

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 66.074.382:[661.939.1 + 662.69]

Підвищення ефективності баромембранного розділення метано-гелієвих сумішей із застосуванням каскадних схем та рециркуляції потоків

Ю. М. Симоненко¹, Б. Г. Грудка²✉¹⁻²Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна✉ e-mail: ²bogdangennadievich@gmail.comORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-7827-0591>; ²<https://orcid.org/0000-0003-1200-5442>

У роботі розглядаються актуальні питання глибокого очищення газів та отримання цільових компонентів із багатокомпонентної сировини, що є затребуваним, але високовитратним завданням для різних галузей промисловості – від харчових технологій до напівпровідникової індустрії. Авторами проаналізовано обмеження традиційних методів сепарації, таких як сорбція, десублімація, короткоциклова адсорбція, хімічне поглинання та дистиляція, пов'язані з підвищенням енергоспоживанням, жорсткими вимогами до арматури або фазовими переходами компонентів. Основна увага у статті приділена баромембранному поділу як найпростішому методу, що не вимагає термічної стабілізації та заснованого на різниці швидкостей проникнення газів через пористу перегородку під дією перепаду тисків. На прикладі розділення бінарної метано-гелієвої суміші та вилучення гелію з природного газу продемонстровано математичну модель процесу. Описано методики розрахунку параметрів вихідних потоків (пермеату та нонпермеату) з використанням ітераційних процедур, рівнянь матеріального балансу та рівняння стану мембрани. Показано, що ефективність одиночної мембрани обмежена компромісом між концентрацією цільового продукту та ступенем його втрат. Для якісного покращення показників розглянуто багатостадійні безкомпресорні каскадні схеми, а також високоефективні схеми із включенням міжкаскадних компресорів та організацією рециркуляції потоків. Докладно досліджено позитивний ефект рециркуляції пермеатного потоку, наведено аналітичні залежності для граничних режимів поділу та оцінено максимальні коефіцієнти рециркуляції при різних технологічних параметрах. Матеріал доповнено графічними залежностями та технічними характеристиками серійних промислових мембранних модулів.

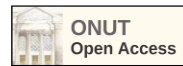
Ключові слова: Баромембранне розділення; Селективна проникність; Вилучення гелію; Природний газ; Пермеат; Нонпермеат; Матеріальний баланс; Каскадні схеми; Міжкаскадні компресори; Рециркуляція потоку.

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v62i1.3499>

© The Author(s) 2026. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. Вступ

Чисті речовини (точніше, продукти з мінімальним вмістом побічних домішок) – велика рідкість. Для глибокого очищення газів потрібні складні та енерговитратні технології. Послідовність збагачення та очищення залежить від складу сировини,

фізико-хімічні властивості компонентів та їх агрегатного стану. Зміст побічних речовин в технічному газі обумовлено сферою застосування. Наприклад, одні і ті ж продукти можуть застосовуватися у якості захисного середовища при зварюванні, харчових технологіях і напівпровідникової галузі. Але їх чистоті у разі пред'являються різні вимоги.

Отримання необхідного продукту із багатокомпонентної сировини можна здійснити шляхом різних технологічних послідовностей. При цьому буде досягнуто однакового результату. Сформувавши єдиний підхід для вибору кращих технологій неможливо. Застосування того чи іншого способу переробки найчастіше визначається сукупністю економічних та екологічних факторів, серед яких питома енергоспоживання, ресурсозбереження, капітальні витрати, утилізація викидів тощо. При використанні процесів сорбції та десублімації (вимоороження) слід враховувати відносно великі габарити та підвищене енергоспоживання на періодичне охолодження та нагрівання при регенерації. В апаратах короткоциклової адсорбції пред'являються підвищені вимоги до комутуючої арматури, яка повинна витримувати сотні перемикачів на годину без витоків та відмов. Хімічне поглинання органічних домішок протікає при високих температурах (600...700 K), а поглинання продуктів реакції необхідно використовувати додаткові адсорбери циклічної дії, недоліки яких відзначалися вище.

При поділі деяких сумішей методом дистиляції не виключені режими, при яких висококиплячі речовини можуть переходити в твердий стан і порушувати масообмін у контактному просторі апарату. Таке явище спостерігається, коли властивості окремих компонентів настільки полярні, що вони

можуть одночасно існувати в рідкому стані. Нерідко при дослідженні виявляються, що аномальні (азеотропні) сполуки ускладнюють процедуру сепарації в колоні, а в деяких випадках роблять її недоцільною.

