

УДК 621.564.27

DOI [https://doi.org/10.15589/znpp2026.2\(505\).7](https://doi.org/10.15589/znpp2026.2(505).7)**РЕФРИЖЕРАТОРНІ ЦИКЛИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ
СЕПАРАЦІЇ ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ****REFRIGERATION CYCLES FOR PROVIDING GAS MIXTURE
SEPARATION PROCESSES****Bohdan H. Hrudka**

bogdangennadievich@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1200-5442

Б. Г. Грудка,

канд. техн. наук, доцент

*Odesa National University of Technology, Odesa**Одеський національний технологічний університет, м. Одеса*

Анотація. Мета статті – аналіз та обґрунтування вибору ефективних охолоджуючих систем (в діапазоні температур 30...250 К) для забезпечення процесів сепарації технічних газів, таких як адсорбція, десублімація та низькотемпературна ректифікація. У роботі використано методи термодинамічного аналізу циклів та теоретичного моделювання процесів тепломасообміну. Досліджено схеми парокомпресійних циклів, газових кріогенних машин Стірлінга із зовнішнім циркуляційним контуром, а також дросельних циклів на неон-гелієвих сумішах. Проведено порівняльний аналіз двох типів холодильних циклів для кріогенних ректифікаційних колон: з ізольованим контуром та поєднаних циклів, де робочим тілом є компонент суміші, що розділяється. Встановлено залежність холодопродуктивності від тиску та температури для неонових циклів. Запропоновано спосіб запобігання замерзанню ксенону в ректифікаційних колонах шляхом введення проміжного компонента-посередника (метану) і алгоритм автоматичного управління його концентрацією за допомогою ПІД-регулятора. Вперше запропоновано методику стабілізації процесу ректифікації бінарних сумішей з різко відмінними температурами кипіння компонентів (на прикладі системи Хе–N₂) за рахунок створення контрольованого «шару-посередника», що виключає контакт холодної флегми з продуктом, що кристалізується. Виведено апроксимуючі рівняння для визначення температур фазової рівноваги в інтервалі тисків 10...20 бар. Запропоновані схемні рішення та алгоритми управління дозволяють підвищити енергетичну ефективність установок одержання чистих інертних газів (Ne, Kr, Xe), забезпечити безперервність процесу очищення в десубліматорах та запобігти аварійним ситуаціям, пов'язаним з утворенням крижаних пробок у кріогенному обладнанні.

Ключові слова: холодильний цикл; адсорбер; виморожувач; регенерація; дистиляція; колона; конденсатор-випарник

Abstract. The study aims to analyze and justify the selection of efficient cooling systems (within the temperature range of 30...250 K) to support technical gas separation processes such as adsorption, desublimation, and low-temperature distillation. Methods of thermodynamic cycle analysis and theoretical modeling of heat and mass transfer processes were employed. The study investigates vapor-compression cycles, Stirling-type gas cryogenic machines with external circulation loops, and throttling cycles operating on neon-helium mixtures. A comparative analysis was conducted for two types of refrigeration cycles used in cryogenic distillation columns: those with an isolated circuit and combined cycles where the working fluid is a component of the separated mixture. Capacity dependencies on pressure and temperature were established for neon cycles. A method to prevent xenon freezing in rectification columns by introducing an intermediate «buffer» component (methane) is proposed, along with an automatic control algorithm using a PID controller. For the first time, a technique has been proposed to stabilize the rectification of binary mixtures with sharply differing boiling points (exemplified by the Xe–N₂ system) by creating a controlled “intermediate layer” that prevents contact between the cold reflux and the crystallizing product. Approximating equations for determining phase equilibrium temperatures in the pressure range of 10...20 bar were derived. The proposed circuit designs and control algorithms enhance the energy efficiency of plants producing pure noble gases (Ne, Kr, Xe), ensure continuous purification in desublimators, and prevent emergency situations related to the formation of ice plugs in cryogenic equipment.

Key words: refrigeration cycle; adsorber; moisture freezer; regeneration; distillation; column; condenser-evaporator.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Різноманітність газових продуктів та джерел вихідних сумішей зумовили використання різних методів сепарації. Залежно від складу первинного концентрату, властивостей компонентів та чистоти цільових продуктів застосовують певні послідовності низки технологій. Серед них:

- високотемпературні реакції гетеро- та гомогенного каталізу;
- мембранний поділ;
- центрифугування;
- короткоциклова адсорбція та ін.

Значна кількість періодичних та безперервних процесів сепарації реалізуються в умовах знижених температур. Холодильне забезпечення виробництва технічних газів супроводжується додатковим енергоспоживанням. При цьому відносно невеликі експлуатаційні витрати характерні при одержанні висококиплячих вуглеводнів, природних та синтетичних холодоагентів та переважних продуктів поділу повітря. Найбільш витратними є кріогенні технології отримання рідкісних газів високої чистоти та їх стабільних ізотопів [1]. В умовах підвищення цін на енергоносії та загострення конкуренції на ринку технічних газів актуальним стає перехід до енергозберігаючих технологій. Найважливішим фактором стає вибір оптимальних методів переробки сировини і холодильного забезпечення процесів сепарації [2, 3].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В апаратах адсорбційної очистки охолодження сприяє збільшенню питомої поглинаючої здатності шару. Крім компенсації теплоприпливів, кріостатування спрямоване на компенсацію тепла сорбції та попереднє охолодження шару сорбенту [4–7]. Рівень робочих температур адсорбера залежить від тиску та складу суміші, а також фізичних властивостей цільового продукту та домішок, що поглинаються. Як правило, в адсорберах низькотемпературного очищення фазові перетворення не практикують, а підтримують режим таким чином, щоб компоненти каналу адсорбера залишалися в газоподібному вигляді. У більшості промислових адсорберів процес очищення здійснюють періодично, до настання проскоку домішок на виході. Далі, відбувається регенерація та охолодження шару при одночасному підживленні чистою речовиною. Для забезпечення безперервного очищення використовують 2–3 паралельно включених апарата (рис. 1), що працюють по черзі з відповідним зсувом по фазі [8, 9].

У сепараторі, показаному на рисунку 1, лівий адсорбер (A1) перебуває у режимі поглинання домішок (V1 і V3 відкриті). Зниження температури сорбенту забезпечується парокомпресійним холодильним циклом [10–14] на основі компресора C1. При цьому

компресор C2 протягом приблизно половини періоду вимкнено. Основний потік стисненого в компресорі C1 газоподібного холодоагенту направляють через конденсатор K1. За рахунок відведення від потоку тепла конденсації відбувається нагрівання та регенерація сорбенту в апараті A2. Співвідношення витрат, що протікають через конденсатори K1 та BK регулюється вентиллями V5 та V7. Після змішування потоків холодоагент дроселується в Др1 та охолоджує активний адсорбер A1 за допомогою випарника B1.

Після закінчення регенерації в адсорбері A2 вентиль V5 закривають і направляють весь потік холодоагенту через водяний конденсатор BK. Перед проскоком домішок A1 закривають, V1 і V3 і переходять з компресора C1 на C2. Через охолоджений адсорбер A2 спрямовують суміш через V2 та V4. Процеси насичення A2 та регенерації A1 протікають аналогічним чином.

Поряд з блоками, що перемикаються, в хімічній технології використовують адсорбери безперервної дії сепарації в рухомому шарі поглинача [15] (рис. 2).

На відміну від традиційних адсорберів (див. рис. 1) в апаратах з рухомим шаром сорбенту кількість арматури зведена до мінімуму. За рахунок цього підвищується надійність роботи та знижується кількість потенційних відмов обладнання [16–17]. Установа, що реалізує процес протиточної адсорбції, включає вертикальну колону з поярусно розташованими в ній камерами охолодження 2 і нагрівання 3 (рис. 2). Простір колони заповнено гранулами сорбенту 1. Вихідна

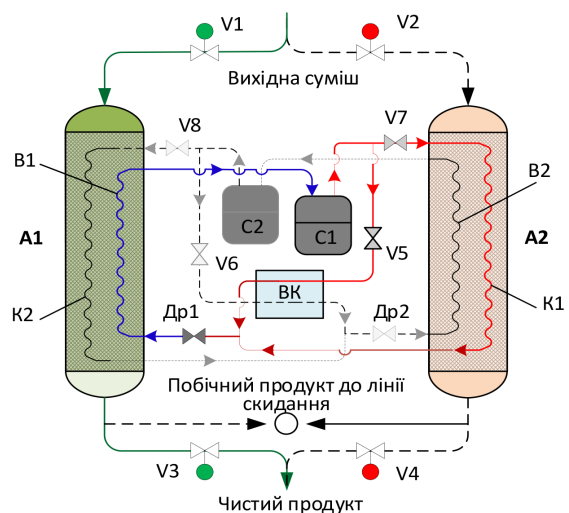


Рис. 1. Спрощена схема холодильного забезпечення очищення в адсорберах з нерухомим шаром сорбенту: V1...V4 – вентилі, що комутують потік продукту; A1 та A2 – адсорбери; C1 та C2 – компресори; B1 та B2 – випарники парокомпресійних холодильних циклів; BK – водяний конденсатор; K1 та K2 – конденсатори в шарі сорбенту; V5...V8 – вентилі, що регулюють тепловий баланс конденсаторів у процесі регенерації; Др1 та Др2 – дросельні вентилі холодильних циклів

