'єднаний з приводом. Коли електричний двигун знаходиться в тому ж самому корпусі з механізмом компресора, він може бути як герметичним, так і доступним (напівгерметичним). Герметичні компресори мають зварні камери, конструкцією яких не передбачений ремонт, і в загальному випадку виготовлені для малих продуктивностей (рідко понад 30 кВт), тоді як напівгерметичний або доступний тип розташований в корпусі, який скріплюється гвинтами. Напівгерметичні компресори мають всі переваги герметичних (немає ущільнених рухомих частин, втрат холодоагента через ущільнення валу, встановлення зовнішнього двигуна, немає з'єднань) і їх можна ремонтувати та обслуговувати, але вони дорожчі [1].

Порівняно з іншими застосуваннями, холодопродуктивності в хімічній промисловості зазвичай високі. Це веде до використання відцентрових, гвинтових або високопродуктивних ротаційних компресорів. Більшість відцентрових та гвинтових компресорів використовують економайзери для мінімізації потреб в енергії об'ємів всмоктування. В цілому, значно ширше використовуються компресори з відкритим приводом на хімічних заводах, порівняно з кондиціонуванням повітря, комерційними або побутовими

холодильниками. Дуже часто, системи змащення компресорів забезпечуються додатковими масляними насосами, фільтрами, охолоджувачами та іншим обладнанням, щоб дозволити технічне обслуговування та ремонт без вимикання [1].

9.2 Конденсатори

Це теплообмінники, які перетворюють холодоагент з пари в рідину. Теплота передається в три основні стадії [1]:

1. Охолодження перегрітої пари до стану насичення.
2. Конденсація.
3. Переохолодження.

В дійсності конденсація відбувається навіть в перегрітій області та переохолодження відбувається в області конденсації. Три основні типи холодильних конденсаторів включають: з повітряним охолодженням, з водяним охолодженням та з випаровуванням [1].

Конденсатори з повітряним охолодженням найчастіше використовуються в системах кондиціонування повітря та для менших холодопродуктивностей. Основною перевагою є доступність охолоджуючого середовища (повітря), але інтенсивність теплообміну для боку повітря значно нижча за значення, які досягаються при використанні води як охолоджуючого середовища. Конденсація завжди відбувається в середині труб, тоді як з боку повітря використовують розвинені поверхні (ребра) [1].

Найбільш традиційними типами холодильних конденсаторів з водяним охолодженням є [1]:

1. Кожухотрубні.
2. Змійовикові.
3. «Труба в трубі».
4. Пластинчасті.

Кожухотрубні конденсатори виготовляють для потужностей до 30 МВт. Охолоджуюча вода тече через труби в одно- чи багатходовій схемі. Традиційними є конструкції з нерухомими трубними решітками. Типовим є горизонтальне розміщення, але іноді використовують і вертикальне. Коефіцієнти тепловіддачі для вертикального типу менші через слабкий дренаж конденсату, але можна використовувати меншу кількість води та воду гіршої якості. Конденсація завжди відбувається на трубах та часто нижня частина труб використовується як ресивер. В змійовикових конденсаторах вода циркулює через один або більше паралельно чи послідовно з'єднаних змійовиків в середині корпусу, тоді як холодоагент конденсується зовні. Труби не можуть бути механічно почищені чи замінені. Конденсатори типу «труба в трубі» можуть бути використані в версіях, де конденсація відбувається як у внутрішній, так і в зовнішній трубі. Коефіцієнти конденсації складно передбачити, особливо у випадках, коли труби формують спіраль. Механічне очищення більш складне, іноді неможливе та труби не можуть бути замінені. Пластинчасті конденсатори складають з пластин спаяних разом, щоб сформувати комплектацію розділених каналів. Пластини типово виготовляються з нержавіючої сталі, з хвилястим гофруванням, що дозволяє досягти високих коефіцієнтів тепловіддачі. Розрахунки роботи таких апаратів складні, з невеликою кількістю доступних кореляцій. Основною перевагою є найвище відношення робота/об'єм (маса) та найнижчі втрати холодоагенту. Остання згадана перевага видається найбільш важливою для багатьох застосувань, де мінімізація інвентарних втрат є критичною [1].

9.3 Випарники

Це теплообмінники, де холодоагент випаровується охолоджуючи продукт, рідину або тіло. Холодоагент може бути в прямому контакті з тілом, що охолоджується, або може бути використане деяке інше середовище, як вторинний холодоагент. Переважно рідинами, які охолоджуються, є повітря,

вода або антифриз. Конструкція випарника сильно залежить від особливостей застосування. Випарники для повітряного охолодження будуть працювати з випаровуванням холодоагенту в трубі, тоді як рідинні холодильники можуть працювати з випаровуванням як в середині так і зовні труби [1].

Холодильні випарники можна класифікувати відповідно до їх методу живлення, як прямого (сухого) розширення або затопленого (перевантаженого рідиною). В випарнику сухого розширення на виході є суха або трохи перегріта пара. Це обмежує живлення рідиною до кількості, яка може бути повністю випаровувана за час, за який вона досягне кінця випарника. В перевантажених рідиною випарниках, кількість рідкого холодоагента, що циркулює, перевищує кількість випаруваної на кратність циркуляції. Рішення, щодо типу систем, що може бути використане є одним з перших в процесі конструювання. Випарники прямого розширення в загальному випадку використовуються в менших системах, де компактна конструкція та малі капітальні витрати є критичними. Контроль витрат холодоагенту досягається або терморозширювальним клапаном, або капілярною трубкою [1].

В системах з рециркуляцією насичена рідина ($x=0$) подається у випарник. Насосом або за рахунок гравітації подається більше рідкого холодоагенту, ніж може випаровуватися, тому вихід пари буде меншим за одиницю. Відношення витрат холодоагенту на вході до витрат випарюваного холодоагенту називається ступенем циркуляції n . Коли n зростає, коефіцієнт тепловіддачі буде зростати через зволожений вихідний штуцер випарника та збільшену швидкість на вході. В діапазоні від $n = 2$ до 4, значення коефіцієнта теплопередачі K (в англійській літературі U) для повітряного охолодження зростає приблизно на 20-30 процентів, порівняно з випадком прямого розширення. Ступені циркуляції понад 4 – не ефективні [1].

Ціна підвищення характеристик теплообміну – більш складна система з більшою кількістю допоміжного обладнання: ресивери низького тиску, насоси холодоагенту та контрольні прилади. Рідкий холодоагент переважно

нагнітається механічними насосами, однак, іноді газ при тиску конденсації використовується для нагнітання [1].

Важливою характеристикою холодильних випарників є наявність мастила. Система забруднюється мастилом в компресорі незважаючи на обґрунтовану ефективність масляних сепараторів. Деякі системи працюють з рециркуляцією мастила, коли змішане з холодоагентом мастило повертається до картера компресора. Це використовується переважно в системах, що використовують галогенопохідні як холодоагенти. Хоча мастила, що змішуються з аміаком існують, переважно використовуються незмішувані. Це усуває в аміачних системах необхідність рециркуляції мастила. В системах з рециркуляцією мастила, коли використовуються галогенопохідні вуглеводнів, особлива увага має бути приділена визначенню розмірів та розташуванню труб. Власна конфігурація трубопроводу, схилів, швидкостей (для забезпечення циркуляції мастила в усіх робочих завантаженнях) є важливими для надійної роботи системи. Коли холодоагент легший за мастило, в системі без рециркуляції, мастило буде на дні кожного об'єму з верхнім виходом. Тоді мастило повинно періодично зливатися, для уникнення погіршення роботи обладнання [1].

Для проектування холодильних систем та випарників для них важливо мати дані для змішування мастила та холодоагенту. Деякі комбінації мастила та холодоагенту завжди змішувані, деякі – завжди не змішувані, але деякі будуть частково змішуватися, залежно від температури та прикладеного тиску. Розморожування є важливою проблемою для випарників, які охолоджують повітря перед замерзанням. Розморожування проводять періодично, що активується переважно часовим реле, але часто використовуються індикатори заморожування (температурні, візуальні чи сенсори падіння тиску). Метод розморожування визначається переважно доступною рідиною та прийнятною складністю системи. Розморожування виконують такими механізмами, коли система вимкнена [1]:

- Гарячий (або прохолодний) газ холодоагенту (переважний метод в промислових застосуваннях).
- Вода (розморожування ззовні, на відміну від газового розморожування).
- Повітря (лише коли кімнатна температура вища температури замерзання).
- Електрика (для малих систем, коли розморожування гарячим газом занадто складне, а вода не доступна).
- Комбінацією вищезазначених способів.

Контрольні запитання

1. Проаналізувати типи холодильних компресорів
2. Проаналізувати конструкція конденсаторів, що використовуються в холодильній техніці
3. Проаналізувати конструкція випарників, що використовуються в холодильній техніці

10. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКІВ ТА АНАЛІЗУ ХОЛОДИЛЬНИХ СИСТЕМ ТА ОБЛАДНАННЯ

10.1 Значення спеціалізованого програмного забезпечення в хімічній інженерії

Розвиток комп'ютерної техніки дозволяє суттєво підвищити ефективність та продуктивність роботи інженерів. Наприклад, спеціалізовані програми полегшують планування в формі діаграм для індивідуальних компонентів та їх взаємозв'язків. Часто, вони містять бази даних для термодинамічних та теплофізичних властивостей, а також підпрограми, які можуть розраховувати наближені значення властивостей для компонентів, що оброблюється на підприємстві. Такі програми дозволяють інженеру уникнути багатьох виснажливих розрахунків, а також вони мають практичну користь при дослідженні розмірів обладнання та робочих умов [1].

Комп'ютерні програми для побудови схем в хімічній інженерії можуть бути класифіковані на два основні типи [14]:

1. Програми для повного моделювання, які вимагають значних обчислювальних потужностей.
2. Прості програми для матеріальних балансів, які вимагають відносно малих обчислювальних потужностей.

Програми для повного моделювання дозволяють здійснювати ретельні одночасні теплові та матеріальні баланси і конструювання основного обладнання, в результаті чого можна отримати точні та деталізовані інженерні схеми. На ранніх стадіях проектів використання пакету для повного моделювання часто може бути не виправдане і прості програми для матеріальних балансів будуть більш доречними [14].

Складні програми для побудови інженерних систем, для моделювання роботи процесів в цілому або окремих одиниць, були розроблені багатьма комерційними організаціями. Назви та основні пакети наведені в таблиці 10.1.

Деякі комерційні програми були зроблені власниками доступними для навчальних закладів для використання в навчальному процесі за номінальну вартість. Також існують аналоги з відкритим кодом [14].