2. Підвищення ефективності баромембранного поділу шляхом рециркуляції пермеатного потоку

Найпростішим способом сепарації сумішей є баромембранний процес [1]. Цей метод базується на різниці швидкості проникнення газів через пористу перегородку і не вимагає охолодження або стабілізації температури. Для його реалізації потрібно створити перепад тиску. Селективність розділяючої поверхні для різних газів є показником питомої проникності K_i , $\text{м}^3/(\text{бар} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{рік})$, який показує кількість нормальних м^3 кожного компонента за 1 годину через перегородку площею 1 м^2 при перепаді тисків 1 бара [2]. Наприклад, через менший кінетичний діаметр дифузійна здатність водню істотно вище, ніж у метану (рис. 1). Ця особливість використовується, наприклад, в аміачному виробництві для отримання корисних компонентів з віддуючих сумішей [3]. Значні відмінності між коефіцієнтами K_{He} і $K_{\text{C}_3\text{H}_8}$ дозволяють виділяти з потоку природного газу гелієвий концентрат [4].

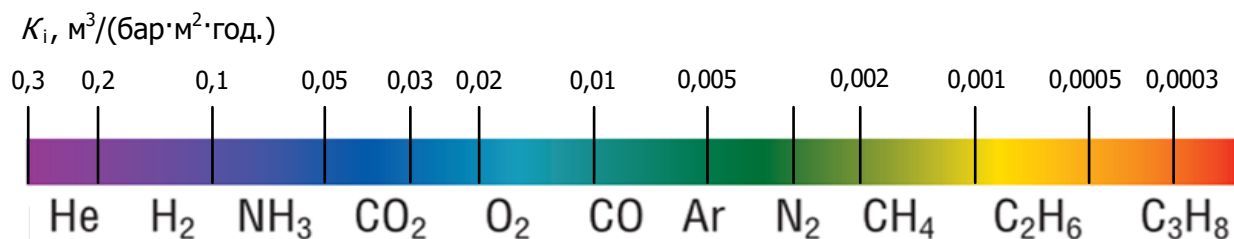


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнтів проникності K_i для деяких газів.

Схематичне зображення мембранної сепарації бінарної суміші гелій-метан показано на рис. 2.

Під впливом різниці тисків $P_F - P_V$ деяка частина вихідної суміші з витратою V перетворюється на простір під мембраною (пермеат). Потік, що залишився (нонпермеат) з витратою $W = F - V$ залишає порожнину над мембраною, практично зберігаючи тиск ($P_W = P_Z$). Оскільки проникаюча здатність гелію вища, то потік V збагачується He ($y > x$), а вміст гелію в нонпермеаті W падає.

Оскільки в процесі проходження потоку вздовж мембрани концентрація вихідного потоку зміню-

ється, для прогнозування параметрів потоків, що виходять, використовуються методики [5], які передбачають розбиття мембранного модуля на низку окремих комірок. Після обчислення параметрів потоку на виході з першої ділянки уточнені дані використовуються при розрахунку чергової комірки. Складаються рівняння матеріальних балансів для точок змішування і вирішується система нелінійних рівнянь алгебри. В результаті ряду ітераційних процедур визначається результуюча концентрація проникаючого потоку і параметри нонпермеатної фракції.

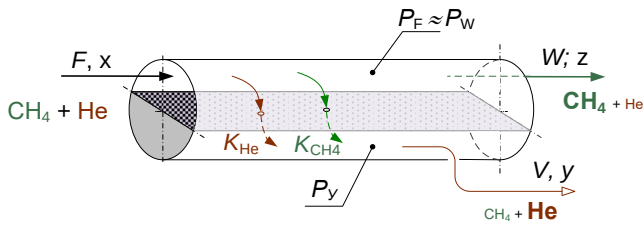


Рисунок 2 – Спрощена схема мембранного модуля та умовні позначення потоків, прийняті в тексті (на прикладі суміші $\text{CH}_4\text{-He}$); x, y, z – концентрації гелію у вихідній суміші та отриманих фракціях.

У прикладі, що розглядається, при мембранному вилученні гелію з природного газу (рис. 3), вміст цільового продукту у вихідній суміші (x) незначний (рис. 4), а концентрація потоку високого тиску змінюється лише на частки відсотка. Це допускає використання для попереднього аналізу спрощених методик, наприклад [6]. Вони базуються на вирішенні рівняння стану мембрани (1), яке встановлює зв'язок між концентраціями вихідної суміші та проникаючого потоку при заданому перепаді тисків та відомій селективності мембрани по відношенню до компонентів суміші.

$$y^2 \cdot \varphi \cdot (1 - \alpha) + y \cdot [1 + (\varphi + x') \cdot (\alpha - 1)] - \alpha \cdot x' = 0 \quad (1)$$

де y – вміст He в пермеатному потоці; $x' = (x + z)/2$ – середня концентрація потоку над мембраною; $\alpha = K_{\text{He}}/K_{\text{CH}_4} > 1$ – відносна селективність матеріалу мембрани по відношенню до компонентів суміші; $\varphi = P_V/P_F < 1$ – відношення тисків після та перед мембраною, відповідно.