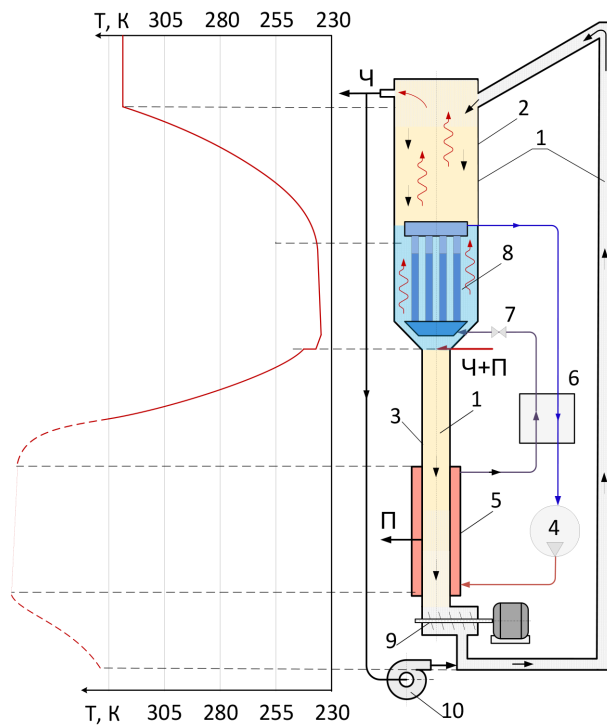


Рис. 2. Схема установки для непрерывной сепарации двоконпонентной смеси у шарі рухомого сорбенту та характер зміни температури за висотою апарату: Ч – чистий продукт; П – висококиплячий побічний компонент; (Ч+П) – вихідна суміш; 1 – гранули сорбенту; 2 – камера охолодження; 3 – канал нагріву; 4 – компресор; 5 – конденсатор холодильного циклу; 6 – рекуперативний теплообмінник; 7 – дросель; 8 – випарник; 9 – дозатор витрати гранул; 10 – насос циркуляції гранул сорбенту

суміш «Ч+П» вводиться в об'єм між камерами 2 і 3. Зниження температури гранул сорбенту, що рухаються, відбувається в камері 2 в протитоці з очищеним газом. Найбільш активне поглинання домішок «П» відбувається в зоні мінімальної температури сорбенту при контакті з трубками випарника 8. Стінки камери нагріву 3 в нижній частині знаходяться в тепловому контакті з конденсатором холодильної машини 5. Підвищення температури шару, що рухається, супроводжується активною десорбцією домішок «П», які виводяться з контуру в зону скидання. Кількість суміші, що подається, залежить від концентрації домішок, коефіцієнта адсорбції поглинача і його витрати, що задається дозатором 9. Ці параметри також узгоджуються з потужністю холодильної машини.

Низькотемпературне очищення суміші можна здійснити за рахунок фазового переходу газ – тверде тіло [18]. Об'єм поглинутих речовин у виморожувачі обмежений кількістю інею, що осаджується на одиниці охолодженої поверхні. Осадження твердих домішок відбувається у пучках трубок чи каналах, формованих теплопровідними ребрами [19]. Розвинена поверхня дозволяє зменшити термічний опір намороженої речовини та наблизити рівноважну

температуру до температури холодоагенту. Зміна температур по висоті трубчастого каналу виморожувача вологі схематично показана на рисунку 3. Відповідно до Закону Дальтона [20] для заданого тиску суміші P_{Σ} залишкова концентрація побічних домішок y_z визначається парціальним тиском чистого виморожуваного компонента $P_z^* = f(T)$, який залежить від рівноважної температури названого компонента (див. таблицю).

$$y_z = \frac{P_z^*}{P_{\Sigma}}. \quad (1)$$

Температура у першій колонці параметрів ($T = 271,9$ K) відповідає «точці роси» в даній суміші, при якій починається процес утворення інею. Для прийнятої початкової концентрації y_a і тиску P_{Σ} температура початку фазового переходу виявляється нижчою за потрібну точку ($T_{mp} = 273,16$ K). У такому потоці матиме місце фазовий перехід «пара – тверде тіло».

Через зростання парціального тиску H_2O в сумішах з підвищеною концентрацією y_a або тиском P_{Σ} (1)

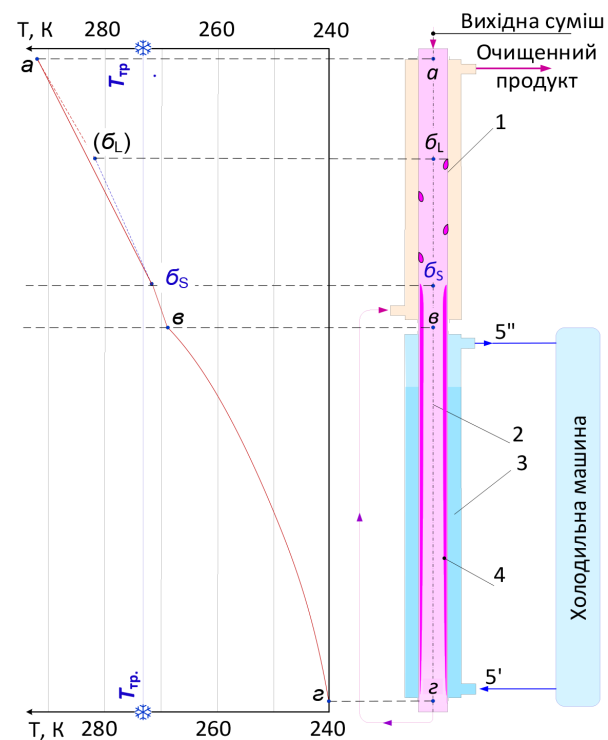


Рис. 3. Спрощена схема апарату для осушення газу методом десублімації та характер зміни температури по висоті апарату при тиску в суміші 1,1 бара та початкової концентрації $y_{H_2O} = 0,5\%$:

1 – теплообмінник; 2 – канал виморожувача; 3 – випарник холодильної машини; 4 – шар твердої речовини на стінках каналу; 5' та 5'' – вхід та вихід холодоагенту;

$a-b_L$ – охолодження потоку в теплообміннику до точки роси ($T = 271,9$ K); b_L-b_S – початок осадження інею на внутрішніх стінках теплообмінника; $e-z$ – випадання основної маси вологи в каналі виморожувача, що омивається холодоагентом

Залежність залишкового вмісту H_2O в апараті (рис. 3) від температури десублімації T_c при $y_a = y_{os} = 0,5$ % і тиску суміші $P_\Sigma = 110\,000$ Па

Параметр	Точка роси, «б _с »	Умови на виході з апарата в т. «г»						
Температура потоку, T , К	271,9	270	265	260	255	250	245	240
Рівноважний тиск H_2O , P^* , Па	550	470	306	196	123,2	76,0	46,0	27,3
Концентрація H_2O , y , %	0,5	0,427	0,278	0,178	0,112	0,069	0,042	0,025

рівноважна температура T_L може виявитися вищою за температуру потрібної точки H_2O . В цьому випадку до настання виморожування почне утворюватися рідка фаза (наприклад, при концентрації вологи $y_a = 1,0$ %). Такий процес настане у теплообмінному апараті 1 (точка б_L, рис. 3) при температурі $T = 281,5$ К.

Для забезпечення безперервної сепарації в десубліматорах застосовні класичні рішення, що використовуються в сорбційній техніці (рис. 1). Вони передбачають по чергу роботу двох апаратів, у яких процеси поглинання домішок та регенерації зрушені на половину періоду. Незважаючи на близькість схем періодично діючих адсорберів і виморожувачів, експлуатаційні режими в цих апаратах істотно різняться. Адсорбція тією чи іншою мірою зачіпає всі компоненти суміші і реалізується в широкому інтервалі температур і тисків. Для глибокої регенерації сорбентів потрібна температура 450...500 К, і тривалий процес продування стороннім газом з наступним вакуумуванням.

Виморожування характерне лише для обраних компонентів при появі фазового переходу в потоці. Як зазначено вище (див. табл.), ці умови задані температурою та парціальним тиском кожного з компонентів суміші. Для проведення «регенерації» та вилучення на мороженої речовини (рис. 3) достатньо підняти температуру на кілька десятків градусів вище за потрібну точку (для вологи – $T_{mp} = 273,16$ К), [21]. При цьому речовина перейде в рідку фазу і буде вилучена з апарату під впливом гравітації або надлишкового тиску. Важливою експлуатаційною перевагою виморожувачів є відносно вузький інтервал між температурами поглинання та сублімації. Навіть при помірному нагріванні речовина, що видобувається, залишає об'єм апарата, за винятком газу в «мертвому обсязі» каналу. Тому питомі витрати на холодильне забезпечення виявляються суттєво меншими, ніж у разі процесів адсорбції-десорбції.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є аналіз охолоджуючих систем для забезпечення очищення газів в інтервалі температур 30...250 К.