Таблиця 10.1 – Програмні пакети для моделювання

Назва	Тип	Розробник	Web-сайт
ASPEN Aspen DPS	стаціонарний	Aspen Technology Inc. США	Aspentech.com
DESIGN II	стаціонарний	WinSim Inc.	Winsim.com
HYSYS	стаціонарний динамічний	Hyprotech, Канада	hyprotech.com
PRO/II	стаціонарний	SimSci-Esscor, США	simsci.com
DYNSIM	динамічний	SimSci-Esscor, США	simsci.com
CHEMCAD	стаціонарний	Chemstations Inc	chemstations.net

Програми моделювання процесів можна поділити на два базові типи [14]:

Послідовно-модулярні (sequential-modular) програми: в яких рівняння, що описують кожну одиницю процесу (модуль) розв'язуються модуль за модулем в поетапній манері. Ітераційні методики, що використовуються для розв'язку, виникають з рециркуляції інформації.

Вони моделюють стаціонарну роботу процесів і можуть бути використані для оформлення схеми процесу, та для визначення розмірів індивідуальних одиниць обладнання, таких як ректифікаційні колони.

Програми *на основі рівнянь (equation based)*: в яких весь процес описується системою диференціальних рівнянь та рівняння розв'язуються одночасно, а не покроково як в послідовному підході. Програми на основі рівнянь можуть моделювати нестаціонарну роботу процесів та обладнання.

В минулому, більшість програм, доступних для проектувальників, були послідовно-модулярного типу. Вони були простішими для розробки, за

програми на основі рівнянь, та вимагали лише помірної обчислювальної потужності. Модулі обраховувалися послідовно, тому важливо було тримати в оперативній пам'яті в певний момент часу лише рівняння для одного модуля. Також, умови процесу, температури, тиски, витрати були незмінні в часі. Але обчислювальні складності можуть виникати через ітераційні методи, що використовуються для розв'язку задач з рециклом та отримання наближення. Основним обмеженням послідовно-модулярних симуляторів є нездатність моделювати динамічну, змінну в часі поведінку процесу [14].

Основа на рівняннях динамічні симулятори, вимагають помітно більше обчислювальної потужності, ніж стаціонарні симулятори. Така потужність потрібна для розв'язку сотень диференціальних рівнянь, необхідних для опису процесу, або навіть однієї одиниці обладнання. Однак, з розвитком швидких потужних комп'ютерів це більше не обмеження. За їх природою, програми на основі рівнянь не практикують проблем сходження рециклу, які характерні для послідовних симуляторів. Але, оскільки температура, тиски та витрати не постійні та вхід одного елемента не визначається розрахованим виходом з попереднього елемента в послідовності, як в стаціонарних симуляторах, програми на основі рівнянь вимагають більше часу на виконання розрахунків. Це привело до розвитку гібридних програм, в яких стаціонарний симулятор використовується для генерації початкових умов для динамічного моделювання [14].

Принциповою перевагою динамічних симуляторів є їх здатність до моделювання нестационарних умов, що відбуваються при пуску при неправильних умовах. Інтенсивність застосування динамічних симуляторів зростає для дослідження безпеки та при проектуванні систем контролю [14].

Структура типової стимуляційної програми показана на рисунку 10.1.

Програма містить [14]:

10. Основну виконавчу програму, яка контролює та відстежує обчислення схеми та потоки інформації до та від підпрограм.

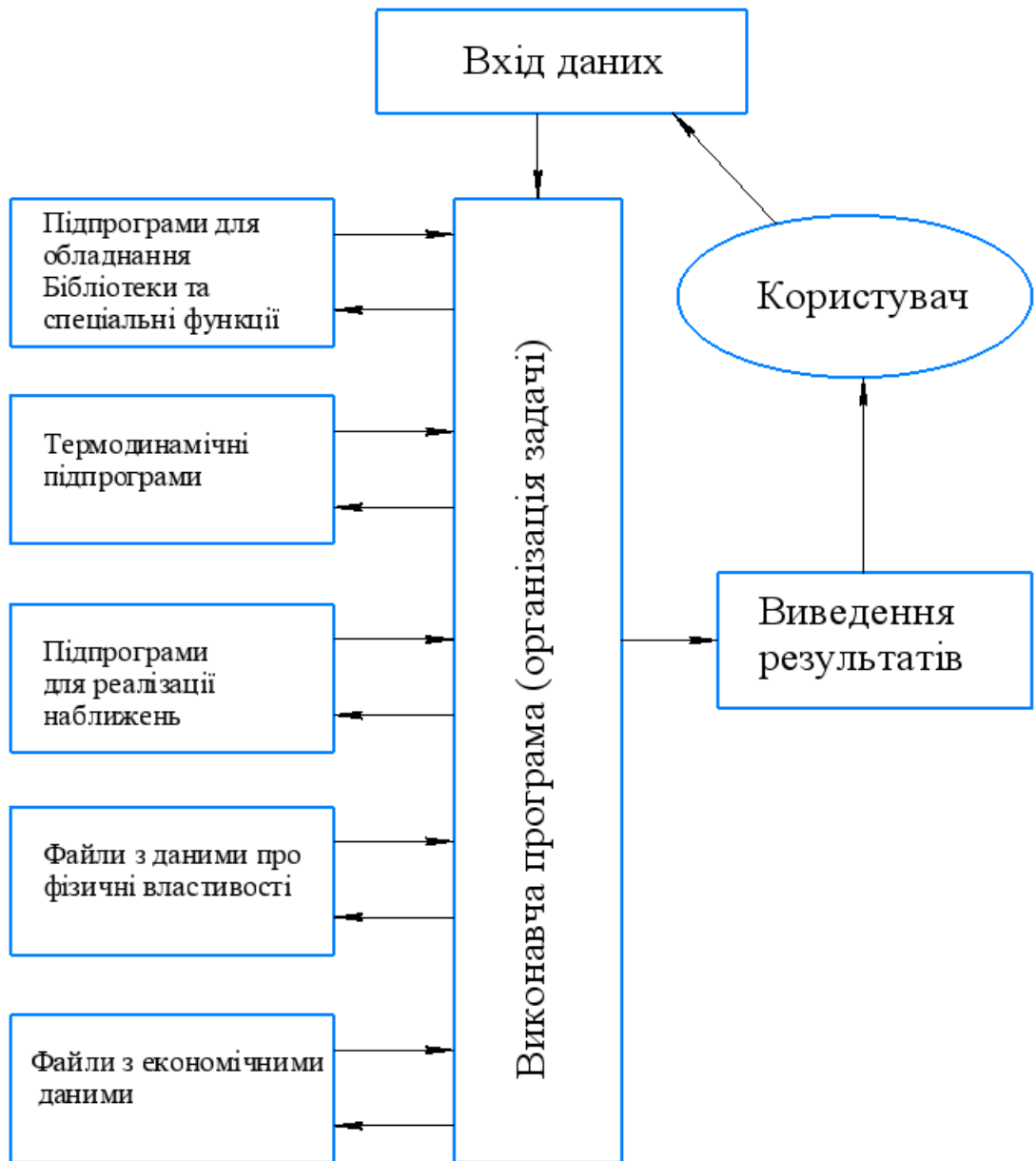


Рисунок 10.1 – Типова програма моделювання

2. Бібліотеку підпрограм для моделювання роботи обладнання (модулі), які моделюють обладнання та здані розраховувати вихідні потоки з інформації з вхідних потоків.

3. Базу даних для фізичних властивостей. В значній мірі корисність від складних програм для побудови інженерних схем буде залежати від повноти бази даних фізичних властивостей. Накопичення фізичних властивостей необхідних для проектування окремого процесу, та його перетворення в

форму, прийнятну для окремої програми для схем, може бути сильно затратним по часу.

4. Підпрограми для термодинамічних властивостей, такі як розрахунки рівноваги в системі пара-рідина та ентальпії потоків.

5. Підпрограми та бази даних для економічних розрахунків, оцінки капітальних та операційних витрат. Повне моделювання програми для схем дозволяє конструктору розглядати альтернативні схеми процесів та економічні підпрограми дозволяють зробити швидке економічне порівняння. Деякі програми включають підпрограми для оптимізації. Щоб використовувати економічні підпрограми, програма повинна бути здатна продукувати щонайменше приблизні конструкції обладнання.

В послідовно-модулярних програмах виконавча програма створює послідовність в схемі, ідентифікує рекурсивні цикли та контролює розрахунки роботи модулів, взаємодію з бібліотекою роботи модулів, базою даних фізичних властивостей та іншими підпрограмами. Вона також може містити процедури для оптимального упорядкування розрахунків та підпрограм для забезпечення збіжності [14].

В симуляторах на основі рівнянь виконавча програма створює схему та систему рівнянь, що описують роботу модулів, та подальший розв'язок рівнянь, отримує дані з бібліотек роботи модулів і бази даних фізичних властивостей та файлів з термодинамічних підпрограм [14].

Багато професійних програмних продуктів для розробки схем наразі забезпечені графічним інтерфейсом для користувача, щоб показувати схеми та полегшувати введення інформації в пакет [14].

Крім наведених у таблиці програмних продуктів, які здатні працювати з широким діапазоном хіміко-технологічних процесів, існують програми, які обмежуються певними процесами. Наприклад, такі програмні продукти як Q+ (LG Water Solutions) [15], IMSDesign Cloud (Hydranautics) [16], WAVE (DuPont) [17], TORAY TRAK та TORAY DS [18] призначені для моделювання водоочисних мембранних систем. Для моделювання холодильної техніки

існує програмний продукт CoolPack розроблений IPU [10], який буде розглянуто детальніше.

10.2 Загальна характеристика програми CoolPack

Розвиток CoolPack почався в 1998 році, як частина дослідницького проекту. Метою цього проекту було розвинути симуляційну модель, щоб використовувати для енергетичної оптимізації холодильних систем. Користувачі цих моделей можуть бути холодильними техніками, інженерами, студентами тощо, якщо коротко – це всі люди, що мають вплив на сучасне та майбутнє споживання енергії холодильними системами [10].

Першою ідеєю було зробити загальну та вичерпну симуляційну програму, яка даватиме користувачу гнучкість, які він/вона бажає стосовно розгляду різних конструкцій системи та дослідницьких цілей. Серед характеристик дуже загальних та гнучких програм є те, що вони вимагають багато вхідних даних чи виборів від користувача та те, що їх числова надійність низька. Досвід з цим типом програм показав, що цей тип симуляційних програм є далекий від ідеалу для основної частини згаданих вище користувачів. Оскільки більшість з цих користувачів мають обмежений час для проведення дослідження, загальні та вичерпні програми будуть в багатьох випадках дуже неефективними для використання та вони, таким чином, відкидаються користувачами [10].