З двох коренів рівняння (2) застосуємо той, значення якого знаходиться в інтервалі концентрацій $0 < y < 1$

$$y = \frac{1}{2} \cdot \left[-\frac{B}{A} \pm \sqrt{\left(\frac{B}{A}\right)^2 - 4 \cdot \frac{C}{A}} \right] \quad (2)$$

Комплекси, що входять до (2), рівні

$$A = (1 - \alpha) \cdot [2 \cdot \varphi \cdot (1 - \theta) + \theta] \quad (3)$$

$$B = 2 \cdot (1 - \theta) - 2 \cdot \varphi \cdot (1 - \alpha) \cdot (1 - \theta) - 2 \cdot x \cdot (1 - \alpha) + \theta \cdot x \cdot (1 - \alpha) + \alpha \cdot \theta \quad (4)$$

$$C = \alpha \cdot x \cdot (\theta - 2) \quad (5)$$

де $\theta = V/F$ – Відношення витрат пермеату та вхідного потоку.

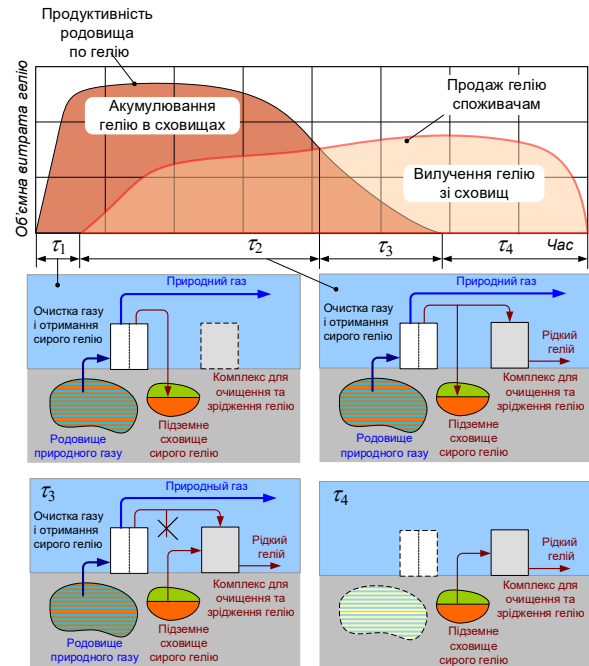


Рисунок 3 – Продовження життєвого циклу газогелієвого родовища за рахунок отримання концентрату гелію в мембранах: τ_1 – накопичення природного газу, збагаченого гелієм у підземному сховищі під час будівництва кріогенного комплексу для очищення та зрідження гелію; τ_2 – одержання чистого гелію зі збагачуваного в мембранах гелію (накопичення надлишкового об'єму He продовжується); τ_3 – отримання чистого He з потоків гелію, що збагачується, і концентрату, накопиченого раніше в сховищі; τ_4 – отримання продукту після вичерпання родовища тільки з гелію, що подається зі сховища.

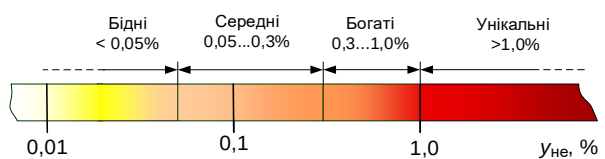


Рисунок 4 – Концентрація гелію у родовищах природного газу

У таблиці 1 надано значення концентрації пермеатного потоку і величин, що входять (1 і 2) для одного з варіантів технічного завдання.

Концентрація бідного потоку, який минув через мембрану, визначається з матеріального балансу. Для прийнятих умов

$$Z = \frac{F \cdot x - V \cdot y}{F - V} = \frac{x - \theta \cdot y}{1 - \theta} = 0,14\% \quad (6)$$

Результати розрахунків метано-гелієвих сепараторів представлені у вигляді графіків на рис. 5.

Таблиця 1 – До визначення концентрації проникаючого потоку мембрани для умов: тиск вихідної суміші $P_F = 100$ бар; тиск пермеату $P_V = 12$ бар; відношення тисків $\phi = 0,12$; відносна витрата пермеату $\theta = V/F = 0,15$; концентрація гелію у вихідній суміші $x = 0,50$ %.

Проникності компонентів, $\text{м}^3/(\text{бар} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{рік}), [4]$	Відносна селективність	A	B	C	y
$K_{\text{He}} = 0,24; K_{\text{CH}_4} = 0,0015$	$\alpha = K_{\text{He}}/K_{\text{CH}_4} = 160$	-56,29	+59,61	-1,48	$y = 2,54\%$