Об'єктом дослідження є термодинамічні цикли та схеми рефрижераторних систем.

Предметом дослідження є параметри та енергетичні характеристики рефрижераторних систем.

Методи дослідження – теоретичні розробки та аналіз.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

При охолодженні дистиляційних колон практикують два типи холодильних циклів. У першому варіанті контур охолоджувача ізольований від порожнини апарату ректифікації, а відведення тепла здійснюють за допомогою теплообмінника (конденсатора-випарника). Конденсаторні колони допускають використання безлічі холодильних агентів і різних циклів, включаючи розімкнені, наприклад, випаровування рідкого азоту.

У другому випадку рефрижераторний процес безпосередньо пов'язаний із технологічним контуром. При цьому в якості робочого тіла використовується суміш, збагачена низькокиплячим компонентом суміші, що розділяється. Потік відбирається компресором з верхньої частини контактного простору і потім повертається після дроселювання до тиску в дистиляційній колоні.

Приклад охолодження колони за допомогою зовнішнього холодильного циклу показаний на рисунку 4. Після стиснення в компресорі (С) охолодження та конденсація холодоагенту здійснюється у двох апаратах – водяному конденсаторі (ВК) та випарнику ректифікаційної колони (ВРК), який по суті є додатковим. Паралельне вмикання апаратів ВК-ВРК дозволяє підтримувати тепловий баланс колони, тобто відповідність між потужністю, що підводиться в кубі за допомогою ВРК, і теплом, що відводиться у верхньому апараті – конденсатор ректифікаційної колони (КРК). Як відомо, тепло Q_Σ , яке відбирається в циклі на ділянці 2–3–4 складається з потужності компресора N та холодопродуктивності циклу Q_χ , (рис. 4), [22].

$$Q_\Sigma = (h_2 - h_4) \cdot g_c = N + Q_\chi, \quad (2)$$

де g_c – продуктивність компресора, кг/с; h – ентальпії у відповідних точках, кДж/кг.

З формули (2) випливає, що у разі використання для нагрівання в ВРК повної витрати холодоагенту (g_c), енергія, що підводиться до куба колони, перевищить кількість тепла, що відбирається в конденсаторі ($Q_\Sigma > Q_\chi$). Цей дисбаланс посилюється за відсутності попереднього охолодження вихідної суміші та у разі відсутності теплоізоляції колони. Надмірне тепло призведе до зростання тиску та порушить процес масообміну між потоками рідини та пари в контактному просторі апарату. У наведеній схемі підтримка теплової рівноваги досягається шляхом зменшення витрати холодоагенту через апарат ВРК ($g'' < g_c$) за

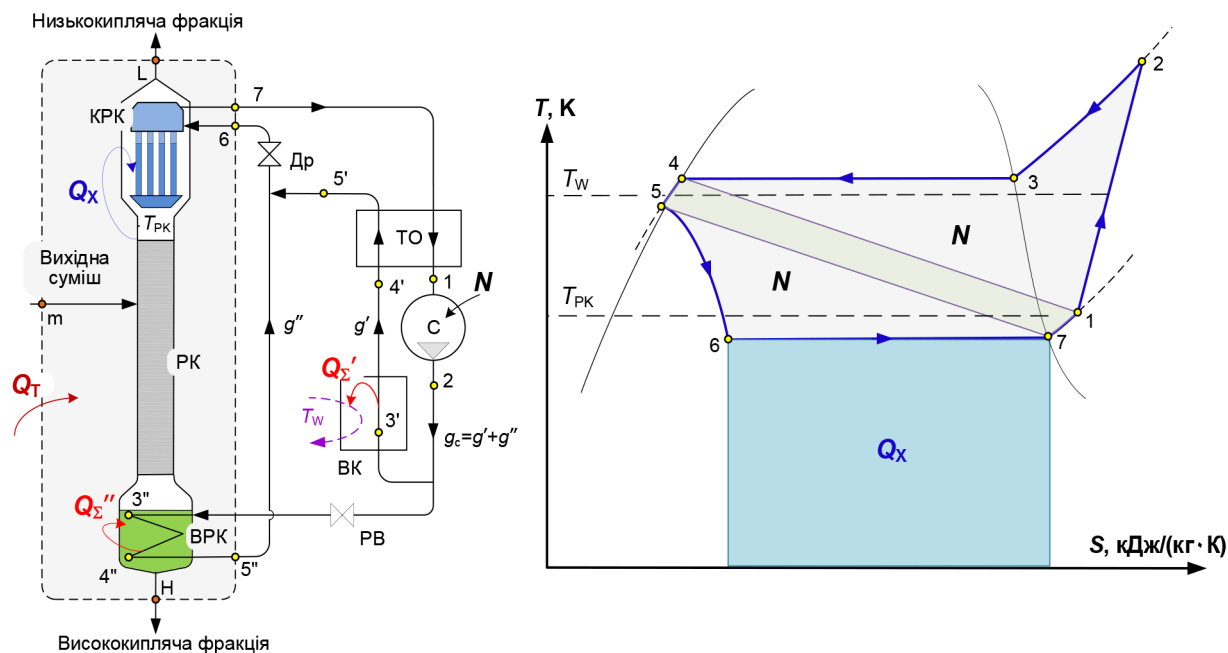


Рис. 4 – Конденсаторний тип колони (а) з ізованим холодильним циклом та процес її енергетичного забезпечення у T - s -діаграмі (б):

РК – ректифікаційна колона; С – компресор; ВК – водяний конденсатор холодильного циклу; Др – дросель; РВ – регулюючий вентиль; BPK – випарник ректифікаційної колони; KPK – конденсатор ректифікаційної колони; N – потужність компресора; Q_X – холодопродуктивність; Q_{Σ} – тепло конденсації холодоагенту; Q_T – теплоприпливи до колони

допомогою регулятора РВ. З теплового балансу колони випливає

$$(h_2 - h_{5'}) \cdot g'' + Q_T + [h_m \cdot g_m - h_H \cdot g_H - h_L \cdot g_L] = (h_6 - h_7) \cdot g_c \quad (3)$$

де Q_T – теплоприпливи до колони через ізоляцію; g'' – витрата холодоагенту в контурі BPK (рис. 4, а); комплекс у квадратних дужках відбиває вплив компонентів суміші на тепловий баланс колони.

На рисунку 5 показано схему охолодження колони конденсаторного типу на базі одноступеневої кріогенної газової машини (КГМ), що працює за циклом Стірлінга [23]. У порівнянні з дросельними низькотемпературними циклами, така система відносно компактна і не потребує зовнішнього холодоагенту (рідкого N_2). Оскільки газові машини мають внутрішній замкнутий контур з обмеженим об'ємом робочого тіла (газоподібним He), це ускладнює їх використання для охолодження віддалених об'єктів. Зазначений недолік усунуто за рахунок додаткового зовнішнього контуру, в якому циркуляція гелію забезпечується відцентровим нагнітачем 6 (рис. 5) [24]. По суті, у такій системі є два гідралічно ізованих обсяги гелію – робоча порожнина підвищеного тиску КГМ та контур, що зв'язує рефрижератор кріогенної газової машини та конденсатор колони.

Відомі схемні рішення на базі двоступеневих газових машин, що використовуються у виробництві неону та його поділу на ізотопні компоненти [25]. Для

таких КГМ характерні два температурні рівні охолодження. Перший каскад пов'язаний з огорожувальними екранами для відведення тепла лише на рівні близько 80 К, другий – безпосередньо забезпечує кріостатування колони при 27...30 К.

У технологіях отримання чистого неону використовуються переважно поєднані (безконденсаторні) цикли охолодження (рис. 6), [26]. Ліва схема характерна у маловитратних лабораторних системах.