Ідея розвитку CoolPack відрізняється від описаної вище ідеї. Замість того, щоб створити велику, загальну та вичерпну симуляційну програму розробники вибрали шлях створення набору малих, простих у використанні, та обчислювально надійних програм [10].

Типова симуляційна програма в CoolPack має справу лише з одним типом холодильних систем та має специфічну дослідницьку ціль. Вона таким чином вимагає від користувача введення/вибору необхідних для опису робочих умов тощо, та не вимагає жодних вхідних даних для опису

конструкції системи або визначення вхідної/вихідної структури, поєднаної з модельними цілями [10].

При розробці програм для CoolPack розробники сфокусувалися на розробці основної моделі системи як простої, відповідної та обчислювально надійної, наскільки це можливо. Вони зберегли деяку гнучкість, в якій користувач може вибрати холодоагент та визначити вхідні дані (такі як тиск) більш ніж одним шляхом (тиск чи температура насичення) [10].

Програми в CoolPack дозволяють реалізовувати такі задачі моделювання [10]:

- Розрахунок властивостей холодоагенту (графіки властивостей, термодинамічні та теплофізичні дані, порівняння холодоагентів).
- Аналіз циклів, наприклад одно- та двостадійних циклів.
- Розрахунок параметрів системи – розрахунок розмірів компонентів з загальних критеріїв розрахункових параметрів.
- Моделювання системи – розрахунок робочих умов у системі з відомими компонентами.
- Оцінка роботи – оцінка ефективності системи та рекомендації для зменшення споживання енергії.
- Розрахунок компонентів – розрахунок ефективностей компонентів.
- перехідне моделювання охолодження об'єкта – наприклад, для оцінки періодів охолодження.

Щоб полегшити огляд програм в CoolPack розробники розділили програми в три основні групи (утиліти охолодження; холодильні інструменти ESS та динаміка). Рисунок 10.2 дає огляд вмісту цих груп [10].

Група **холодильні утиліти** містить три програми, орієнтовані на холодоагенти, що першочергово використовуються для розрахунку властивостей первинних та вторинних холодоагентів, створення графіків властивостей для первинних холодоагентів (як діаграми $p-h$, $T-s$ та $h-s$) та для розрахунку падіння тиску для течії вторинних холодоагентів у трубах. Більш

того, можливо створити графіки властивостей для вологого повітря (психрометричний графік) [10].

CoolPack		
Утиліти охолодження (Refrigeration Utilities)	Холодильні інструменти ESS (EESCoolTools)	Динаміка (Dynamic)
<ul style="list-style-type: none"> - Властивості холодоагентів, графіки та цикли; - Калькулятор холодоагента - Калькулятор вторинних рідин - Психрометричні графіки 	<ul style="list-style-type: none"> - Аналіз циклів - Визначення розмірів системи; - Моделювання системи; - Аналіз роботи - Розрахунок компонентів; - Властивості холодоагентів; - Порівняння холодоагентів 	<ul style="list-style-type: none"> - Охолодження об'єкта/кімнати (одностадійна система)

Рисунок 10.2 – Огляд основних груп програм в CoolPack

Програми в групі холодильні утиліти були видані раніше, як незалежні програми. Перша версія програм була видана в 1996 та вони з того часу були значно розширені з новими холодоагентами, більшою кількістю графіків властивостей тощо. Крім вбудованих у функції властивостей поточна версія також може використовувати дуже точні функції властивостей, що використані в програмі RefProp. Якщо у користувача є RefProp ver. 6.01, він буде здатний створити графіки властивостей високої якості на основі даних RefProp, для холодоагентів [10].

Група EESCoolTools містить велику кількість програм, як для холодильних систем, так і їх компонентів. Розробники вирішили розділити цю групу на чотири підгрупи, показані на рисунку 10.3. Групи також представляють чотири фази проектування холодильних систем [10].

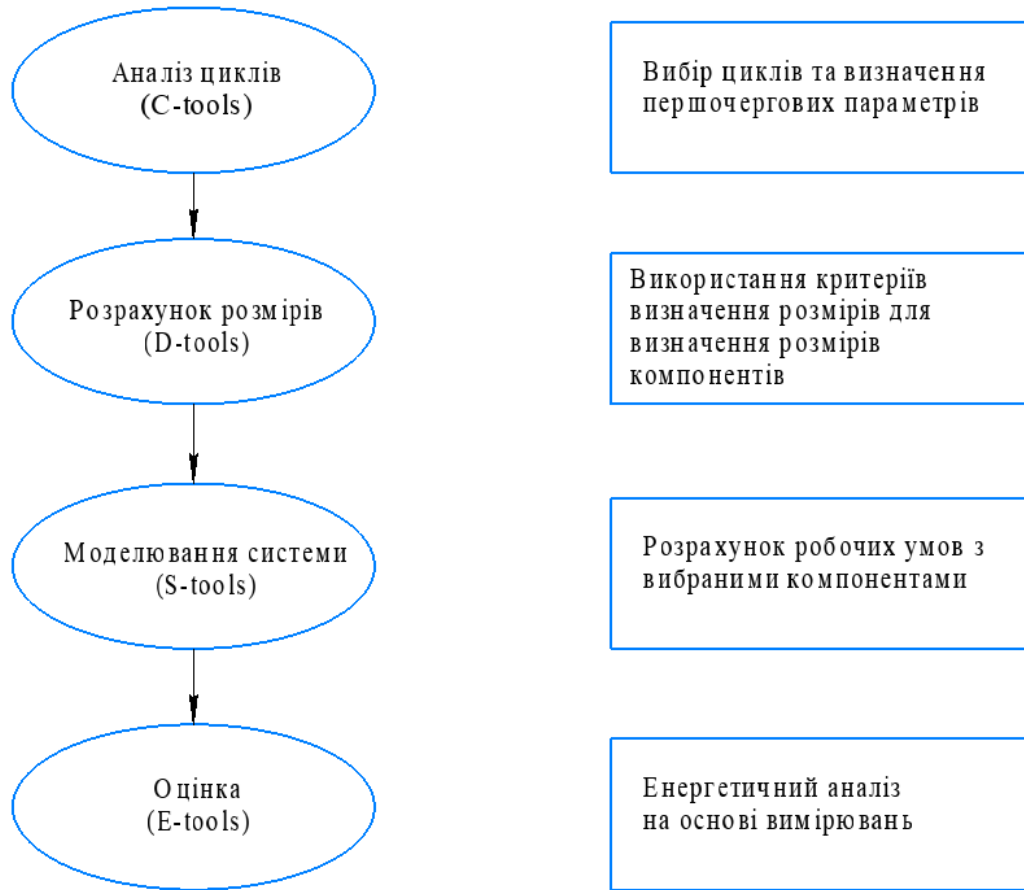


Рисунок 10.3 – Підгрупи EESCoolTool

Програми в цих чотирьох групах мають майже той же самий тип інтерфейсу користувача, що робить легшим їх комбінування, а також їх порівняння [10].

Назва EESCoolTools містить три слова, EES, охолодження та інструменти [10]:

- EES позначає назву програми, в якій реалізовано симуляційні моделі (Engineering Equation Solver – EES – розв’язувач інженерних рівнянь).
- «Охолодження» відноситься до того факту, що симуляційні моделі стосуються сфери охолодження.
- «Інструменти» відносяться до того, що програми задумані як інструменти, що дозволяють робити швидше та більш стійкіше (енергетично) проектування та аналіз.

Група «Динаміка» містить динамічні програми в CoolPack. Досі доступна лише одна програма. З цією програмою можливо моделювати охолодження об'єкту/кімнати при різних умовах зі здатністю контролю увімкнено/вимнено компресора [10].

10.3 Інтерфейс програми CoolPack та основні принципи роботи з набором програм EESCoolTools

Коли програма запущена, користувач бачить вітальний екран з коротким представлення основних програм в CoolPack. Програми в CoolPack поділені на три основні групи: Refrigeration Utilities, EESCoolTools та Dynamic. Основна група EESCoolTools була розділена на чотири підгрупи: аналіз циклів, конструкція, оцінка та допоміжні. Це шість груп програм, кожна має закладку на панелі інструментів у верхній частині екрану, справа від групи кнопок, які контролюють появу на цьому екрані. Програми в групах запускаються кліком (одиночним кліком) на іконці програми. Рисунок 10.4 показує іконки трьох програм в групі Refrigeration Utilities [10].



Рисунок 10.4 – Основний екран в CoolPack

Якщо користувач наведе мишку на ці іконки (без кліку), то буде бачити невеличкий текст підказки з назвою програми. Коли програма запуститься, ця основна частина CoolPack залишиться активною, але вона буде розташована на фоні. Користувач завжди зможе повернутися до цього вікна кліком на іконку на панелі задач Windows. Користувач може запустити декілька програм в CoolPack активними одночасно. Користувач може переходити між активними програмами натисканням кнопки ALT (тримаючи її) та також натисканням кнопки TAB [10].

Коли користувач запускає другу програму з EESCoolTool, він отримає сповіщення, яке повідомляє, що EES вже запущений і у нього тоді запитують, чи бажає він відкрити іншу копію. Це повідомлення є лише засобом обережності, який повинен допомогти користувачам старих версій Windows (наприклад 95 та 98) у усунуванні відкривання дуже багатьох EESCoolTools. Якщо комп'ютер працює з малими ресурсами оперативної пам'яті, багато EESCoolTools можуть привести до того, що система стане нестабільною. Однак, для сучасних комп'ютерів такі проблеми не характерні [10].