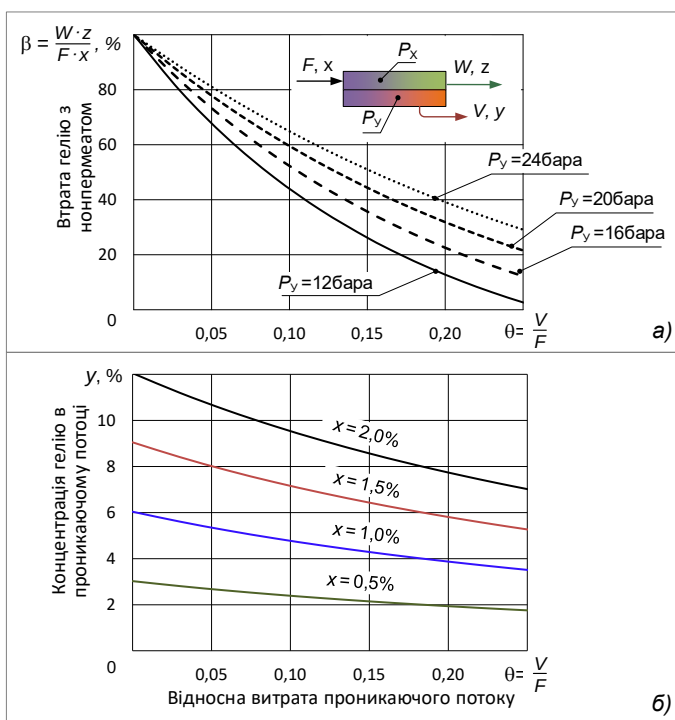


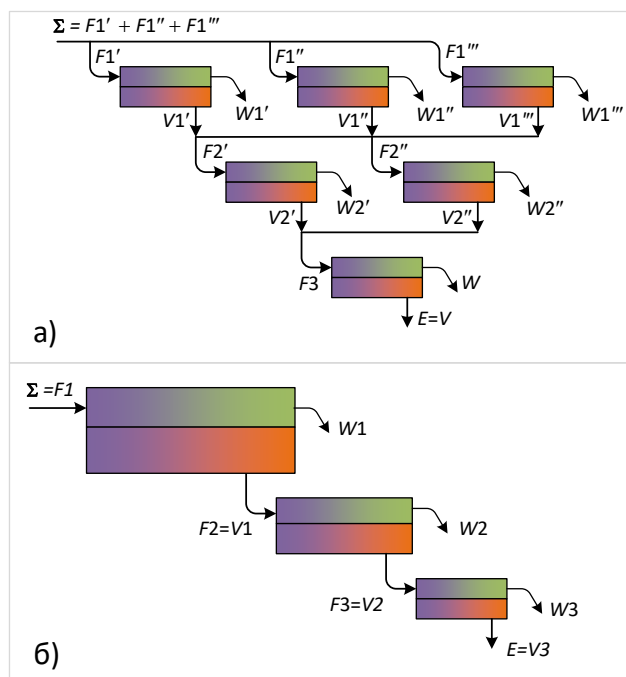
Рисунок 5 – вплив тиску після мембрани P_y на втрати цільового продукту β залежно від співвідношення витрат θ при $x = 2\%$ He; (б) – вміст гелію в пермеаті при різних концентраціях x_{He} у вихідній суміші природного газу при початковому тиску $P_x = 100$ бар.

Як випливає з графіків (рис. 5) для забезпечення ступеня вилучення гелію $(1 - \beta) > 80\%$ потрібно підтримувати відношення тисків у мембранному модулі $P_F/P_V > 7$, ($\phi < 0,15$). При цьому п'ята частина природного газу буде направлена в пермеат у вигляді He-концентрату, вміст гелію в цьому з потоці збільшиться приблизно в 4 рази по відношенню до вихідної суміші. Ефективність поділу в одиночній мембрані можна дещо підвищити шляхом підбору матеріалів перегородки [7] або при збільшенні перепаду тисків ($P_F/P_V = 1/\theta$). Однак у всіх випадках поділ виявиться частковим, а отримуваний результат буде компромісом між концентрацією цільового продукту та ступенем його втрат. Якісне поліпшення досягається внаслідок багатостадійного поділу потоку в каскадних схемах.

Ступінчастий поділ можна здійснити, не використовуючи компресори, а шляхом розбиття перепаду тисків (рис. 6). У наведеній схемі поверхня мембранного шару в кожному каскаді не буде постійною. Вона залежить від двох взаємно протилежних факторів – абсолютного тиску на вході та витрати компонентів. На практиці ступені формують з кількох однотипних мембран (рис. 6-а), або використовують апарати різної продуктивності (рис. 6-б; табл. 2).

Таблиця 2 – Пропускна здатність азоту в кубічних метрах на годину при тиску 15 бар

Модель	Чистота 99,5%		Чистота 98%		Чистота 95%	
	Вхідний потік	Вихідний потік	Вхідний потік	Вихідний потік	Вхідний потік	Вихідний потік
РА3020 N1	8,1	1,5	9,9	3,1	13,2	6,0
РА3030 N1	13,8	2,6	16,8	5,3	22,1	10,1
РА4030 N1	24,4	4,6	29,8	9,3	39,0	17,8
РА4030 P3	11,2	3,4	14,5	6,1	39,5	11,0
РА4050 N1	40,1	7,5	48,9	15,2	64,2	29,1
РА4050 P3	18,6	5,5	23,9	10,1	32,8	18,1
РА6050 N1	101,0	18,8	123,1	38,2	162,1	72,9
РА6050 P3	41,0	12,2	52,8	22,3	72,5	39,9



в)

Рисунок 6 – Безкомпресорні каскади; (а) – з однотипними мембранами; (б), (в) – на основі модулів різної продуктивності; Σ – потік вихідної суміші; E – продукт, збагачений більш проникаючим компонентом; F , V , W – відповідають рис. 2 та рис. 5а.