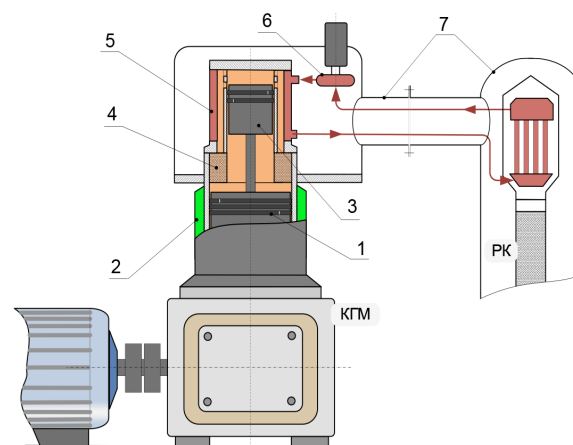


Рис. 5 – Схема охолодження ректифікаційної колони (РК) на базі газової кріогенної машини Стірлінга (КГМ):

1 – компресорний поршень; 2 – водяна сорочка циліндра; 3 – витискувач; 4 – регенератор; 5 – рефрижератор КГМ; 6 – турбонагнітач циркуляційного контуру теплоносія (гелій); 7 – вакуумний кожух

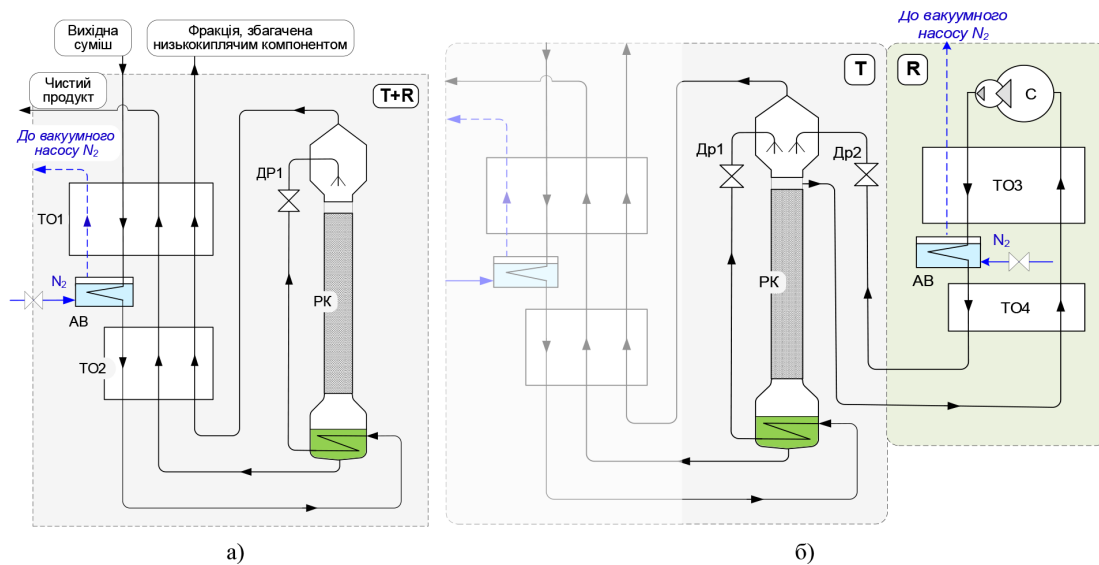


Рис. 6. Поєднання холодильного циклу «R» з технологічним контуром «Т» в установці ректифікаційного поділу неону та гелію: ТО – теплообмінники; АВ – азотні ванни; РК – ректифікаційна колона; ДР – дросельні вентиля; С – компресор

Вона базується на дросельному циклі із попереднім азотним охолодженням. У якості робочого тіла використовується продукт, що очищається (Ne підвищеного тиску). Для підвищення ефективності циклу практикують вакуумування проміжного холодильного агента (N_2) у ванні АВ до залишкового тиску $P_{N_2} = 15...30$ кПа ($T_{N_2} = 64,2...68,3$ К).

Недоліком схеми (рис. 6,а) є відносно низька продуктивність і необхідність підтримки високого тиску суміші, що переробляється. При $P_{\Sigma} < 80$ бар холодопродуктивність циклів на неоні, а особливо на Ne–Ne сумішах, різко падає (рис. 7) [27].

Недоліки розглянутої установки усунуто за рахунок введення у схему додаткового дросельного циклу

(рис. 6, б) [28]. Робоче тіло відбирається безпосередньо з колони РК у верхній частині контактного простору, відігрівается у каскаді теплообмінників-рекуператорів та компримується до РК. Подальше охолодження здійснюють в ТО3-ТО4 і ванні АВ з вакуумованим азотом. Залежність питомої холодопродуктивності q_x неонових циклів від тиску прямого потоку і температури азотної охолоджуючої ванни представлені у вигляді графіків на рис. 7.

Очищення «важких» інертних газів (Kr і Xe) від низькокиплячих домішок, переважно практикують у колонах з насадковим контактним простором. Для відведення тепла в конденсаторах використовують розіркнені цикли на основі киплячого азоту.

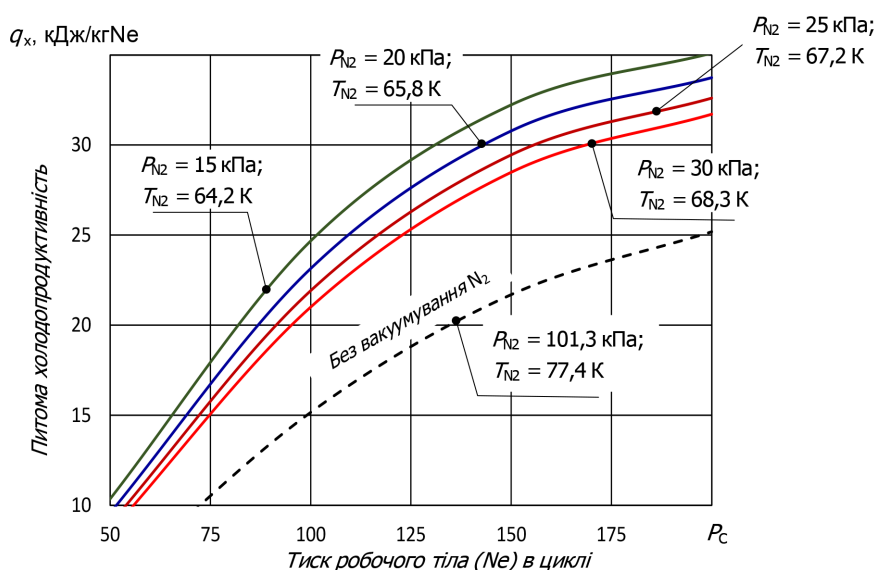


Рис. 7. Питомо холодопродуктивність неонових циклів (рис. 6, б) залежно від тиску прямого потоку та температури в охолоджуючій азотній ванні. Недорекуперація у теплообмінних апаратах на азотному рівні $\Delta T = 5$ К; питомі теплоприпливи у циклі $q_m = 0,5$ кДж/кгNe [29]

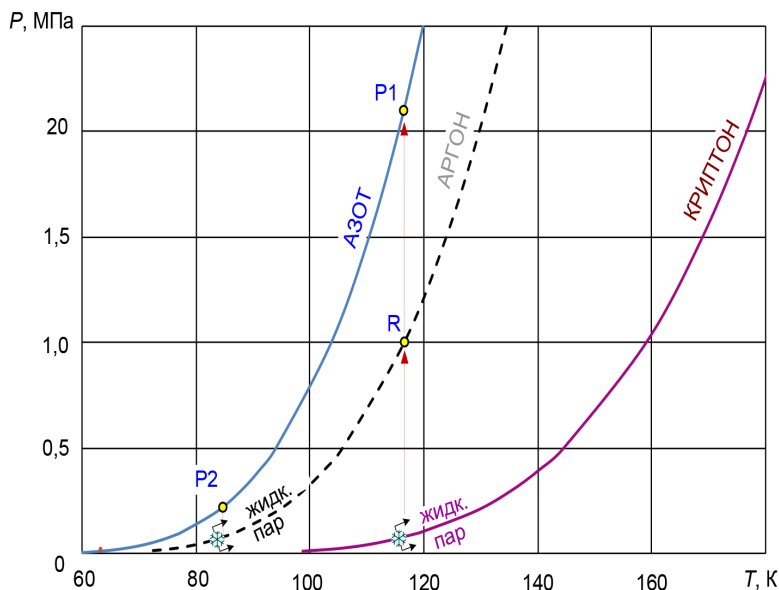


Рис. 8. P – T -залежності чистих речовин: азот – зовнішній холодоагент; аргон – проміжний теплоносіє у термосифоні; криптон – продукт ректифікації; сніжинками позначені потрібні точки, нижче за температуру яких речовини переходять у твердий стан

Навіть у разі отримання відносно низькокиплячого криптону такий вид охолодження може призвести до появи твердої фази, так як криптон замерзає при $T_{Kr} \leq 115,8$ К. Як впливає з P – T -залежностей (рис. 8) для запобігання наможування Kr на поверхні конденсатора потрібно підвищити тиск $P_{N_2} \geq 20$ бара.

Вимушене підвищення тиску N_2 в конденсаторі (рис. 8 і 9, а) до стану P_1 створює технічні труднощі і нівелює переваги цього холодоагенту через зниження теплоти випаровування з $r_{N_2} = 200$ кДж/кг (при $P_{N_2} = 1$ бар) до $r_{N_2} = 114$ кДж/кг (при $P_{N_2} = 20$ бара).