Для прикладу, розглянемо запуск групи «CoolTools: Cycle analysis», як показано на рисунку 10.5

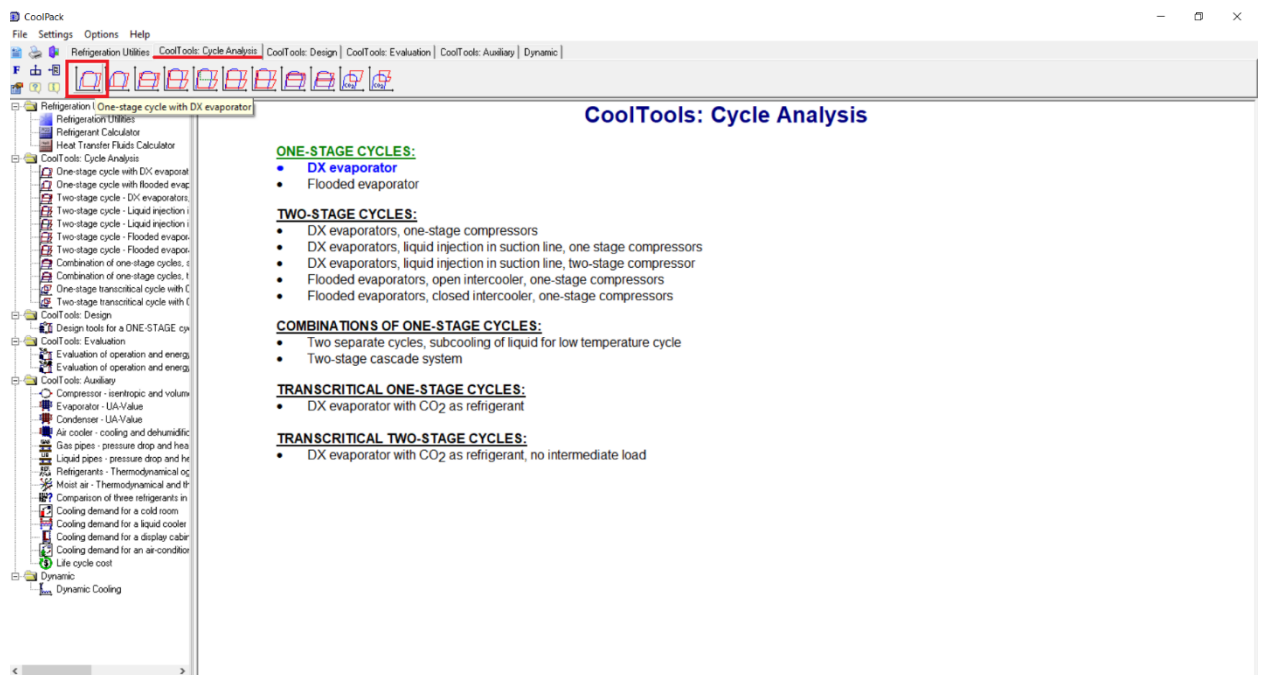


Рисунок 10.5 – Запуск програми аналізу циклів

Всі CoolTools запускаються в основному вікні з діаграмою (в цьому випадку стилізованою $p-h$ діаграмою). Це показано на рисунку 10.6. У верхній лівій частині екрану розташовано колонку функціональних кнопок вони можуть бути використані для початку розрахунків, збереження та завантаження інформації з/в файл, або доступу до функції допомоги он-лайн. Функція допомоги містить опис програми та може містити подальші діаграми [10].

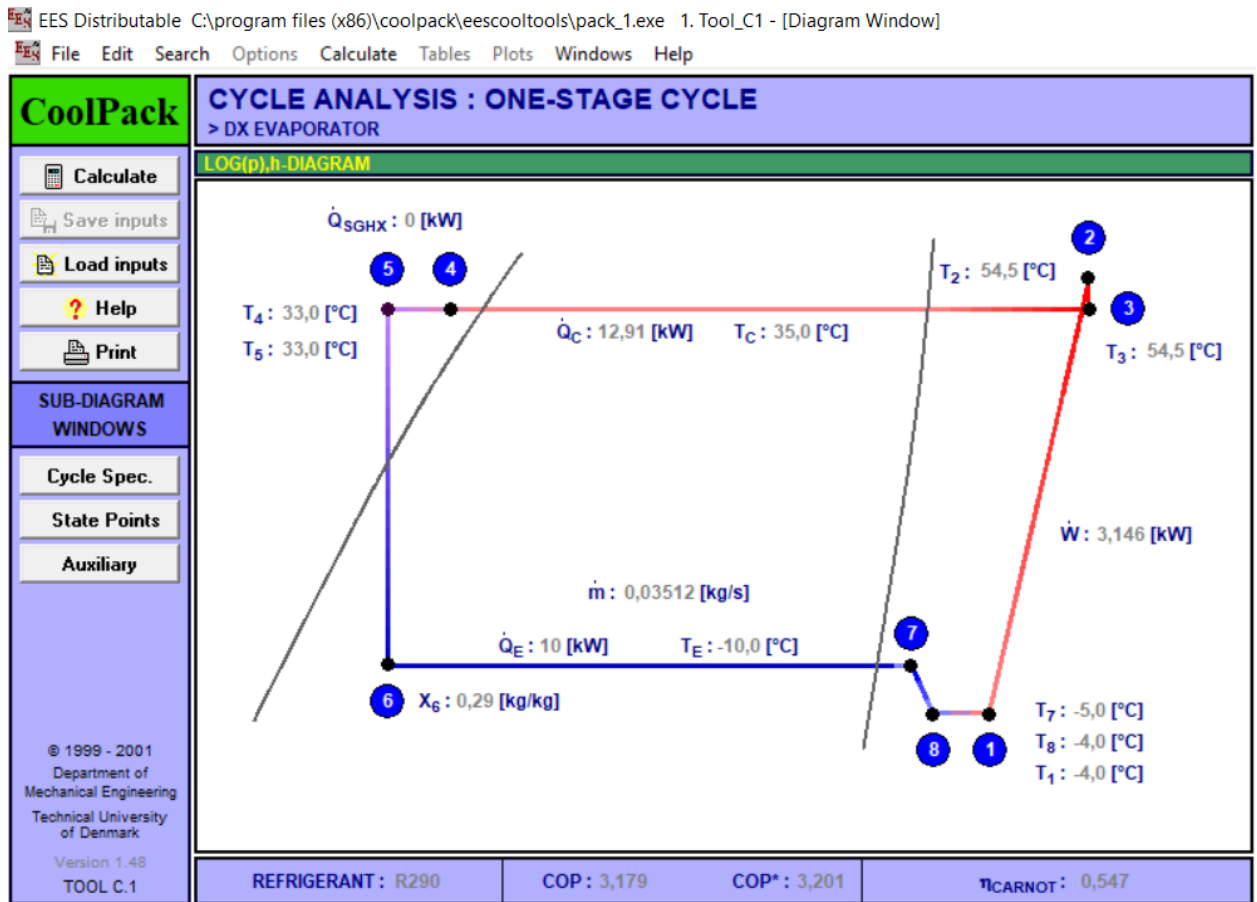


Рисунок 10.6 – Основне вікно діаграм для EESCoolTools

На додачу до основного вікна діаграми можуть існувати декілька вікон суб-діаграм. Можна отримати доступ до вікон суб-діаграм використовуючи сірі кнопки з лівого боку екрану [10].

Якщо клацнути на кнопку «Cycle Spec.», користувач буде бачити одне з вікон суб-діаграм в цій програмі – рисунок 10.7 показує це вікно. У вікні суб-діаграми також знаходяться функціональні кнопки та навігаційні кнопки для

доступу до інших вікон суб-діаграм. Користувач може отримати доступ до вікна основної діаграми натисканням на невелику кнопку з написом «Home» в нижній правій частині екрану. Альтернативним варіантом є використання комбінації клавіш Ctrl+D для повернення до основного вікна діаграми [10].

EES Distributable C:\program files (x86)\coolpack\eescooltools\pack_1.exe 1. Tool_C1 - [Cycle Specification]

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help

CYCLE SPECIFICATION			
TEMPERATURE LEVELS		PRESSURE LOSSES	
T_E [°C]: -10,0	ΔT_{SH} [K]: 5	ΔP_{SL} [K]: 0,5	SUCTION GAS HEAT EXCHANGER
T_C [°C]: 35,0	ΔT_{SC} [K]: 2	ΔP_{DL} [K]: 0,5	No SGHX 0,30
REFRIGERANT			
R290			
CYCLE CAPACITY			
Cooling capacity \dot{Q}_E [kW]: 10	\dot{Q}_E : 10 [kW]	\dot{Q}_C : 12,91 [kW]	\dot{m} : 0,03512 [kg/s]
\dot{V}_S : 17,35 [m ³ /h]			
COMPRESSOR PERFORMANCE			
Isentropic efficiency η_{is} [-]: 0,7	η_{is} : 0,700 [-]	\dot{W} : 3,146 [kW]	
COMPRESSOR HEAT LOSS			
Heat loss factor f_G [%]: 10	f_G : 10,0 [%]	T_2 : 54,5 [°C]	\dot{Q}_{LOSS} : 0,3146 [kW]
SUCTION LINE			
Unuseful superheat $\Delta T_{SH,SL}$ [K]: 1,0	\dot{Q}_{SL} : 68 [W]	T_8 : -4,0 [°C]	$\Delta T_{SH,SL}$: 1,0 [K]

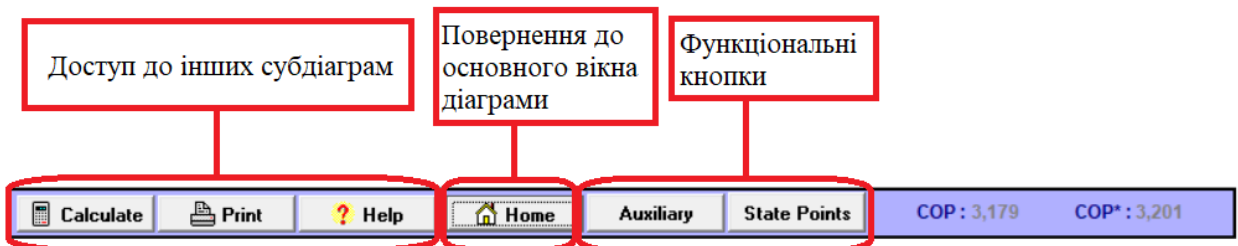


Рисунок 10.7 – Вікно суб-діаграми в EESCoolTool

Відкрита програма є програмою для аналізу холодильного циклу (аббревіатура C-Tool). В цьому типі інструментів всі основні вихідні дані зібрані у вікні суб-діаграми з назвою «Cycle Spec.». Вхідні дані згруповані відповідно до явища, яке вони описують. Кожна група має назву, що дає зв'язок між вхідними та вихідними даними в групі. На рисунку 10.7 можна побачити групу, що має назву «Cycle Capacity», де є вхідні дані для холодопродуктивності та знаходяться результати, які стосуються холодопродуктивності, такі як масова та об'ємна витрата [10].

Вхідні дані позначені як маленькі коробочки з зеленими буквами та цифрами на білому тлі. Існує два різних типи вхідних даних. Перший тип є там, де числа вводяться з клавіатури. Інший тип містить список вибіркового вхідних даних, зазвичай, вибираються текстові пункти. Список спершу з'являється, коли ви натискаєте (одинарний клік) на сіру кнопку з маленькою чорною стрілкою. Рисунок 10.8 показує випадаючий список, в якому можна вибрати холодоагент. Для довгих списків буде з'являтися лінійка прокрутки [10].