Широке застосування набули схеми з включенням міжкаскадних компресорів. Вони дозволяють формувати довільне число ступенів та повертати

потоки на вторинне проходження мембранних модулів. Ряд однокомпресорних схем з рециклом представлені на рис. 7.

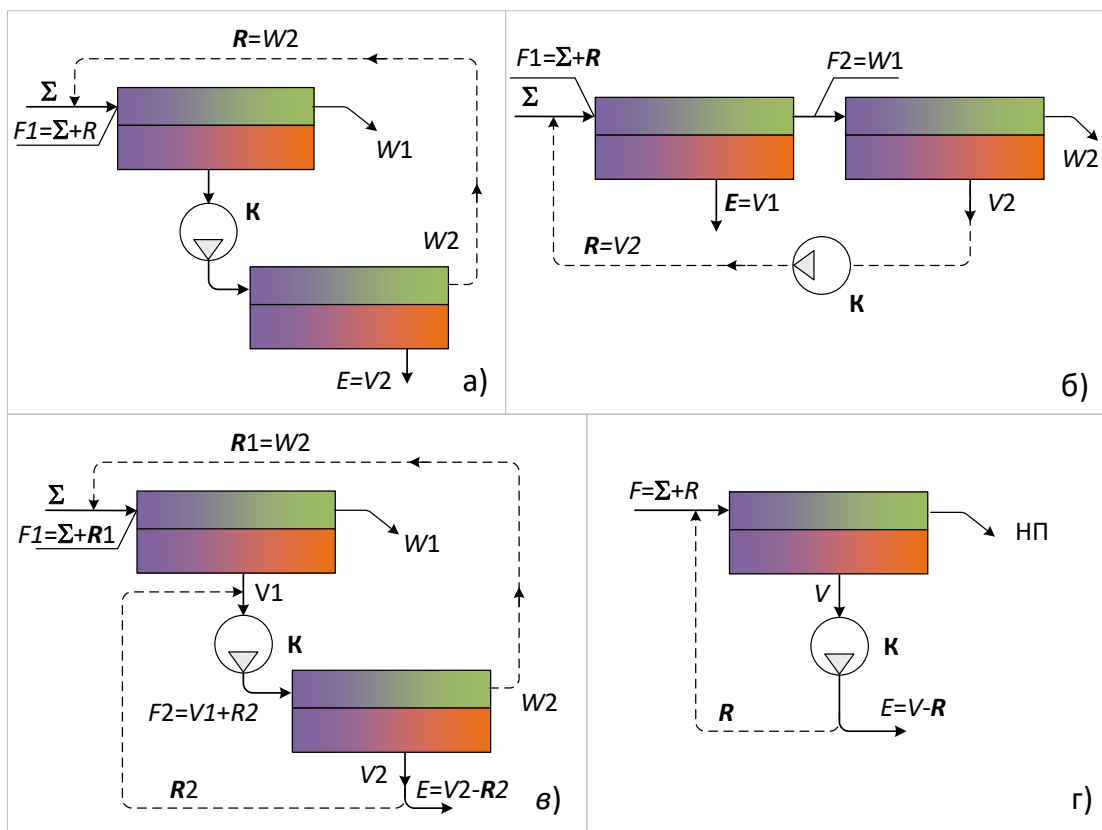


Рисунок 7 – Схеми для багастадійної сепарації з використанням компресорів та поверненням потоків на повторний поділ у мембранах; R – рецируючі потоки; K – компресори; потоки A , B , F , V та W – відповідають рис. 5. [8-12].

– На фрагменті (а) показана установка із поверненням у вхідну лінію непермеатного потоку $W2$ другого ступеня. Пермеат після першої мембрани компримується і надходить до другого ступеню. Продукт B відбирається з другого у вигляді пермеату $V2$.

– У схемі (б) обидві мембрани включені поспідовно. Після стиснення рециркулює пермеат $V2$, а продуктом є пермеат $V1$.

– Схема (в) є модифікацією варіанта (а), але в ній передбачений другий потік, що повертається « $R2$ ». Таке рішення дозволяє забезпечити оптимальне співвідношення витрат через мембранні ступені.

– Рецикл можна здійснити за допомогою одного мембранного модуля (г). Фактично у цій

схемі канал рециркулюючого потоку виконує функцію байпасної лінії компресора. Крім підвищення ефективності, таке рішення дозволяє узгодити проникність мембрани і продуктивності компресора.