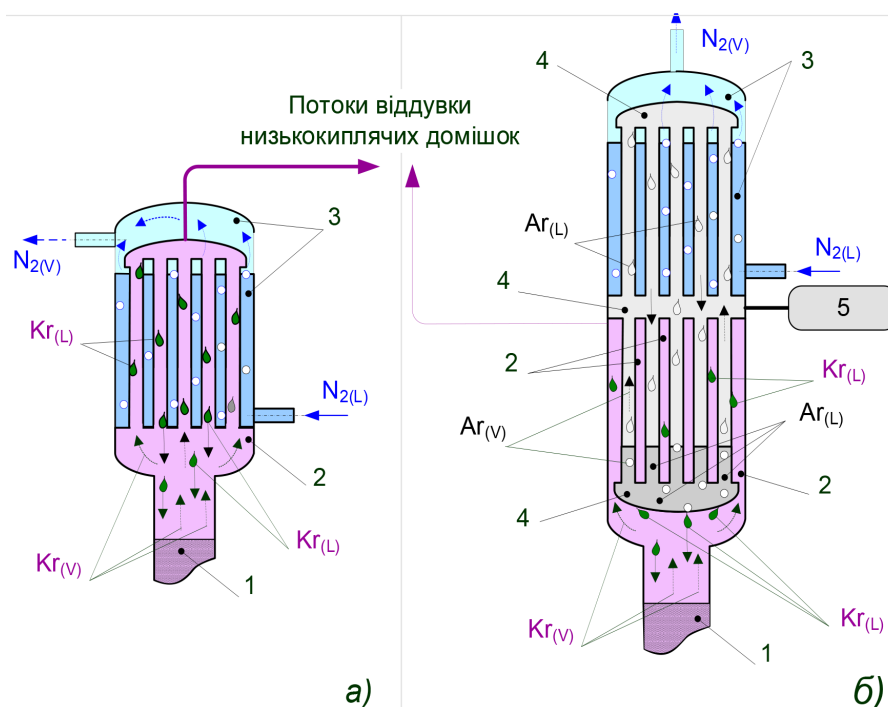


Рис. 9. Схеми конденсаторів ректифікаційних колон: (а) – класичного типу; (б) – з проміжним контуром, заповненим аргоном: 1 – контактний простір колони, заповнений масообмінними елементами; 2 – порожнина конденсатора, у якій утворюється криптонова флегма; 3 – охолоджуюча сорочка з киплячим азотом; 4 – порожнина термосифона, заповнена проміжним холодоагентом (Ar); 5 – буферний балон

Зменшити тиск киплячого холодоагенту без ризику заморозити висококиплячі компоненти можна за рахунок використання конденсатора з проміжним теплоносієм [30]. Штрихова лінія рисунку 8 ілюструє такий варіант відведення тепла з використанням аргону. Шляхом регулювання витрати зовнішнього холодоагенту (N_2), рівноважні параметри аргону в проміжному контурі (т. «R») підтримується на такому рівні, щоб T_R була вищою за температуру замерзання кріптонію. За рахунок проміжного теплоносія тиск азоту може бути знижений до стану P_2 при дозуванні витрати N_2 ; при оперативному регулюванні витрати з урахуванням недорекуперації та теплового навантаження – до P_3 , що відповідає кипінню азоту при атмосферному тиску.

У якості проміжних агентів підбирають речовини з температурою кипіння між висококиплячим компонентом і азотом. Крім аргону в прикладі застосовані також оксид азоту, кисень і метан. Конструкція вдосконаленого конденсатора з проміжним обсягом представлена рисунку 9, б. Слід зазначити, що у процесі роботи додатковий теплоносій не витрачається. При відігріванні установки продукт тимчасово відводиться в буферний балон (5), а у разі охолодження повертається в контур конденсатора (4).

При вилученні концентратів ксенону з атмосфери і в результаті застосування в наукомістких технологіях утворюються суміші, що містять низькокиплячі компоненти. Через різко відмінні температури кипіння ректифікація сумішей на основі Хе з одного боку і O_2 , Ar, N_2 , Ne супроводжується утворенням твердої

фази в контактному просторі колони [31]. Для ілюстрації властивостей складних компонентів на рис. 10 показані $T-s$ діаграми азоту та ксенону. З графіка (а) випливає, що N_2 може існувати у вигляді рідини при $T_c \leq 126,2$ К. У той же час як температура потрійної точки Хе на 35 градусів вище і при $T_{mp} \leq 161,4$ ксенон переходить у твердий стан (в), [32]. З цієї причини суміш цих компонентів не здатна утворювати двофазну систему «пара-рідина». Контакт холодної азотної флегми з парами ксенону призводить до утворення крижаних пробок та виключає повноцінні масообмінні процеси.

Поділ колони на ізолювані секції внаслідок замерзання загрожує серйозними наслідками, оскільки порожнини апарату можуть виявитися відрізними від лінії скидання газоподібної фракції та запобіжної арматури (рис. 11, а).

Для виключення несприятливих явищ при сепарації ксеноновмісних сумішей необхідно розділити області низькокиплячого компонента та ксенону. З цією метою у контактний простір ректифікаційного апарату необхідно ввести речовину-посередник, наприклад, метан, рис. 10, б [33]. В якості таких речовин, що штучно додаються, можуть використовуватися гази, температури конденсації яких знаходяться в проміжку між Хе і відповідним низькотемпературним компонентом. Для аналізованої бінарної суміші у якості «посередників» підходять оксид азоту і тетрафторметан (фреон-14). Спрощена схема ректифікаційної колони, в якій реалізований принцип очищення ксенону від низькокиплячих домішок, показаний на рисунку 11, б.

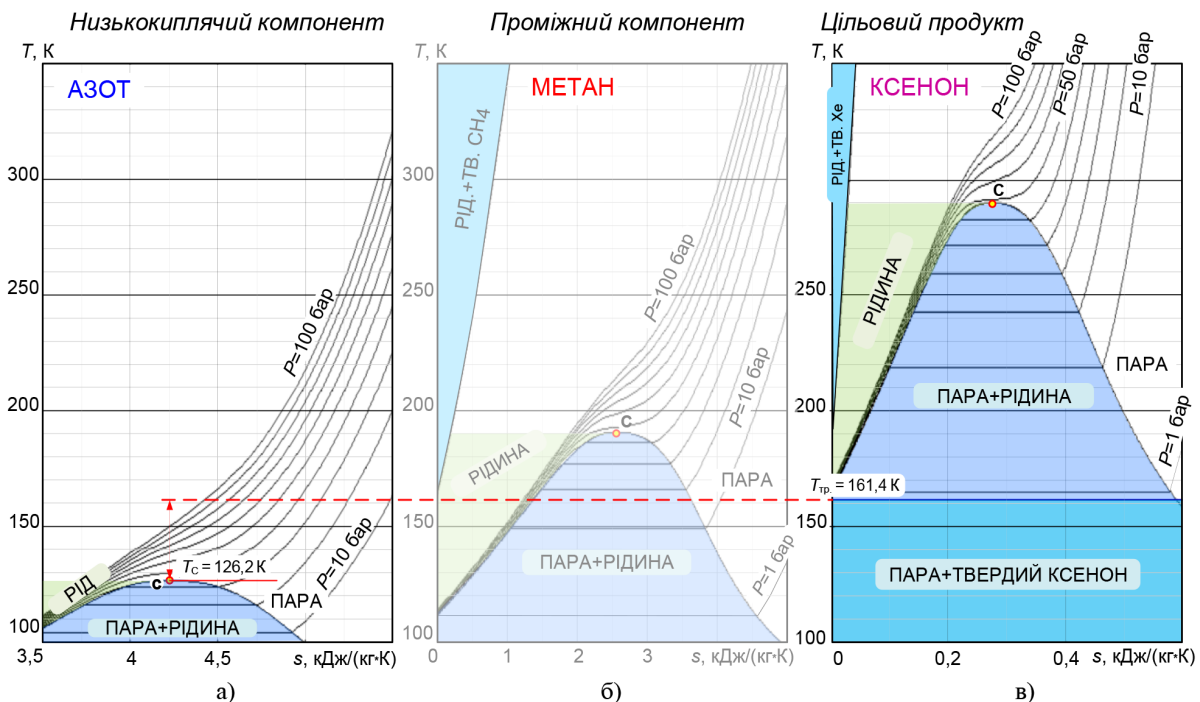


Рис. 10. Зіставлення $T-s$ -діаграм компонентів азотно-ксенонової суміші та метану у якості проміжного компоненту; С – критичні точки