CYCLE SPECIFICATION			
TEMPERATURE LEVELS	PRESSURE LOSSES	SUCTION GAS HEAT EXCHANGER	REFRIGERANT
T_E [°C]: <input type="text" value="-10,0"/>	ΔT_{SH} [K]: <input type="text" value="5"/>	ΔP_{SL} [K]: <input type="text" value="0,5"/>	<input type="text" value="No SGHX"/>
T_C [°C]: <input type="text" value="35,0"/>	ΔT_{SC} [K]: <input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="0,30"/>	<input type="text" value="R290"/>
CYCLE CAPACITY			
Cooling capacity \dot{Q}_E [kW]: <input type="text" value="10"/>	\dot{Q}_E : 10 [kW]	\dot{Q}_C : 12,91 [kW]	\dot{m} : 0,03512 [kg/s]
COMPRESSOR PERFORMANCE			
Isentropic efficiency η_{is} [-]: <input type="text" value="0,7"/>	η_{is} : 0,700 [-]	\dot{W} : 3,146 [kW]	
COMPRESSOR HEAT LOSS			
Heat loss factor f_Q [%]: <input type="text" value="10"/>	f_Q : 10,0 [%]	T_2 : 54,5 [°C]	\dot{Q}_{LOSS} : 0,3146 [kW]
SUCTION LINE			
Unuseful superheat $\Delta T_{SH,SL}$ [K]: <input type="text" value="1,0"/>	\dot{Q}_{SL} : 68 [W]	T_8 : -4,0 [°C]	$\Delta T_{SH,SL}$: 1,0 [K]

Рисунок 10.8 – Вибір холодоагенту з випадаючого списку

Для прикладу виберемо R134a. Вихідні результати (як текст, так і числа) зазвичай даються темно-синього кольору. Якщо зміни зроблені, всі вихідні дані змінять колір на сірий, щоб показати, що результати можуть більше не представляти розв'язок для вхідних даних на екрані. Зміни, які були раніше зроблені, коли вибирався новий холодоагент, спричинили зміну кольору для всіх вихідних даних на сірий. Розрахунок починається натисканням на функціональну кнопку позначену «CALC» або натисканням клавіші F12 [10].

Якщо запустити розрахунок натисканням «CALC» або натисканням кнопки F12, з'явиться мале вікно для інформування користувача про прогрес розрахунку. Поки проводяться розрахунки, кнопка на цьому вікні буде позначена «Abort». Коли розв'язок буде знайдено, назва буде змінена на

«Continue». При використанні сучасних комп'ютерів, розрахунок відбувається настільки швидко, що встигнути помітити це вікно достатньо складно. Результати розрахунку показані на рисунку 10.9 [10].

CYCLE SPECIFICATION					
TEMPERATURE LEVELS		PRESSURE LOSSES		SUCTION GAS HEAT EXCHANGER	REFRIGERANT
T_E [°C]:	-10,0	ΔT_{SH} [K]:	5	Δp_{SL} [K]:	0,5
T_C [°C]:	35,0	ΔT_{SC} [K]:	2	Δp_{DL} [K]:	0,5
				No SGHX	0,30
				R134a	
CYCLE CAPACITY					
Cooling capacity \dot{Q}_E [kW]	10	\dot{Q}_E : 10 [kW]	\dot{Q}_C : 12,87 [kW]	\dot{m} : 0,06654 [kg/s]	\dot{V}_S : 24,95 [m ³ /h]
COMPRESSOR PERFORMANCE					
Isentropic efficiency η_{is} [-]	0,7	η_{is} : 0,700 [-]	\dot{W} : 3,098 [kW]		
COMPRESSOR HEAT LOSS					
Heat loss factor f_Q [%]	10	f_Q : 10,0 [%]	T_2 : 56,8 [°C]	\dot{Q}_{LOSS} : 0,3098 [kW]	
SUCTION LINE					
Unuseful superheat $\Delta T_{SH,SL}$ [K]	1,0	\dot{Q}_{SL} : 65 [W]	T_B : -4,0 [°C]	$\Delta T_{SH,SL}$: 1,0 [K]	

Рисунок 10.9 – Результати розрахунку після заміни холодоагенту

Поточне вікно містить багато вхідних боксів, де значення для типових параметрів, що характеризують цикл, можуть бути введені. У верхній частині вікна визначені умови для випарника та конденсатора. Нижче розташована група змінних, позначена холодопродуктивність циклу. Холодопродуктивність циклу може бути задана декількома шляхами. Прямий найпростіший шлях – це задати холодопродуктивність в кВт, але також можливі непрямі шляхи задавання холодопродуктивності з використанням масової (кг/с) чи об'ємної (м³/год) витрати холодоагенту. Користувач вибирає між різними шляхами визначення холодопродуктивності вибором однієї з текстових опцій з випадаючого списку. Вибір за умовчанням – «Ref. Capacity [kW]». Справа від цих вхідних даних відображаються значення, що визначають продуктивність циклу [10].

Аналогічно до визначення продуктивності циклу, інші явища (як робота компресора, втрати теплоти в компресорі та перегрівання на лінії всмоктування) можуть бути визначені багатьма шляхами. В усіх випадках, визначальні змінні вибираються з випадаючого списку. Слід відмітити, що в

більшості випадків зміна вхідної змінної буде потребувати, щоб вхідне значення також було змінене [10].

В більшості програм CoolTools існує більше одного вікна суб-діаграм. Користувач може відкрити інші суб-діаграми натисканням на сірі кнопки з лівого боку основного вікна діаграми [10].

Для входу на інше вікно суб-діаграми необхідно натиснути кнопку «State Point». Значення температури, ентальпії, тиску та густини наведені в таблиці (рисунок 10.10). Нумерацію точок стану можна бачити або на h - p -діаграмі (рисунок 10.6) в основному вікні діаграми або з діаграми трубопроводів, що знаходиться в Help [10].

STATE POINTS					
STATE POINT	TEMPERATURE	PRESSURE	ENTHALPY	DENSITY	Additional information
	[°C]	[kPa]	[kJ/kg]	[kg/m ³]	
1	-4,0	342,0	474,9	7,3	Pressure ratio (p_2 / p_1): 3,605 $T_{2,IS}$: 46,0 [°C] $T_{2,IS}$ is the temperature of the discharge gas assuming reversible and adiabatic compression $T_{2,W}$: 58,8 [°C] $T_{2,W}$ is the temperature of the discharge gas assuming real and adiabatic compression
2	54,5	1232,7	555,5	23,6	
3	54,5	1218,3	555,9	23,2	
4	33,0	1218,3	188,2	479,3	
5	33,0	1218,3	188,2	479,3	
6	-10,0	347,7	188,2	-----	
7	-5,0	347,7	473,0	7,5	
8	-4,0	342,0	474,9	7,3	

Рисунок 10.10 – Значення термодинамічних параметрів в вузлових точках циклу (суб-діаграма State Point)

Немає необхідності повертатися до основного вікна діаграми, щоб переміщатися від однієї суб-діаграми до іншої, можна використовувати сірі кнопки в нижній частині екрану [10].

У вікні суб-діаграми Auxiliary користувач може знайти інформацію про необхідні розміри основних трубопроводів в системі, розрахувати розташування компресора, що необхідне для продуктивності, яку задав користувач (використовуючи об'ємну ефективність компресора) та можливе нагрівання потоку води в пароперегрівачі (рисунок 10.11) [10].

AUXILIARY			
VOLUMETRIC EFFICIENCY			
Volumetric efficiency η_{VOL} [-]	0,8	η_{VOL} : 0,800 [-]	\dot{V}_S : 17,35 [m ³ /h] \dot{V}_D : 21,69 [m ³ /h]
<small>\dot{V}_S can be chosen as input in the cycle specification window.</small>			
UTILIZATION OF DISCHARGE GAS SUPERHEAT FOR HEATING OF WATER			
Temperature increase ΔT_{WATER} [K]	20	ΔT_{WATER} : 20 [K]	\dot{V}_{WATER} : 0,06286 [m ³ /h] \dot{Q}_{DSH} : 1,449 [kW]
<small>Water in the desuperheating heat exchanger can only be heated to discharge temperature $T_{DL,OUT}$.</small>			
<small>\dot{Q}_C in the main diagram window includes both the heat load for both desuperheating and condensing of the refrigerant.</small>			
ENERGY CONSUMPTION			
Hours of operation [h] :	8760	Energy consumption : 27555 [kWh]	
PIPE DIMENSIONS			
PIPE SECTION	VELOCITY [m/s]	PIPE DIAMETER (Internal) [mm]	Condition corresponds to
Suction line	10,0	24,8	State Point #1
Discharge line	12,0	12,6	State Point #2
Liquid line	0,6	12,5	State Point #5

Рисунок 10.11 – Визначення розмірів трубопроводів (суб-діаграма Auxiliary)

Основне вікно діаграми та всі вікна суб-діаграм можуть бути роздруковані. Для цього в головному меню на закладці «Файл» потрібно вибрати команду «Друк». Налаштування друку за умовчанням – друкувати лише основну діаграму. Якщо необхідно друкувати будь-яке вікно суб-діаграми, тоді користувач має зняти вибір «діаграма» та повторно вибрати діаграму знову. Тоді з'являється меню, в якому можна вибрати друк однієї чи більше вікон діаграм в програмі (рисунок 10.12) [10].

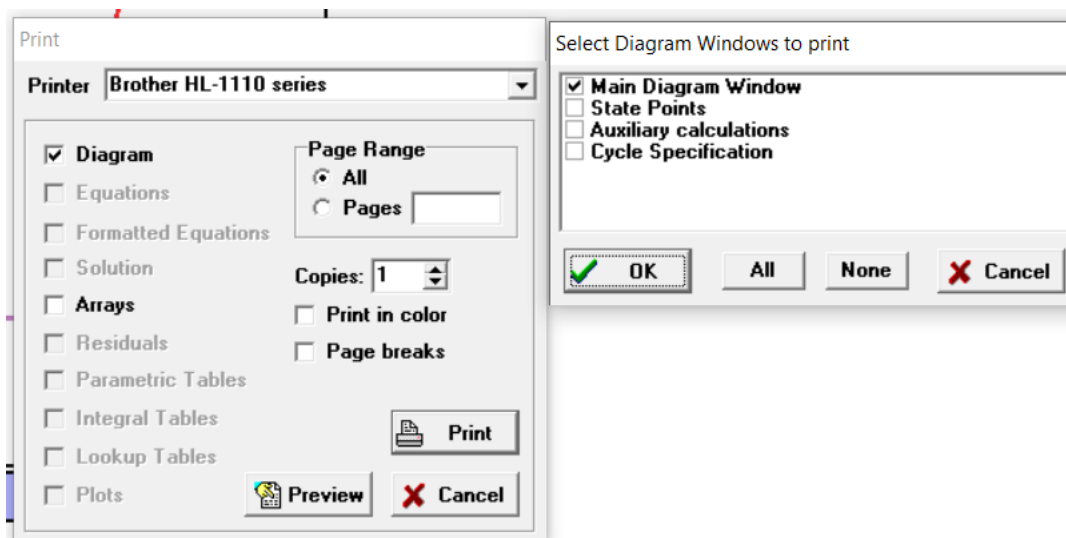


Рисунок 10.12 – Вікно друку діаграм

В середині програм існують гарячі клавіші, список гарячих клавіш в CoolTools наведений у таблиці 10.2 [10].