Позитивний ефект, що забезпечується рециркуляцією, показаний у вигляді графіків на рисунках 8 і 9. Координата « $r = 0$ » на горизонтальній осі відповідає характеристикам одиночного мембранного модуля без рециркуляції (рис. 1 та 5).

Графічні залежності концентрацій x (на вході в мембранний модуль) та y (пермеатного потоку) у розглянутому інтервалі рециркулюючого потоку $0 < r < 0,25$ мають обмежену довжину. Це впливає із умови $z \geq 0$.

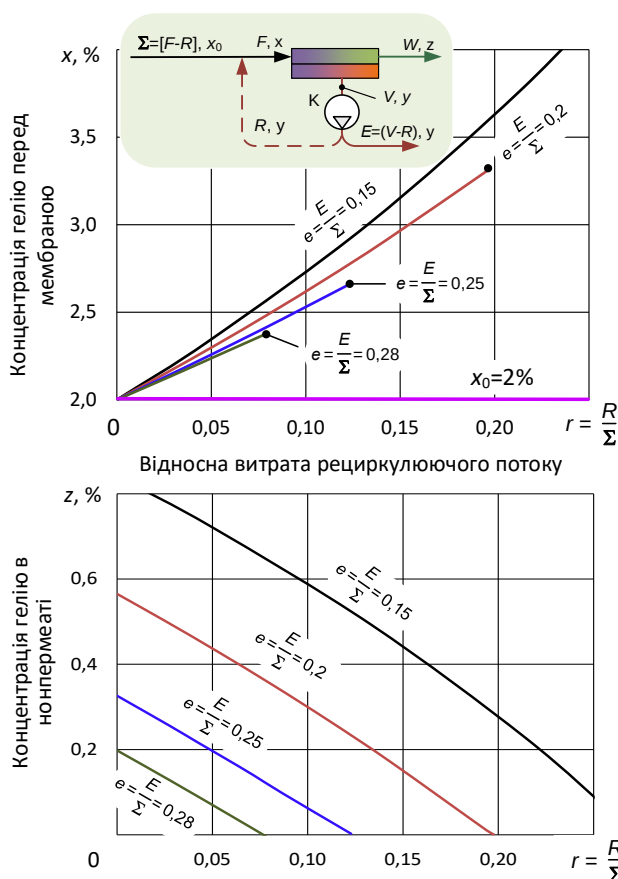


Рисунок 8 – Вміст гелію перед мембраною (x) і в збідненому гелієм потоці (z) в залежності від відносної частки рециркулюючого потоку (r) при різних витратах продукту, що відбирається (e).

Для граничного випадку ($z \rightarrow 0$) справедливі рівняння:

- з матеріального балансу контурів

$$\Sigma \cdot x_0 = V \cdot y - R \cdot y; \quad \Sigma \cdot x_0 = E \cdot y \quad (7)$$

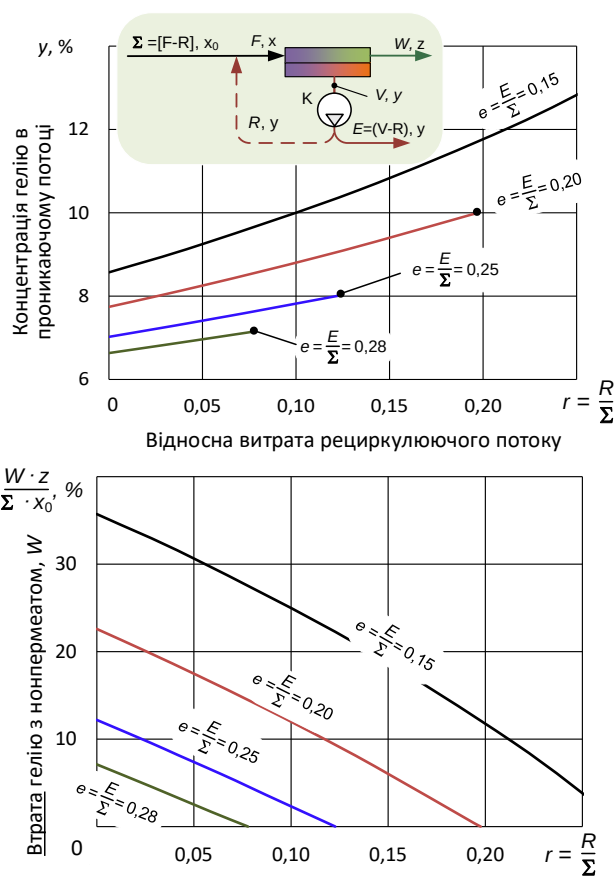


Рисунок 9 – Вплив частки рециркулюючого потоку (r) на концентрацію гелію в пермеаті (y) і втрати He при різних витратах продукту, що відбирається (e).

