

УДК 66.048.37: 661.715.3

ПРОЄКТУВАННЯ РЕКТИФІКАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО РОЗДІЛЕННЯ ПРОПАН-БУТАНОВИХ СУМІШЕЙ

Ю. М. Симоненко,

д-р техн. наук

iu.symonenko@gmail.com

ORCID: 0000-0002-7827-0591

Б. Г. Грудка, канд. техн. наукbogdangennadievich@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1200-5442

Е. В. Матвєєв, канд. техн. наукkriogen.magistr@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0749-689X

Одеський національний
технологічний університет,
65039, Україна, м. Одеса,
вул. Канатна, 112

Дана робота присвячена питанням проєктування й експериментального дослідження дослідно-промислової ректифікаційної установки, призначеної для комплексного розділення пропан-бутанових сумішей, що одержуються при підготовці природного газу та його зрідження. Актуальність теми зумовлена гострою необхідністю використання екологічно безпечних натуральних холодоагентів, таких, як пропан (R290) та ізобутан (R600a), які стають все більш затребуваними в холодильній техніці. Автори наголошують на значущості глибокої переробки вуглеводневої сировини. Так, багатоступенева переробка дозволяє суттєво підвищити додану вартість кінцевої продукції – пропану й бутану високої чистоти. У статті надано теоретичне обґрунтування вибору технологічної схеми. У ході попередніх розрахунків встановлено, що через значну різницю в теплофізичних властивостях бінарних систем (пропан-ізобутан і пропан-пропілен) застосування однієї ректифікаційної колони неефективне. Проєктована установка включає дві колони з різними геометричними параметрами, заповнені нерегулярною сітчастою насадкою, що забезпечує ефективний тепломасообмін. Особливу увагу приділено інноваційному підходу до організації системи теплохолодопостачання. Розроблена система інтегрує два парокомпресійні холодильні агрегати безпосередньо в технологічний цикл колон. Випарники холодильних машин, вбудовані в конденсатори колон, дозволяють створювати потік флегми, необхідної для ректифікації, а конденсатори машин підводять тепло до кубів колон. Даний підхід дозволяє підтримувати стабільний тиск в апаратах та гнучко регулювати температурні рівні. Експериментальна перевірка установки під час переробки «брудного» пропану підтвердила проєктні очікування: досягнуто 99,9% чистоти цільового продукту. Показано технічну можливість доочищення пропану до 99,96% за допомогою повторної перегонки у другій колоні. Установка має високу гнучкість, що уможлиблює безвідходну переробку вихідної сировини з виділенням бутану, ізобутану й пропілену як самостійних товарних продуктів шляхом зміни робочих температурних режимів. Отримані результати демонструють високу ефективність запропонованих технічних рішень для виробничих потужностей.

Ключові слова: ректифікація, пропан-бутанова суміш, природний газ, натуральні холодоагенти, насадкова колона, теплохолодопостачання.

Вступ

Сучасний розвиток світової холодильної та кліматичної техніки перебуває на етапі глобальної трансформації, зумовленої суворими вимогами міжнародних екологічних угод. Так, згідно з приписами таких документів, як Монреальський протокол, Кігалійська поправка й європейські регламенти щодо фторовмісних парникових газів (F-gases) [1] необхідно практично повністю вивести з обігу не лише озоноруйнівні речовини, а й гідрофторвуглеці (ГФУ), які мають високий потенціал впливу на глобальне потепління (GWP). У цих умовах особливої актуальності набуває повернення до природних (натуральних) холодоагентів, серед яких провідні позиції посідають пропан (R290) й ізобутан (R600a). Вони мають нульовий потенціал озоноруйнування (ODP=0) й мізерно малу здатність впливу на глобальне потепління (GWP<3), а також демонструють відмінні термодинамічні й теплофізичні властивості [2], що часто перевищують показники синтетичних аналогів. Джерелом для промислового отримання таких холодоагентів є широка фракція легких вуглеводнів, зокрема фракція C₂₊ [3], яка виділяється під час підготовки природного газу (ПГ) до магістрального транспортування або безпосередньо перед його зрідженням (виробництво ЗПГ). До складу вихідних пропан-бутанових сумішей, крім основних компонентів, зазвичай входить широкий спектр інших супутніх вуглеводнів: етан (R170), етилен (R1150), пропілен (R1270) і нормальний бутан (R600) [4]. Кожна з цих сполук сама по собі є високоцінною сировиною для нафтохімічної промис-