Таблиця 10.2 – Гарячі клавіші в CoolTools

Гаряча клавіша	F2	Розв'язати модель (розрахувати)
	Ctrl+G	Оновити початкові припущення
	Ctrl+D	Повернутися до основної діаграми
	Ctrl+P	Перейти до меню друку
	Ctrl+Q	Закінчити програму (вийти)
	Ctrl+C	Скопіювати поточну діаграму в буфер обміну

10.4 Основні принципи роботи з набором програм Refrigeration Utilities

Щоб перейти до цієї групи, необхідно натиснути на закладку Refrigeration Utilities в головному вікні CoolPack. Буде видно три іконки. Перша представляє основну програму в цій групі. Інші дві іконки представляють малі та зручні програми для розрахунку специфічних властивостей холодоагентів і вторинних рідин [10].

Основна програма в цій групі може бути використана для креслення графіків високої якості для величезної кількості холодоагентів. Надалі, користувач може креслити холодильні цикли на цих діаграмах та отримувати програми для розрахунку різниць ентальпій між точками стану, холодильного коефіцієнта тощо. Ця програма має настільки багато можливостей, особливо коли мова йде про форматування графіків властивостей, що не практично наводити їх список у описі загальних властивостей. Для більшої інформації варто користуватися вбудованою функцією Help [10].

Для запуску основної програми необхідно натиснути на кнопку Refrigeration Utilities в головному вікні CoolPack, як показано на рисунку 10.13. Відкриється вікно, показане на рисунку 10.14 [10].

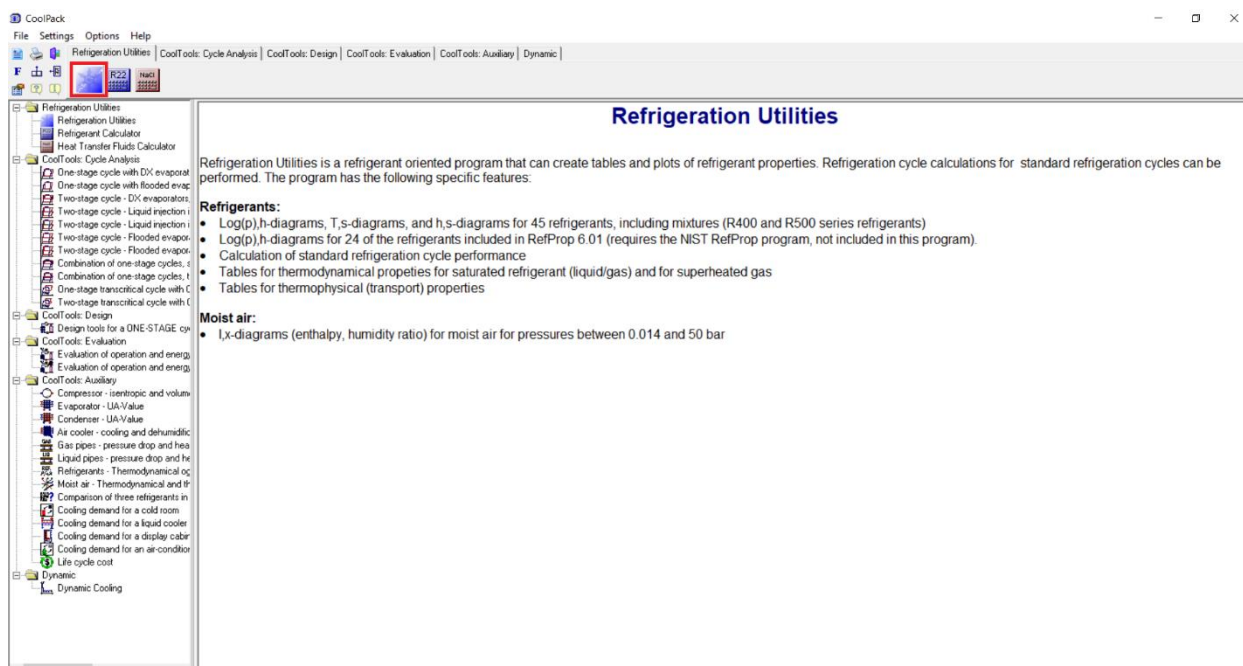


Рисунок 10.13 – Виклик основної програми Refrigeration Utilities

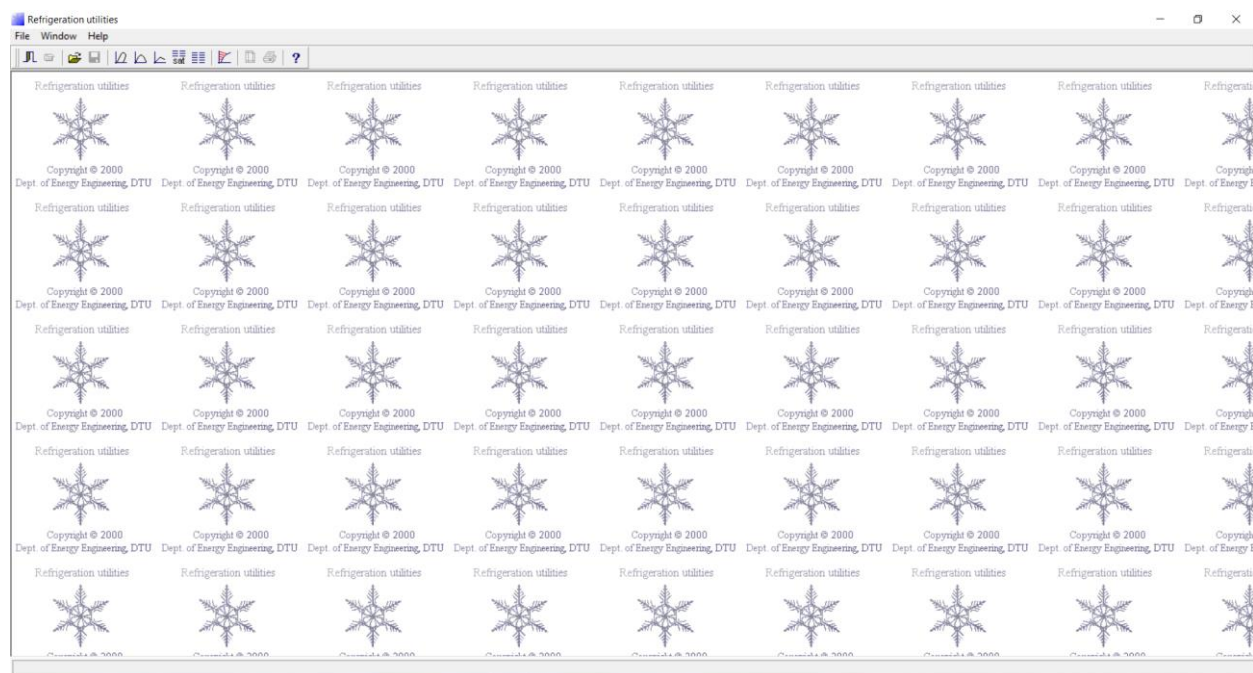


Рисунок 10.14 – Зовнішній вигляд основної програми Refrigeration Utilities

Розглянемо створення h - P діаграми. Для цього необхідно натиснути на кнопку Log(p)-h diagram, як показано на рисунку 10.15. На екрані з'явиться список холодоагентів (рисунок 10.16). Для прикладу виберемо R290 (пропан) та натиснемо кнопку ОК (рисунок 10.17) [10].