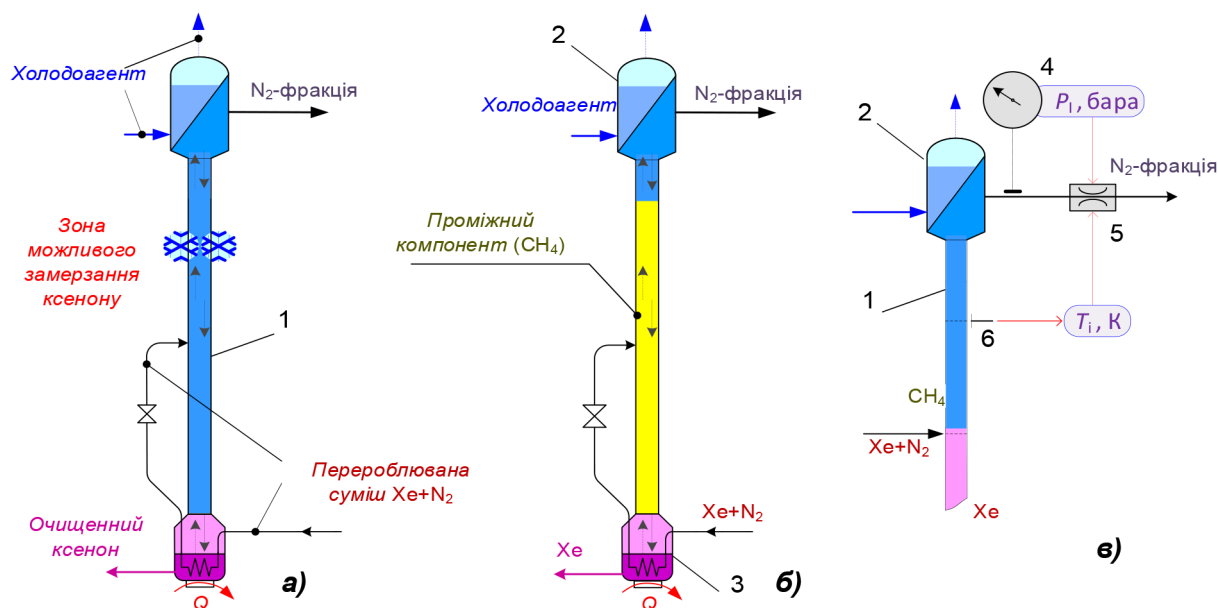


Рис. 11. Ректифікація компонентів з різко відмінними температурами кипіння: а) – класична схема; б) – введення у суміш проміжного компонента (метану) з метою запобігання замерзанню ксенону при контакті з холодною флегмою N_2 ; в) – принцип регулювання положення верхньої межі метанового прошарку шляхом зміни витрати потоку віддувки із колони; 1 – контактний простір; 2 – конденсатор; 3 – кубова секція; 4 – цифровий манометр; 5 – регулятор витрати; 6 – датчик температури

Для реалізації запропонованого технічного рішення важливо забезпечити утримання прошарку проміжного компонента (CH_4) у середній частині колони. При недостатній витраті фракції віддувки (N_2) відбудеться зміщення «метанової зони» в нижню частину і виникне загроза забруднення цільового продукту в кубі 3 (рис. 11, б). При надмірній витраті N_2 -фракції проміжний компонент (CH_4) буде втрачено і настане намерзання ксенону на поверхні конденсатора 2. Контроль положення метанового прошарку можна здійснити з використанням газового хроматографа, який аналізує концентрацію суміші в певному перерізі колони. Але цей метод досить дорогий і інерційний.

Відносно простий та оперативний прийом підтримки оптимальної витрати азотної фракції схематично показаний на рис. 11, в. У якості керуючих сигналів регулятора витрати 5 використані оцифровані показання двох індикаторів: датчика тиску 4 (P_i) і термометра 6 (T_i). Для відомого тиску P_i існує цілком певний взаємозв'язок між концентрацією суміші та її температурою (див. відповідно до [32] рис. 10 (а і б) якщо при $P_i = 10$ бар температура дорівнює $T_i = 149,1$ К, то в контрольованому перерізі знаходиться чистий метан ($y_{CH_4} = 1,0$). А якщо $T_i = 103,8$ К, то у вказаній точці буде чистий азот ($y_{CH_4} = 0$). При проміжних значеннях $103,8 \text{ К} \leq T_i \leq 149,1 \text{ К}$ концентрація метану визначається співвідношенням

$$y_{CH_4} = \frac{T_{N_2} - T_i}{T_{N_2} - T_{CH_4}}, \quad (4)$$

де T_{N_2} та T_{CH_4} – рівноважні температури чистих компонентів при тиску P_i .

З прийнятною похибкою ($\Delta < \pm 0,1 \%$) в інтервалі тисків $P = 10 \dots 20$ бар температури фазової рівноваги виражаються рівняннями

$$T_{N_2} = -0,029 \cdot P^2 + 2,05 \cdot P + 86,2; \quad (5)$$

$$T_{CH_4} = -0,041 \cdot P^2 + 2,89 \cdot P + 124,4. \quad (6)$$

Ці залежності використані в алгоритмі контролю метанового прошарку в колоні за принципом пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулювання у контурі із зворотним зв'язком (рис. 12). Таке поєднання параметрів дозволяє забезпечити необхідну точність управління і підтримувати стабільний процес ректифікації сумішей з властивостями компонентів, що різко відрізняються [34].

ПІД-регулятор формує керуючий сигнал, який складається з трьох доданків K_P , K_I та K_D , кожний з яких пропорційне, відповідно: вхідному сигналу; інтегралу вхідного сигналу за часом; похідній вхідного сигналу за часом. Шляхом підбору коефіцієнтів K_P , K_I та K_D встановлюється «вагомість» кожної зі складових таким чином, щоб параметр, що регулюється, досить швидко і без стрибків наближався до заданого рівня. Принцип роботи автоматичного ПІД-контур регулювання показаний на рис. 12. Для поточного тиску $P_i(\tau)$, у колоні за формулами (5) та (6) обчислюються температури кипіння чистих компонентів суміші – азоту та метану. Далі, з урахуванням співвідношення (4) та показань датчика температури $T_i(\tau)$

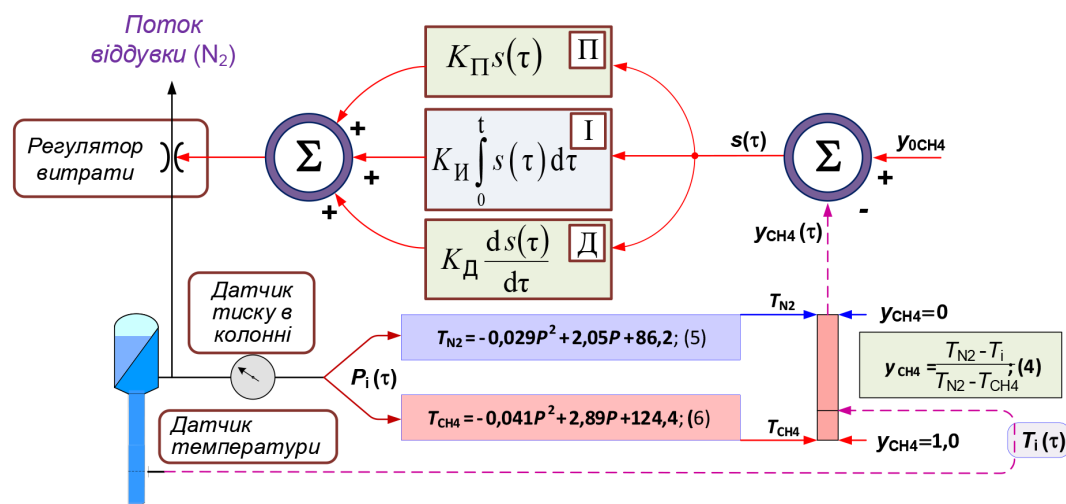


Рис. 12. Контур ПД регулювання рівня верхньої межі проміжного компонента (CH_4) в контактному просторі колони

визначається концентрація метану $y_{\text{CH}_4}(\tau)$ у характерному перерізі колони. Вхідним сигналом ПД-комірки є різниця $s(\tau)$ між обчисленим $y_{\text{CH}_4}(\tau)$ та цільовим параметром $y_{0\text{CH}_4}$ протягом даного часу. Сигнали трьох комірок (з урахуванням знаку) сумуються та формують результуючу команду для регулятора витрати.

ВИСНОВКИ

Серед низькотемпературних способів поділу газових сумішей найбільш ефективні адсорбція та ректифікація.

Вибір температурного рівня та відповідного холодильного циклу багато в чому визначається фізичними властивостями цільового продукту та побічних домішок.

При температурах помірного холоду для забезпечення роботи адсорберів та апаратів, заснованих на процесах фазової сепарації, переважно використовувати схеми тепло-, холодопостачання на основі парокompресійних холодильних агрегатів.

Системи попереднього очищення (збагачення) продуктів методом виморожування порівняно

з адсорберами менш затратні, оскільки за інших рівних умов здатні працювати у відносно вузькому інтервалі температур.

Для криогенного забезпечення маловитратних ректифікаційних апаратів застосовні криогенні машини з циркуляційним контуром зовнішнього теплоносія (гелію).

При отриманні цільового продукту у вигляді кубової (висококиплячої) фракції колони доцільно поєднання технологічного та рефрижераторного циклів. При цьому у якості робочого тіла в холодильному контурі може використовуватися низькокипляча фракція, що відбирається у верхній зоні контактного простору.

Застосування в колоні конденсатора з проміжним теплоносієм дозволяє розширити інтервал температур використання рідкого азоту в якості холодоагенту.

При поділі в колоні з азотним охолодженням бінарних сумішей на основі ксенону та низькокиплячих домішок можуть виникнути умови для замерзання Хе. Для запобігання утворенню твердої фази в середню частину апарату вводиться компонент-посередник з температурою фазового переходу між температурами конденсації речовин, що розділяються.