ловості або перспективним компонентом для низькотемпературних робочих тіл. Сучасний стан розвитку газопереробної галузі вимагає відходу від простого спалювання або використання пропан-бутанової суміші як низькоякісного палива (LPG) [5]. Економічний аналіз глибокої переробки вуглеводнів чітко вказує на те, що послідовна багатоступенева сепарація дозволяє кардинально збільшити додану вартість кінцевого продукту. Проходження 4–5 стадій розділення й очищення сировини підвищує ринкову вартість отриманих високочистих компонентів у 8–10 разів порівняно з вихідним газом [6].

Для наочності розглянемо класичний технологічний ланцюжок: природний газ $\rightarrow$ етан $\rightarrow$ етилен $\rightarrow$ поліетилен $\rightarrow$ готові вироби з пластмас. Ринкова вартість чистих олефінів (етилену й пропілену) приблизно втричі вища за вартість суміші пропану й бутану. Переробка їх у полімери (поліетилен, поліпропілен) підвищує вартість у 7–8 разів, а випуск готової продукції – у 12 разів. Отримання хладонових фракцій пропану й ізобутан-пропанових розділених продуктів високої чистоти (понад 99,5–99,9%) відкриває прямий доступ до високотехнологічного ринку холодоагентів. Однак головною науково-технічною проблемою на шляху до отримання індивідуальних вуглеводнів хладонової чистоти є складність їхнього розділення. Оскільки пропан-бутанові фракції – це багатокомпонентні неазеотропні суміші з близькими температурами кипіння окремих складових (наприклад, пропан і пропілен), їх чітке розділення класичними методами одноразової дистиляції неможливе. Необхідно застосовувати ректифікаційні масообмінні апарати. Традиційні ректифікаційні установки великої потужності, що використовуються на нафтопереробних заводах, мають величезні габарити, значну металомісткість і колосальне енергоспоживання. Проте для малотоннажного виробництва, локальних газорозподільних станцій або дослідно-промислових об'єктів потрібні гнучкі, компактні й високоефективні установки. Використання насадкових колон (зокрема, із нерегулярними сітчастими насадками) дозволяє суттєво інтенсифікувати процеси тепломасообміну й зменшити габарити обладнання [7].

Окремим критичним викликом при проєктуванні таких малогабаритних установок є організація термодинамічно ефективного підведення й відведення теплоти. Ректифікація потребує постійного нагріву куба колони для випаровування суміші й одночасного охолодження дефлегматора (конденсатора) для створення зворотного потоку рідини (флегми). Створення автономних й енергоефективних систем теплохолодопостачання, які інтегрують холодильні цикли безпосередньо в технологічний контур ректифікації, – це передовий напрям досліджень, що дозволяє утилізувати теплоту конденсації і мінімізувати зовнішні енергетичні витрати.

Представлена робота присвячена вирішенню вказаних науково-технічних завдань, а саме проєктуванню, оптимізації та експериментальному дослідженню дослідно-промислової ректифікаційної установки для комплексного розподілу на компоненти пропан-бутанової фракції природного газу. Основною метою є розробка високоефективної технологічної схеми на базі двох насадкових колон й інтегрованої парокомпресійної холодильної машини, здатної забезпечити стабільне отримання перспективних екологічно безпечних робочих тіл для холодильної техніки з високим ступенем чистоти.

Проектування ректифікаційної установки

Попередні розрахунки насадкових колон [6] показали, що для розділення пропан-бутанової фракції з вилученням пропану через велику різницю в теплофізичних властивостях бінарних сумішей пропан-ізобутан і пропан-пропілен (рис.1) неможливо використовувати одну колону. Потрібно, як мінімум, дві колони з різним співвідношенням діаметр-висота для зони сепарації.