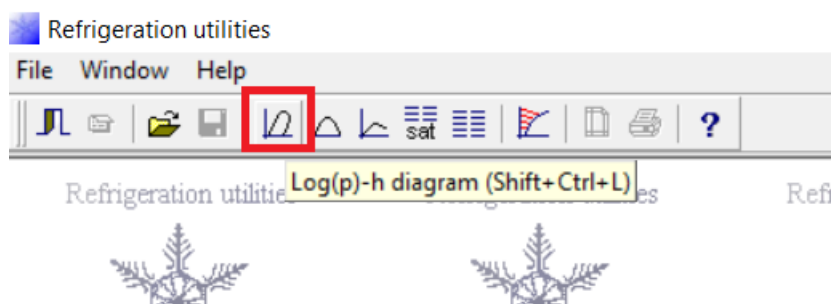


Рисунок 10.15 – Створення діаграми h - P в Refrigeration Utilities

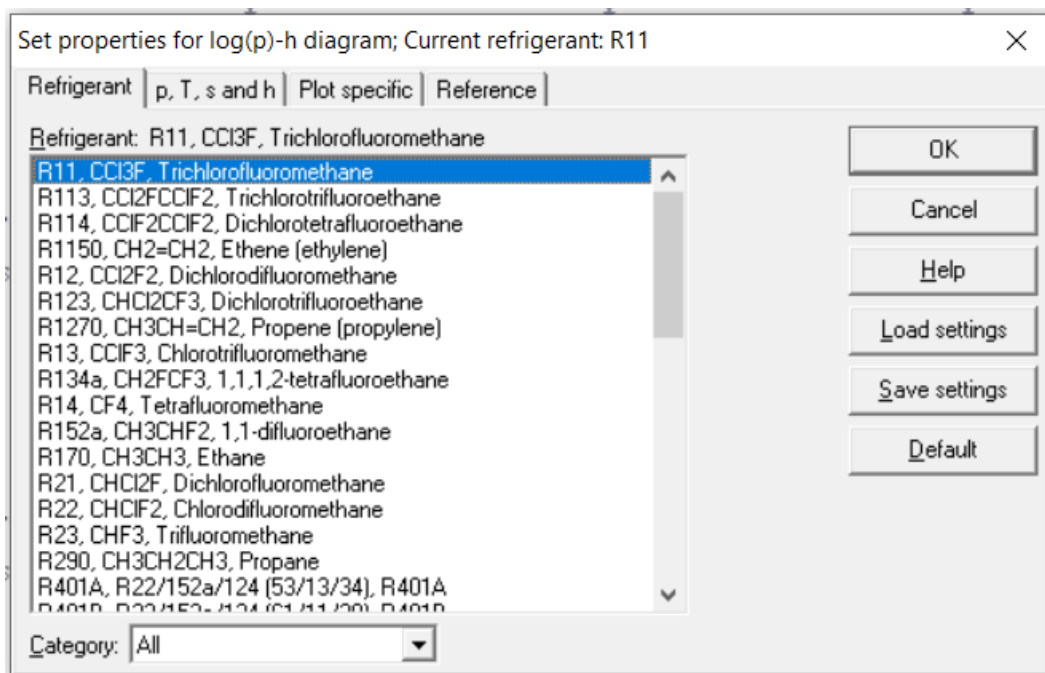


Рисунок 10.16 – Вікно вибору холодоагенту та параметрів діаграми

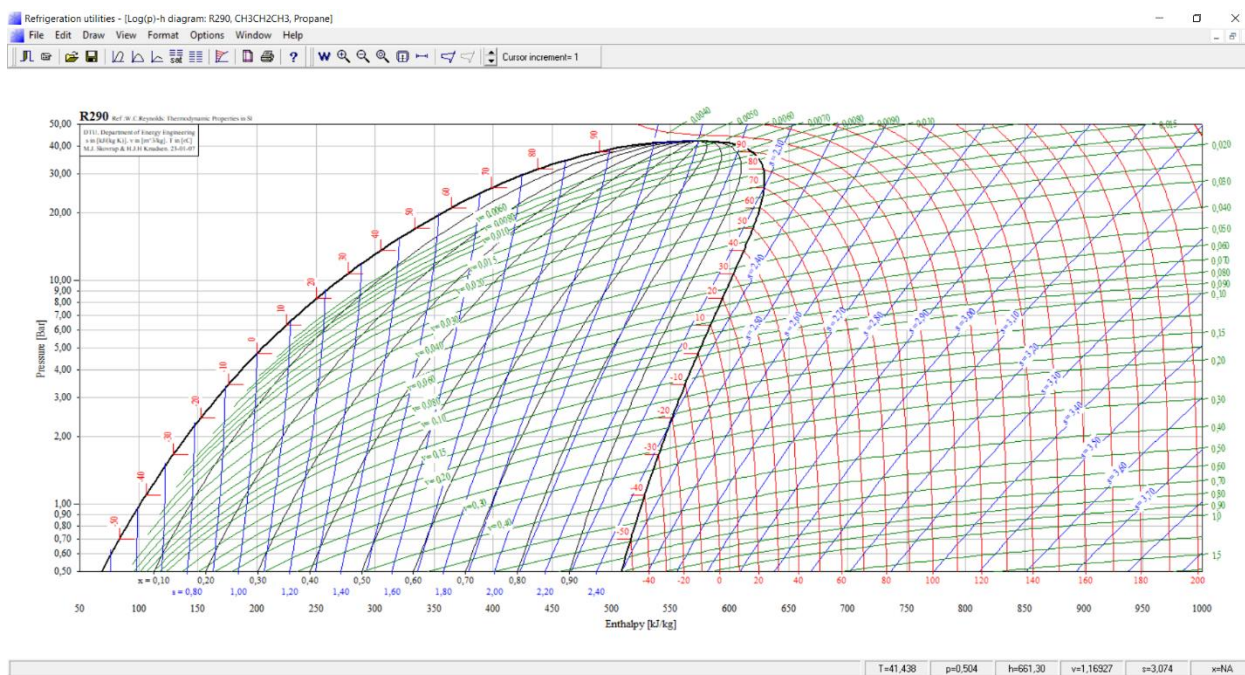


Рисунок 10.17 – Створена діаграми h - P в Refrigeration Utilities

Діаграма h - P для R290 тепер накреслена з використанням значень за замовчуванням для форматування (кількість кривих для сталих температур, ентропій та питомого об'єму та стандартними значеннями для кольорів ліній тощо). Відмітимо, що коли користувач рухає курсор мишки по площині графіка, термодинамічні координати, такі як тиск, температура тощо, на позиції курсора мишки показуються в нижньому лівому куті. Якщо користувач натисне кнопку мишки, коли курсор буде в середині площини графіка, термодинамічні координати будуть скопійовані до локального буферу обміну. Використовуючи меню "Options" та команду "Show log..." можна побачити координати (рисунок 10.18) [10].

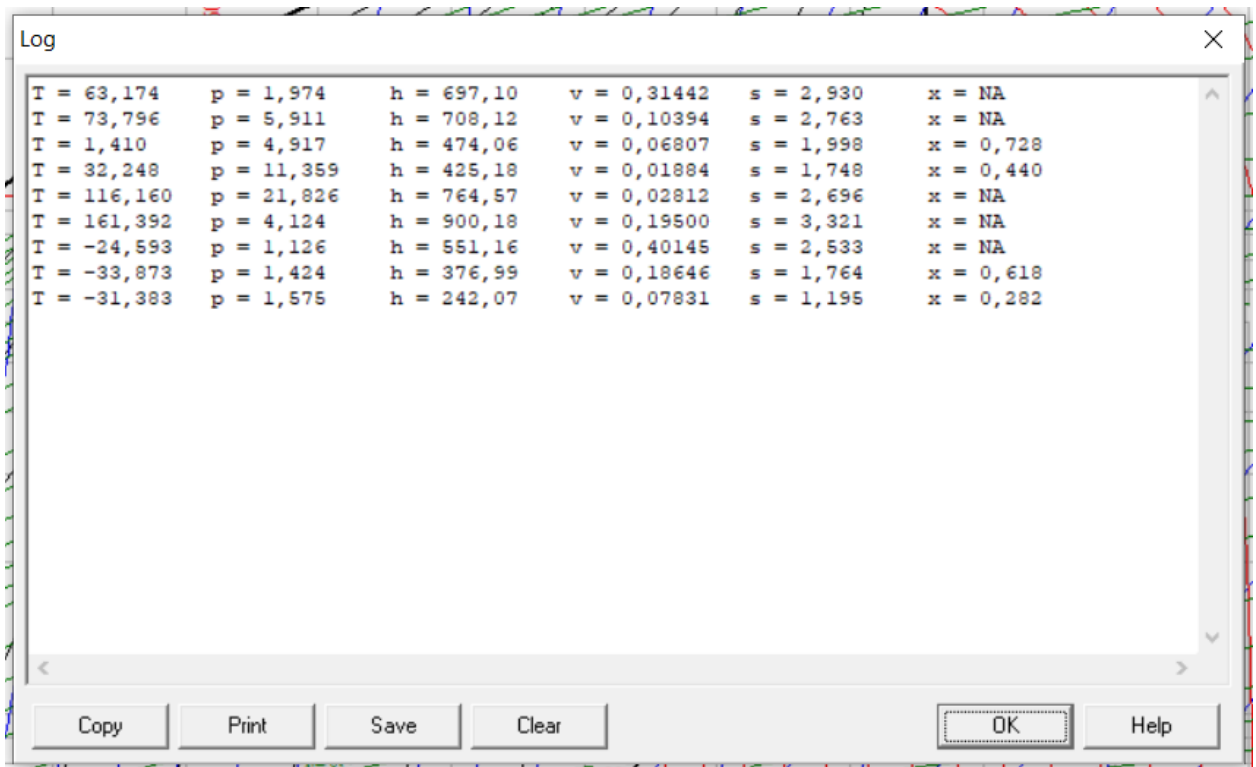


Рисунок 10.18 – Збережені в буфері обміну точки на діаграмі

Для сумішей холодоагентів, таких як серія R400, розрахунки властивостей холодоагентів в двофазній області займають більше часу, ніж розрахунок для чистої речовини. Отже, коли користувач вибере суміш холодоагентів, як R404A, він буде вимушений вибирати/знімати вибір ліній постійного складу, ентропії та температури, для двофазної області. Зняття

вибору ліній для постійних ентропій та ступенів сухості суттєво пришвидшить процес розрахунку (та креслення графіку) [10].

Маючи графік діаграми h - P , користувач може задати холодильний цикл та визначити точки стану, накреслені на діаграмі. Для цього необхідно вибрати пункт «Input Cycle» з меню Options (рисунок 10.19). Користувач може вибирати між чотирма різними холодильними циклами (рисунок 10.20). Для прикладу виберемо одностадійний цикл, та введемо підходящі значення для температури кипіння, конденсації тощо, нехтуючи падінням тиску і таким іншим (рисунок 10.21) [10].

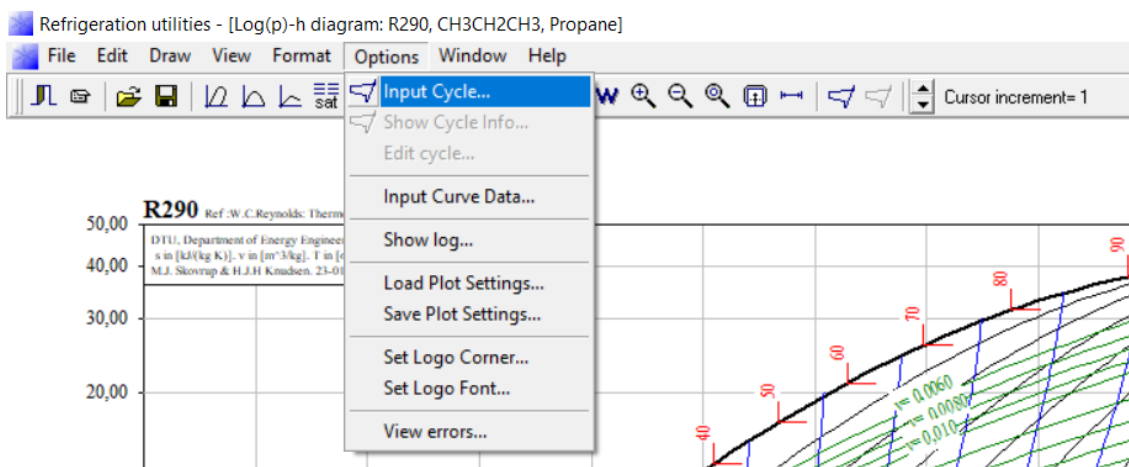


Рисунок 10.19 – Введення циклу в Refrigeration Utilities

Рисунок 10.20 – Вибір типів циклів в Refrigeration Utilities

Рисунок 10.21 – Введення значень параметрів циклу

В правій частині екрану будуть показані значення для питомої роботи. Далі слід натиснути кнопку «Show info» (рисунок 10.22). В цьому вікні надається більше інформації про цикл та можливо визначити продуктивність циклу (як холодопродуктивність, так і масову витрату чи споживання енергії). Лише одна з цих змінних повинна бути задана. Значення всіх інших змінних буде розраховано автоматично [10].