REFERENCES

- [1] Bondarenko V., Shevich Yu., Matvieiev E. (2016) Separation of neon isotopes by stepwise fractionation at 28 K. *Chemical and petroleum engineering*, Vol. 51, Is. 11, pp. 749–754. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-016-0116-6>
- [2] Bondarenko V. L., Vihurzhinska S. I., Poddubna M. V. et al. Energy saving technologies in installations for light inert gases producing. 1st IIR International Conference of Cryogenics and Refrigeration Technologies, Romania, Bucharest, pp. 230–234.
- [3] Symonenko Iu. M. (2014) Enerhozberihaiuchi tekhnolohii v ustanovkakh dlia otrymannia neona i heliia vysokoi chystoty. [Energy-saving technologies in installations for the production of neon and high-purity helium]. *Kholodylna tekhnika ta tekhnolohiia*, Vol. 50, No. 4, pp. 4–12. DOI: <https://doi.org/10.15673/0453-8307.4/2014.28044>. [in Ukrainian].
- [4] Dubinin M. M. (1960) The Potential Theory of Adsorption of Gases and Vapors for Adsorbents with Energetically Nonuniform Surfaces. *Chemical Reviews*, Vol. 60, Is. 2, pp. 235–241.
- [5] Pourhakkak P., Taghizadeh A., Taghizadeh M., Ghaedi M., Haghdoust S. (2021) Adsorption: Fundamental Processes and Applications. *Interface Science and Technology*, Vol.33, pp. 1–70.
- [6] Bondarenko, V. L. Symonenko Iu. M., Chyhrin A. A. (2014) Determination of optimal design and operational parameters of adsorbents for purification of neon-helium mixture. *Industrial gases*, No.3, pp.11–17.

- [7] Simonenko Yu. M. (2015) On the problem of choosing the shape of a cryogenic adsorber of cyclic action. *Chemical and petroleum engineering*, No. 2, pp.18–21.
- [8] Bondarenko V. L., Symonenko Iu. M., Chyhrin A. A. (2015) Optimization of design and operational parameters of adsorbers for purification of neon-helium mixture. *Chemical and petroleum engineering*, No. 10, pp. 23–27.
- [9] Symonenko Iu. M. (2015) Selecting the Shape of Cyclic Cryogenic Adsorber. *Chemical and petroleum engineering*, Vol. 51, Is. 1–2, pp. 100–105. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-015-0007-2>
- [10] Lavrenchenko G. K., Kravchenko M. B., Hrudka B. H. (2019) Analiz rezultativ ziednannia termodynamichnykh tsykliv parokompresornykh kholodylnykh mashyn. [Analysis of the results of combining ther-modynamic cycles of steam compressor refriger-ation machines]. *Kholodylna tekhnika ta tekhnolohiia*, No. 5–6(55), pp. 246–254. DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v55i5-6.1657>. [in Ukrainian].
- [11] Lavrenchenko G. K., Volobuev I. V., Kopytin A. V. (2005) Assessing the energy and environmental efficiency of aggregated refrigeration machines operating on various refrigerants. *Industrial gases*, 2005, No. 4, pp. 16–27.
- [12] Zhelezny V. P., Zhidkov V. V. (1996) Ekolohichni ta enerhetychni aspekty vprovadzhennia alternatyvnykh kholodoahentiv u kholodylnu tekhniku. [Environmental and energy aspects of the introduction of alternative refrigerants in refrigeration technology]. *Donetsk: Donbass*, 144 p. [in Ukrainian].
- [13] Garcia L. M., Coelho L. (2010) Energy efficiency strategies in refrigeration systems of large supermarkets. *International Journal of Energy, Environment and Economics*, Vol. 4(3), pp. 64–70.
- [14] Dincer I. (2018) Refrigerants. *Comprehensive Energy Systems*, Vol. 2, pp. 435–474.
- [15] Bondarenko V. L., Simonenko Yu. M. (1999) Pat. 2132720, MKI6 B 01 D 53/02, B 01 J 20/28, F 25 J 3/00. A method for the continuous enrichment of krypton-xenon concentrates, an installation for its implementation, the sorbent of this installation, as well as a method for transporting the sorbent in the specified method of continuous enrichment and an installation for implementing this transportation method. No. 97118375/25; application 05.11.97; publ. 07/10/99, Bulletin. No. 19.
- [16] Karwacki Eu. J., Golden T. Ch., Motika S. A., Farris T. S. (2007) US Patent 7285154 B2 USA, B 01 D 53/02. Xenon recovery system. No. 10/996743; Filed 24 November 2004, Patented 23 October 2007.
- [17] Armond D. W., Carne M. (1992) Patent 927072 Great Britain, MKI B 01 d (C 01 b). Process for the Separation of Argon from mixture with Oxygen and Nitrogen. No. 920136; Filed 22.12.92; Pa-tented 27.01.93.
- [18] Arkharov A. M., Arkharov I. A., Bondarenko V. L. et al. (2000) Neon-Helium Mixtures Separation by Adsorption and Freezing. *AIChE's 2000 Spring National Meeting*, March 5–9, Atlanta, Georgia, pp. 71–79.
- [19] Chyhrin A., Pylypenko B., Bondarenko A. (2017) The extraction of rare gases by desublimation method. *Proceedings of the 14th IIR International Conference Cryogenics 2017*: Dresden, Germany, May 15–19, 2017, ID:015, pp. 348–353. DOI: <http://dx.doi.org/10.18462/iir.cryo.2017.0015>
- [20] Ph. Lebrun (2007) An Introduction to Cryogenics. Departmental Report CERN/AT 2007-1, 23 p.
- [21] Gorin A. N. (2007) Alternatyvni systemy okholodzhennia ta kondytsionuvannia povitria z vykorystanniam vyparnoho okholodzhennia. [Alternative cooling and air condition-ing systems using evaporative cooling]. *Abstract for the degree of Doctor of Technical Sciences*, Odesa, 39 p. [in Ukrainian].
- [22] Pei H., Tong S., Zhenxing L., Renjun D. (2023) Thermal characteristics analysis of medium frequency transformer under multiple working conditions. *Thermal Science*, Vol. 28, pp. 239–239.
- [23] Zharkov I. P. (2014) Cryogenic Equipment for Low-Temperature Hardening of the Instrument, Details of Machines for Needs of Machine Building and Rolling Production. *Science and innovation*, Vol. 10(3), pp. 35–41.
- [24] Chioteli M., Constantinou H., Onufrena A. Koettig T. (2025) Investigation of a Helium cooling circulation loop on a 1.3 GHz cavity structure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 1327, 012047.
- [25] Bondarenko V. L., Simonenko Yu. M., Matvieiev E. V., Rura V. N. (2015) Cryogenic support for distillation columns for the production of neon and its stable isotopes. *Industrial gases*, No. 5, pp. 35–46.
- [26] Bondarenko V., Chyhrin A., Bashkirov H. (2018) Cryogenic support of rectification units for the neon isotopes production. *Proceedings of the XXIIInd National Conference with International Participation "New Cryogenic and Isotope Technologies for Energy and Environment"*, 24–26 October, 2018, Băile Govora, Romania, Vol. 1/2018, pp. 88–89.
- [27] Bondarenko V., Symonenko Iu., Matvieiev E. (2017) The analysis of refrigeration cycles in the technologies of producing of neon and its stable isotopes at $T = 28$ K. *Proceedings of the 14th IIR International Conference Cryogenics 2017*: Dresden, Germany, May 15–19, 2017, ID:016, pp. 336–341. DOI: <http://dx.doi.org/10.18462/iir.cryo.2017.0016>
- [28] Kloeppel S., Dittmar N., Haberstroh Ch., Quack H. (2016) Mixed refrigerant cycle with neon, hydrogen, and helium for cooling sc power transmission lines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 171, 012019.
- [29] Jha A. R. (2006) Cryogenic Technology and Applications. *Butterworth-Heinemann*, 267 p.
- [30] Bondarenko V. L., Simonenko Yu. M. (2019) Patent No. 120301 UA for invention, IPC F25J 3/02 (2006.01). Metod nyzkotemperaturnoho rozdilennia hazovoi sumishi ta prystroi dlia yoho ekspluatatsii. [Method of low-temperature separation of gas mixture and devices for its operation]. publ. 11/11/2019, Bulletin. No. 21. [in Ukrainian].
- [31] Wang J., Smith R. (2005) Synthesis and Optimization of Low-Temperature Gas Separation Processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 44, Is. 8, pp. 2856–2870.
- [32] Fluid Thermodynamic and Transport Properties of Refrigerants and Refrigerant Mixtures: [REFPROP. Version 10.0]. Official edition. Gaithersburg, Md.: U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, 2013.