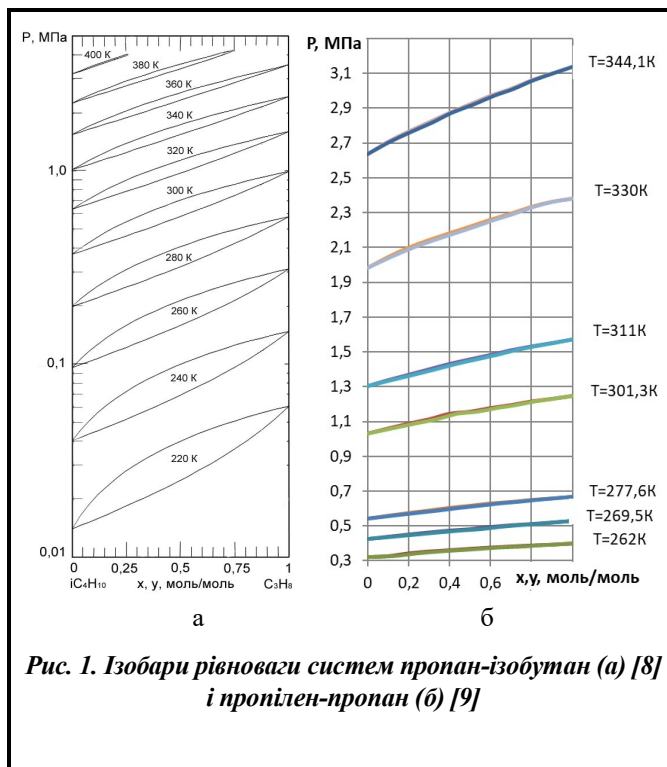


Рис. 1. Ізобари рівноваги систем пропан-ізобутан (а) [8] і пропілен-пропан (б) [9]

У табл. 1 показані основні геометричні характеристики насадкових колон, прийнятих для виготовлення. Обидві колони заповнені сітчастою сідлоподібною насадкою $10 \times 10 \times 0,2$ мм. Габаритні розміри колон обмежувалися коштами, виділеними на виготовлення.

На рис. 2 представлена спрощена схема ректифікаційної установки (а) і проєкт панелі управління (б). Перша колона призначена для відокремлення від пропану важкої фракції – ізобутану, бутану і більш важких вуглеводнів, що входять до складу фракції в мікроконцентраціях. Газоподібна фракція (очищений від бутанів пропан) надходить у другу колону для відділення пропілену, етилену, етану й легших компонентів пропан-бутанової суміші.

Для забезпечення роботи колони до куба постійно підводиться теплота, а від верхньої частини (конденсатора колони) відводиться еквівалентна кількість теплоти, наприклад, за допомогою зовнішнього холодоагенту. Між конденсатором і кубом розміщена робоча частина насадкової колони, де відбувається тепломасообмін, заповнена нерегулярною насадкою. Діаметр і висота робочої частини – розрахункові величини, що визначаються типом суміші, яка розділяється, балансовими рівняннями і типом масообмінної поверхні.

У конденсаторі колони утворюється рідина, що стікає по насадці. Газова фракція практично не містить висококиплячих домішок. Рідина, що попадає в куб, майже не містить пропану. Він випаровується під час підведення теплоти. Аналогічні процеси відбуваються у другій колоні.

Відведення теплоти Q_{K1} і Q_{K2} від дефлегматорів колон проводиться при температурах на 5–7 градусів нижче, ніж температура конденсації основного низькокиплячого компонента при робочому тиску (рис. 3).

На першому етапі при отриманні пропану як джерело холоду можна використовувати каскадні холодильні цикли на аміаку, пропані або пропілені в нижньому каскаді [10]. При очищенні від пропілену – на пропілені, етані чи етилені. Перспективним способом охолодження на цьому етапі можуть бути безмашинні пристрої для передачі холоду з нижчого температурного рівня (наприклад, від рідкого азоту) через речовину-посередника (термосифон [11]).