Рисунок 10.22 – Введення холодопродуктивності циклу

Щоб накреслити цикл (вузлові точки) на діаграмі необхідно натиснути кнопку ОК, рисунок 10.23 [10].

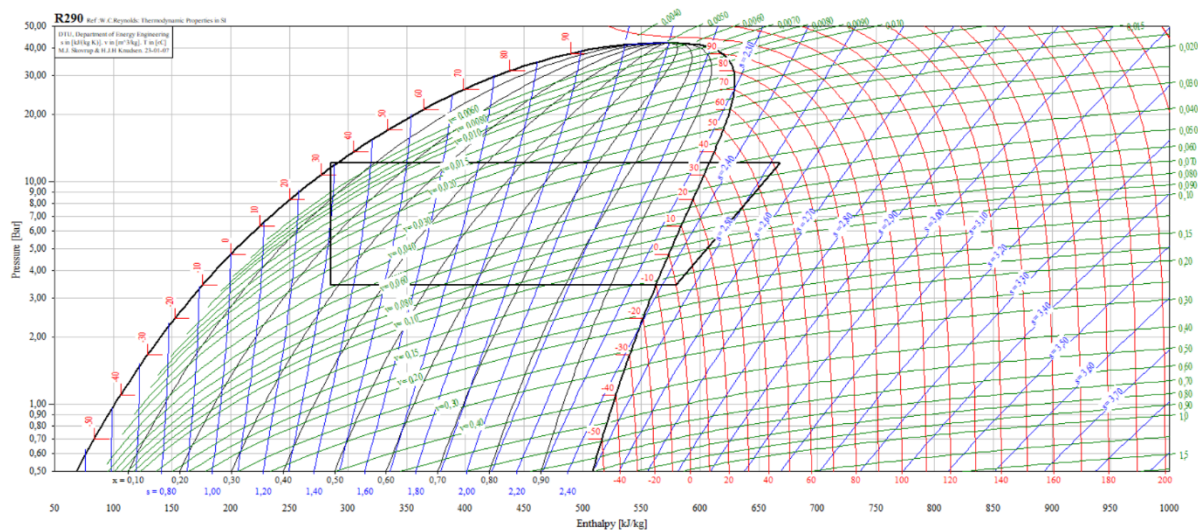





Рисунок 10.23 – Зображення циклу на діаграмі в Refrigeration Utilities

Користувач може завжди перевірити характеристику циклу, який він накреслив, шляхом вибору пункту “Show cycle info..” з меню опцій. Для порівняння декількох циклів їх можна накреслити на одній діаграмі [10].











10.5 Огляд програм в CoolPack

Основні функції програм в CoolPack наведені в таблиці 10.3 [10].

Таблиця 10.3 – Програми в CoolPack

Опис програми	Іконка
Програми в Refrigeration Utilities	
Холодильні утиліти можуть бути використані для розрахунку властивостей холодоагенту та створення графіків високої якості	
Теплообмінні рідини – невелика зручна програма, що використовується для термодинамічних та теплофізичних властивостей теплообмінних рідин (вторинних холодоагентів)	
Калькулятор холодоагентів – невелика зручна програма для розрахунку термодинамічних та теплофізичних властивостей холодоагентів	

Продовження таблиці 10.3

Опис програми	Іконка
Програми в EESCoolTools: Cycle analysis (C-Tools)	
Аналіз одностадійного циклу: Випарник з сухим розширенням	
Аналіз одностадійного циклу: Затоплений випарник	
Аналіз одностадійного циклу: Дві системи зі звичайним конденсатором	
Аналіз одностадійного циклу: Дві системи, охолодження рідини в низькотемпературній системі	
Аналіз двостадійного циклу: Охолодження всмоктуваного газу вприскуванням рідини	
Аналіз двостадійного циклу: Відкритий проміжний холодильний, затоплений випарник	
Аналіз двостадійного циклу: Закритий проміжний холодильний, затоплений випарник	
Аналіз одностадійного циклу: Транскритичний цикл з CO ₂	
Аналіз двостадійного циклу: Транскритичний цикл з CO ₂	
Аналіз двостадійного циклу: каскадна система	
Програми в EESCoolTools: Design	
<p>Пакет для проектування одностадійної системи з випарником з сухим розширенням, що містить:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Аналіз одностадійного циклу - Визначення розмірів системи: розрахунок розмірів компонентів - Енергетичний аналіз системи: розрахунок робочих умов - Енергетичний аналіз системи: розрахунок робочих параметрів системи – багатократні паралельно з'єднанні компресори та випарники 	
Програми в EESCoolTools: Evaluation (E-Tools)	
<p>Енергетичний аналіз одностадійної системи з випарником з сухим розширенням:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Стала продуктивність компресора 	
<p>Енергетичний аналіз одностадійної системи з випарником з сухим розширенням:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Змінна продуктивність компресора 	
Програми в EESCoolTools: Auxiliary Tools (A-Tools)	
Компресор	

Продовження таблиці 10.3

Опис програми	Іконка
Значення коефіцієнтів теплопередачі для випарника	
Значення коефіцієнтів теплопередачі для конденсатора	
Охолодження та осушення вологого повітря	
Гідравлічний опір та теплообмін у трубопроводах з газами	
Гідравлічний опір та теплообмін у трубопроводах з рідинами	
Термодинамічні та теплофізичні властивості холодоагентів	
Порівняння трьох холодоагентів з використанням одностадійного циклу	
Розрахунок потреб охолодження для охолоджуваного приміщення	
Розрахунок потреб охолодження для рідинних охолоджувачів	
Розрахунок потреб охолодження для вітрин	
Розрахунок потреб охолодження для кімнат з кондиціонуванням	
Розрахунок властивостей вологого повітря	
Розрахунок вартості робочого циклу	
Програми в Dynamic	
Загальна модель для охолодження приміщення з товарами (двопозиційний контроль компресора)	

Всі програми в CoolPack містять детальну інформацію про роботу в Help, разом з програмою встановлюється навчальні матеріали в форматі pdf з прикладами роботи в основних програмах. Також у відкритому доступі наявні навчальні відеоматеріали, наприклад [19-22].

Контрольні запитання

1. Пояснити значення спеціалізованого програмного забезпечення в хімічній інженерії

2. Дати оцінку програмним пакети для моделювання в хімічній інженерії
3. Пояснити типову структуру програми для моделювання
4. Навести загальну характеристику програми CoolPack
5. Дати характеристику основних груп програм в CoolPack
6. Охарактеризувати інтерфейс програми CoolPack
7. Пояснити основні принципи роботи з набором програм EESCoolTools

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Perry's Chemical Engineers' Handbook. New York: McGraw-Hill, 1997.
2. Ракицький В.Л., Петров В.В. Теоретичні основи холодильної техніки. Методичні вказівки для розв'язання задач з курсу «Теоретичні основи холодильної техніки» для студентів спеціальності 6.090200 – інженерна механіка. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 47 с.
3. Корнієнко Я.М. Процеси та обладнання хімічної технології: підручн. у 2 ч. Ч. 1. / Я.М. Корнієнко, Ю.Ю. Лукач, І.О. Мікульонок та ін. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 300 с. – Бібліогр.: с. 298-299.
4. Refrigeration and Air conditioning [Електронний ресурс]. – : [Електронні текстові дані]. – Електронні дані. – Режим доступу: https://www.rajagiritech.ac.in/Home/mech/Course_Content/Semester%20VII/ME%20405%20Refrigeration%20and%20Airconditioning/Module%201.pdf (дата звернення 20.09.2022) – Назва з екрана
5. Stoecker W. F (1998). Industrial refrigeration handbook. New York. McGraw-Hill. .
6. Dahm K. D., Visco D. P. (2015). Fundamentals of Chemical Engineering Thermodynamics. Stamford, Cengage Learning
7. Smith, J. M., van Ness, H. C. (2018). Introduction to chemical engineering thermodynamics. New York, McGraw-Hill.
8. Borgnakke C., Sonntag R. E. (2013). Fundamentals of Thermodynamics, New York, Wiley.
9. Matsoukas Th. (2013). Fundamentals of chemical engineering thermodynamics: with applications to chemical processes, New York, Prentice Hill
10. CoolPack – IPU [Електронний ресурс]. – : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://www.ipu.dk/products/coolpack/> (дата звернення 07.11.2022) – Назва з екрана

11. Ракицький В.Л., Петров В.В. Теоретичні основи холодильної техніки. Термодинамічні властивості робочих речовин: Довідник. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 56 с.
12. Yaws C. L. (2014). Thermophysical Properties of Chemicals and Hydrocarbons. Second Edition. Amsterdam. Elsevier.
13. Hundy G.F., Trott A.R., Welch T.C. (2016). Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pump. Fifth Edition. Amsterdam. Elsevier.
14. Sinnott R. K. (2005) Coulson & Richardson's Chemical Engineering. Volume 6. Chemical Engineering Design. Fourth edition. Amsterdam. Elsevier.
15. Software | Tools | LG Water Solutions [Електронний ресурс]. – : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://www.lgwatersolutions.com/en/tools/software> (дата звернення 27.12.2022) – Назва з екрана
16. Software Hydranautics – A Nitto Group Company [Електронний ресурс]. – : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://membranes.com/solutions/software/> (дата звернення 27.12.2022) – Назва з екрана
17. WAVE Water Treatment Design Software [Електронний ресурс]. – : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://www.dupont.com/water/resources/design-software.html> (дата звернення 27.12.2022) – Назва з екрана
18. Software Select | Design Tool | Toray Membrane | TORAY [Електронний ресурс]. – : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://www.water.toray/knowledge/tool/software/> (дата звернення 27.12.2022) – Назва з екрана
19. Solving vapour compression refrigeration system numerical using COOLPACK – YouTube [Електронний ресурс]. – : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=EaoVUPzumFc> (дата звернення 06.01.2023) – Назва з екрана

20. Thermal analysis using coolpack software – YouTube [Електронний ресурс]. – : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=AAS9QCTpVmM> (дата звернення 06.01.2023) – Назва з екрана

21. Coolpack demo – YouTube [Електронний ресурс]. – : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=aeihd0PV6xU> (дата звернення 06.01.2023) – Назва з екрана

22. Coolpack for One-stage with R143a – YouTube. [Електронний ресурс]. – : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=uv0Q2J1JOps> (дата звернення 06.01.2023) – Назва з екрана