$$\frac{x_0}{y} = \frac{E}{\Sigma} = e \quad (8)$$

- змішувач потоків R та F

$$F = \Sigma + R \quad (9)$$

- для одиночного мембранного модуля (6) при $z \rightarrow 0$

$$V \cdot y = F \cdot x; \quad \frac{V}{F} = \theta = \frac{x}{y}; \quad V = F \cdot \theta \quad (10)$$

Після підстановки (7), поділу на $[\Sigma \cdot y]$ та з урахуванням $r = R/\Sigma$ отримаємо

$$\Sigma \cdot x_0 = \Sigma \cdot \theta \cdot y + R \cdot \theta \cdot y - R \cdot y \rightarrow \frac{x_0}{y} = \theta + r \cdot \theta - r \quad (11)$$

З урахуванням (8) залежно від співвідношення витрат фактор рециркуляції $r = R/\Sigma$ дорівнює

$$\Sigma \cdot x_0 = V \cdot y - R \cdot y; \quad \Sigma \cdot x_0 = E \cdot y \quad (12)$$

де $e = E/\Sigma$ – відносна частка продукту, що видається; $\theta = V/F$ – відношення витрат пермеату та вхідного потоку в мембранному модулі (10).

У розрахункових прикладах прийнято такі параметри: відношення тисків $\phi = P_y / P_x = 0,16$; концентрація гелію у вихідній суміші $x_0 = 2,0\%$; відносна проникність бінарної суміші $\alpha = K_{He}/K_{CH_4} = 160$.

У граничному випадку ($z \rightarrow 0$) величина відносної витрати пермеату θ^* не залежить від режиму рециркуляції та визначається виключно характеристиками мембранного модуля. Для прийнятих умов $\theta^* = 0,332$. Таким чином, з (12) випливає, що при відносних частках продукту, що відбирається $e = 0,15; 0,20; 0,25$ і $0,28$ максимальні коефіцієнти рециркуляції будуть відповідно дорівнюють $r = 0,2725; 0,1976; 0,1228; 0,0778$.

3. Висновки

Отримання чистих газів потребує складних та енергоємних рішень, при цьому вибір конкретної послідовності очищення залежить від складу сировини, економічних та екологічних факторів. Традиційні сорбційні, дистиляційні та хімічні методи сепарації мають ряд експлуатаційних недоліків, включаючи громіздкість обладнання, високі температурні режими та ризики порушення масообміну через перехід речовин у твердий стан.

Баромембранне розділення виступає простим та ефективним способом вилучення компонентів (наприклад, гелію з природного газу або корисних фракцій в аміачному виробництві) завдяки селективній проникності мембран та відсутності необ-

хідності штучного охолодження або нагрівання суміші.

Процес поділу в одиночному мембранному апараті завжди має частковий характер. Для забезпечення високого ступеня вилучення гелію (більше 80%) необхідно підтримувати значний перепад тисків (відношення тисків $P_F/P_V > 7$). При цьому пермеат йде до п'ятої частини вихідного потоку природного газу, а концентрація гелію в ньому зростає приблизно в 4 рази.

Якісне покращення параметрів сепарації досягається шляхом переходу до багатостадійних каскадних схем. Використання схем з міжкаскадними компресорами та рециркуляцією (поверненням) пермеатних або нонпермеатних потоків дозволяє гнучко налаштовувати співвідношення витрат, долати обмеження одиночних модулів, узгоджувати продуктивність компресора з проникністю мембрани та мінімізувати втрати цільового продукту.

Особистий внесок авторів CRediT

Симоненко Ю.М.: методологія, аналіз та узагальнення даних; верифікація результатів, рецензування та редагування; написання кінцевого варіанту рукопису. **Грудка Б.Г.:** дослідження; збирання та оброблення даних; написання початкового варіанту рукопису; аналіз отриманих експериментальних даних, візуалізація.

Література

- 1 Атлас енергетичного потенціалу нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії. – К., 2008. – 54 с.
2. Брик М. Т. Мембранна технологія // Енциклопедія Сучасної України. – К.: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2018.
3. Бондаренко В.Л., Симоненко О.Ю., Дьяченко О.В. та ін. Перспективи отримання рідкісних газів з віддувочних потоків виробництва аміака // Холодильна техніка і технологія. – 2007. – № 2 (106). – С. 5-9.
4. Соловійов С.А., Поляков. А.М. Перспективи застосування процесів мембранного газорозподілу для підготовки та переробки природного і попутного газів // Серія. Критичні технології. Мембрани. – 2006. – № 4(32). – С 3-18.
5. Hogsett E. J., Mazur W. H. Estimate membrane system area // Hydrocarbon Processing. – 2000. – No 9 (A). – P. 52-54.