- [33] Bondarenko V. L., Symonenko Iu. M., Chyhrin A. O. (2018) Cryogenic Methods of Xenon Obtaining from Low-Potential Mixtures. *Proceedings of the 6th International Conference on Cryogenics and Refrigeration*, Shanghai, China, April 12–14, 2018. No.178, pp. 313–314.
- [34] Bondarenko V. L., Symonenko Iu. M., Chyhrin A. A. (2019) Automated Cryogenic Unit for Xenon Extraction from Concentrated Mixtures. *Chemical and Petroleum Engineering*, Vol. 54. Is. 9–10. pp. 651–657. DOI <https://doi.org/10.1007/s10556-019-00529-5>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Bondarenko V., Shevich Yu., Matvieiev E. (2016) Separation of neon isotopes by stepwise fractionation at 28 K. *Chemical and petroleum engineering*, Vol. 51, Is. 11, pp. 749–754. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-016-0116-6>
- [2] Bondarenko V. L., Vihurzhinska S. I., Poddubna M. V. et al. Energy saving technologies in installations for light inert gases producing. *1st IIR International Conference of Cryogenics and Refrigeration Technologies, Romania, Bucharest*, pp. 230–234.
- [3] Симоненко Ю. М. (2014) Енергозберігаючі технології в установках для отримання неона і гелія високої чистоти. *Холодильна техніка та технологія*, Т. 50, №. 4, С. 4–12.
- [4] Dubinin M. M. (1960) The Potential Theory of Adsorption of Gases and Vapors for Adsorbents with Energetically Nonuniform Surfaces. *Chemical Reviews*, Vol. 60, Is. 2, pp. 235–241.
- [5] Pourhakkak P., Taghizadeh A., Taghizadeh M., Ghaedi M., Haghdoust S. (2021) Adsorption: Fundamental Processes and Applications. *Interface Science and Technology*, Vol.33, pp. 1–70.
- [6] Bondarenko, V. L. Symonenko Iu. M., Chyhrin A. A. (2014) Determination of optimal design and operational parameters of adsorbers for purification of neon-helium mixture. *Industrial gases*, No.3, pp.11–17.
- [7] Simonenko Yu. M. (2015) On the problem of choosing the shape of a cryogenic adsorber of cyclic action. *Chemical and petroleum engineering*, No. 2, pp. 18–21.
- [8] Bondarenko V. L., Symonenko Iu. M., Chyhrin A. A. (2015) Optimization of design and operational parameters of adsorbers for purification of neon-helium mixture. *Chemical and petroleum engineering*, No. 10, pp. 23–27.
- [9] Symonenko Iu. M. (2015) Selecting the Shape of Cyclic Cryogenic Adsorber. *Chemical and petroleum engineering*, Vol. 51, Is. 1–2, pp. 100–105. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-015-0007-2>
- [10] Лавренченко Г. К., Кравченко М. Б., Грудка Б. Г. (2020). Аналіз результатів з'єднання термодинамічних циклів парокompresорних холодильних машин. *Холодильна техніка та технологія*, Т. 55, № 5–6, С. 246–254.
- [11] Lavrenchenko G. K., Volobuev I. V., Kopytin A. V. (2005) Assessing the energy and environmental efficiency of aggregated refrigeration machines operating on various refrigerants. *Industrial gases*, 2005, No. 4, pp. 16–27.
- [12] Желєзний В. П., Жидков В. В. (1996). Екологічні та енергетичні аспекти впровадження альтернативних холодоагентів у холодильну техніку Донецьк : Донбас, 144 с.
- [13] Garcia L. M., Coelho L. (2010) Energy efficiency strategies in refrigeration systems of large supermarkets. *International Journal of Energy, Environment and Economics*, Vol. 4(3), pp. 64–70.
- [14] Dincer I. (2018) Refrigerants. *Comprehensive Energy Systems*, Vol. 2, pp. 435–474.
- [15] Bondarenko V. L., Simonenko Yu. M. (1999) Pat. 2132720, MKI6 B 01 D 53/02, B 01 J 20/28, F 25 J 3/00. A method for the continuous enrichment of krypton-xenon concentrates, an installation for its implementation, the sorbent of this installation, as well as a method for transporting the sorbent in the specified method of continuous enrichment and an installation for implementing this transportation method. No. 97118375/25; application 05.11.97; publ. 07/10/99, Bulletin. No. 19.
- [16] Karwacki Eu. J., Golden T. Ch., Motika S. A., Farris T. S. (2007) US Patent 7285154 B2 USA, B 01 D 53/02. Xenon recovery system. No. 10/996743; Filed 24 November 2004, Patented 23 October 2007.
- [17] Armond D. W., Carne M. (1992) Patent 927072 Great Britain, MKI B 01 d (C 01 b). Process for the Separation of Argon from mixture with Oxygen and Nitrogen. No. 920136; Filed 22.12.92; Pa-tented 27.01.93.
- [18] Arkharov A. M., Arkharov I. A., Bondarenko V. L. et al. (2000) Neon-Helium Mixtures Separation by Adsorption and Freezing. *AICHE's 2000 Spring National Meeting*, March 5–9, Atlanta, Georgia, pp. 71–79.
- [19] Chyhrin A., Pylypenko B., Bondarenko A. (2017) The extraction of rare gases by desublimation method. *Proceedings of the 14th IIR International Conference Cryogenics 2017: Dresden, Germany, May 15–19, 2017*, ID:015, pp. 348–353. DOI: <http://dx.doi.org/10.18462/iir.cryo.2017.0015>
- [20] Ph. Lebrun (2007) An Introduction to Cryogenics. Departmental Report CERN/AT 2007-1, 23 p.
- [21] Горін А. Н. (2007) Альтернативні системи охолодження та кондиціонування повітря з використанням випарного охолодження. *Автореферат на здобуття наукового ступеня доктора наук*, Одеса, 39 с.
- [22] Pei H., Tong S., Zhenxing L., Renjun D. (2023) Thermal characteristics analysis of medium frequency transformer under multiple working conditions. *Thermal Science*, Vol. 28, pp. 239–239.
- [23] Zharkov I. P. (2014) Cryogenic Equipment for Low-Temperature Hardening of the Instrument, Details of Machines for Needs of Machine Building and Rolling Production. *Science and innovation*, Vol. 10(3), pp. 35–41.
- [24] Chioteli M., Constantinou H., Onufrena A. Koettig T. (2025) Investigation of a Helium cooling circulation loop on a 1.3 GHz cavity structure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 1327, 012047.

- [25] Bondarenko V. L., Simonenko Yu. M., Matvieiev E. V., Rura V. N. (2015) Cryogenic support for distillation columns for the production of neon and its stable isotopes. *Industrial gases*, No. 5, pp. 35–46.
- [26] Bondarenko V., Chyhrin A., Bashkirov H. (2018) Cryogenic support of rectification units for the neon isotopes production. *Proceedings of the XXIIInd National Conference with International Participation “New Cryogenic and Isotope Technologies for Energy and Environment”*, 24–26 October, 2018, Băile Govora, Romania, Vol. 1/2018, pp. 88–89.
- [27] Bondarenko V., Symonenko Iu., Matvieiev E. (2017) The analysis of refrigeration cycles in the technologies of producing of neon and its stable isotopes at $T = 28$ K. *Proceedings of the 14th IIR International Conference Cryogenics 2017*: Dresden, Germany, May 15–19, 2017, ID:016, pp. 336–341. DOI: <http://dx.doi.org/10.18462/iir.cryo.2017.0016>
- [28] Kloeppel S., Dittmar N., Haberstroh Ch., Quack H. (2016) Mixed refrigerant cycle with neon, hydrogen, and helium for cooling sc power transmission lines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 171, 012019.
- [29] Jha A. R. (2006) Cryogenic Technology and Applications. *Butterworth-Heinemann*, 267 p.
- [30] Бондаренко В. Л., Симоненко Ю. М. (2019) Патент № 120301 UA на винахід, IPC F25J 3/02 (2006.01). Метод низькотемпературного розділення газової суміші та пристрої для його експлуатації. Опубл. 11.11.2019, Бюлетень №. 21.
- [31] Wang J., Smith R. (2005) Synthesis and Optimization of Low-Temperature Gas Separation Processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 44, Is. 8, pp. 2856–2870.
- [32] Fluid Thermodynamic and Transport Properties of Refrigerants and Refrigerant Mixtures: [REFPROP. Version 10.0]. Official edition. Gaithersburg, Md.: U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, 2013.
- [33] Bondarenko V. L., Symonenko Iu. M., Chyhrin A. O. (2018) Cryogenic Methods of Xenon Obtaining from Low-Potential Mixtures. *Proceedings of the 6th International Conference on Cryogenics and Refrigeration*, Shanghai, China, April 12–14, 2018. No.178, pp. 313–314.
- [34] Bondarenko V. L., Symonenko Iu. M., Chyhrin A. A. (2019) Automated Cryogenic Unit for Xenon Extraction from Concentrated Mixtures. *Chemical and Petroleum Engineering*, Vol. 54. Is. 9–10. pp. 651–657. DOI <https://doi.org/10.1007/s10556-019-00529-5>

© Грудка Б. Г.

Дата першого надходження статті до видання: 15.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)