6. **Bondarenko V.L., Simonenko Yu.M.** Cryogenic Technologies of Rare Gases Extraction. – Odessa: Astropoint, 2014. – 312 p.
7. **Чабанова Н. В., Попов Ю. В.** Мембранні процеси в хімічній технології: навч. посіб. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – 144 с.
8. **Baker R. W.** Membrane Technology and Applications. 3rd ed. – Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2012. – 576 p.
9. **Drioli E., Giorno L.** Encyclopedia of Membranes. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2016. – 2123 p.
10. **Basile A.** Handbook of Membrane Reactors: Reactor Types and Industrial Applications. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. – 720 p.
11. **Bernardo P., Drioli E., Golemme G.** Membrane Gas Separation: A Review // Chemical Engineering & Technology. – 2019. – Vol. 32, Issue 12. – P. 1843–1855.
12. **Бондаренко В.Л., Лосяков Н. П., Симоненко Ю.М.** Патент на винахід № 2486948. Установка для концентрування неон-гелієвої суміші. – 2013.

Отримана в редакції 13.02.2026, прийнята до друку 03.03.2026

Increasing the efficiency of baromembrane separation of methane-helium mixtures using cascade schemes and flow recirculation

Iurii Symonenko¹, Bohdan Hrudka²

¹⁻²Odesa National University of Technology, 112 Kanatna str., Odesa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: ²bogdangennadievich@gmail.com

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-7827-0591>; ²<https://orcid.org/0000-0003-1200-5442>

The paper considers the current issues of deep gas purification and obtaining target components from multicomponent raw materials, which is a popular but high-cost task for various industries - from food technology to the semiconductor industry. The authors analyzed the limitations of traditional separation methods, such as sorption, desublimation, short-cycle adsorption, chemical absorption and distillation, associated with increased energy consumption, stringent requirements for fittings or phase transitions of components. The main attention in the article is paid to baromembrane separation as the simplest method that does not require thermal stabilization and is based on the difference in gas penetration rates through a porous partition under the action of a pressure drop. The mathematical model of the process is demonstrated using the example of the separation of a binary methane-helium mixture and the extraction of helium from natural gas. Methods for calculating the parameters of the output flows (permeate and nonpermeate) using iterative procedures, material balance equations and the membrane equation of state are described. It is shown that the efficiency of a single membrane is limited by a compromise between the concentration of the target product and the degree of its losses. To qualitatively improve the indicators, multi-stage compressor-free cascade schemes are considered, as well as high-efficiency schemes with the inclusion of inter-cascade compressors and the organization of flow recirculation. The positive effect of permeate flow recirculation is studied in detail, analytical dependencies for the boundary separation modes are given and the maximum recirculation coefficients are estimated for various technological parameters. The material is supplemented with graphical dependencies and technical characteristics of serial industrial membrane modules.

Keywords: Baromembrane separation; Selective permeability; Helium extraction; Natural gas; Permeate; Nonpermeate; Material balance; Cascade schemes; Inter-cascade compressors; Flow recirculation

References

- 1 (2008) Atlas of the energy potential of non-traditional and renewable energy sources. Kyiv, 54.
2. **Bryk, M. T.** (2018) Membrane technology. Encyclopedia of Modern Ukraine. Kyiv: Institute of Encyclopedic Research of the National Academy of Sciences of Ukraine.
3. **Bondarenko, V.L., Symonenko, O.Yu., Dyachenko, O.V. et al.** (2007) Prospects for obtaining rare gases from the blowdown streams of ammonia production. *Refrigeration engineering and technology*, 2 (106), 5-9.
4. **Solovyov, S.A., Polyakov, A.M.** (2006) Prospects for the application of membrane gas distribution processes for the preparation and processing of natural

and associated gases. *Series. Critical technologies. Membranes*, 4(32), 3-18.

5. **Hogsett, E. J., Mazur, W. H.** (2000) Estimate membrane system area. *Hydrocarbon Processing*, 9 (A), 52-54.

6. **Bondarenko, V.L., Simonenko, Yu.M.** (2014) Cryogenic Technologies of Rare Gases Extraction. – *Odessa: Astroprint*, 312.

7. **Chabanova, N. V., Popov, Yu. V.** (2019) Membrane processes in chemical technology: textbook. *Kharkiv: NTU "KhPI"*, 144.

8. **Baker, R. W.** (2012) Membrane Technology and Applications. 3rd ed. *Chichester: John Wiley & Sons, Ltd*, 576.

9. **Drioli, E., Giorno, L.** (2016) Encyclopedia of Membranes. *Berlin, Heidelberg: Springer*, 2123.

10. **Basile, A.** (2013) Handbook of Membrane Reactors: Reactor Types and Industrial Applications. – *Cambridge: Woodhead Publishing*, 720.

11. **Bernardo, P., Drioli, E., Golemme G.** (2019) Membrane Gas Separation: A Review. *Chemical Engineering & Technology*, 32, 12, 1843-1855.

12. **Bondarenko, V.L., Losyakov, N.P., Symonenko, Yu.M.** (2013) Patent for invention No. 2486948. Installation for concentrating neon-helium mixture.

Received 13 February 2026

Approved 03 March 2026

Available in Internet 31 March 2026