Однак пошук обладнання із заданими характеристиками показав,

Таблиця 1. Геометричні характеристики ректифікаційних колон (мм) дослідно-промислової установки

Найменування апарату	Розміри насадкової частини		Розміри теплообмінних апаратів		
			Висота		Діаметр $D_D = D_K$
	Висота, h	Діаметр, d	L_D	L_K	
Колона K1	4000	200	1300	1800	400
Колона K2	6000	250	1300	1800	400

Д – конденсатор колони (дефлегматор); К – куб колони

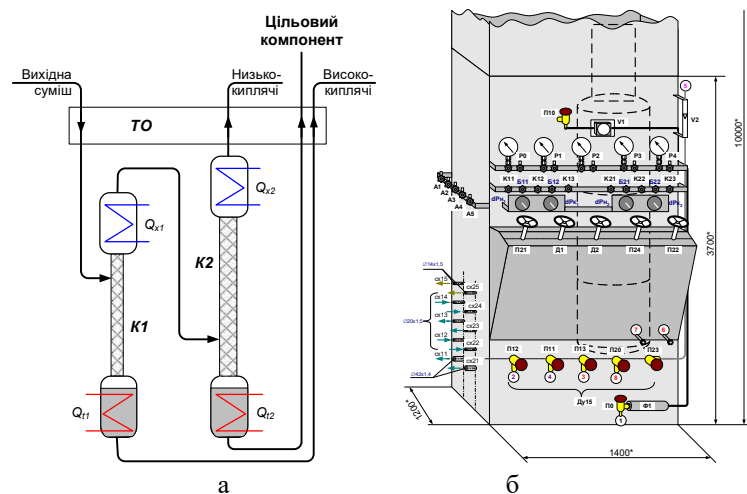


Рис. 2. Спрощена схема (а) отримання пропану з суміші вуглеводнів C_{2+} і панель управління установкою (б), розміщена в нижній частині холодного блоку:

K1, K2 – насадкові ректифікаційні колони;
ТО – рекуперативний теплообмінник

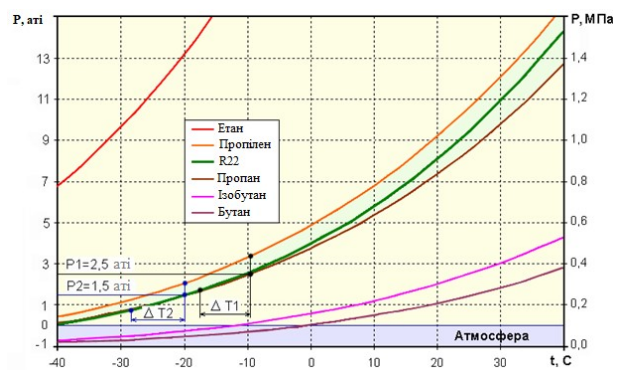


Рис. 3. Підбір холодоагенту для системи охолодження колон [2]:

ΔT_1 і ΔT_2 – різниця температур між температурою конденсації пропілену у верхній частині колони K2 і холодоагентом

що забезпечити необхідні параметри охолодження (табл. 2) можна лише з використанням серійного холодильного агрегату.

Система теплохолодопостачання (СТХП) ректифікаційних апаратів розроблена на базі парокompресійної холодильної машини (ПХМ) із регенеративним теплообмінником (РТО, рис. 4, 5 [10]), вбудованої в ректифікаційну установку.

Робоча речовина стискається в компресорі (процес 1–2) і надходить у конденсатор холодильної машини, де скраплюється (процес 2–3). Для збільшення дросель-ефекту використовується теплообмін між прямим і зворотним потоками у РТО (процес 3–4). Після дроселювання (процес 4–5) робоче тіло надходить у випарник ПХМ, розміщений у конденсаторі колони (процес 5–6). Підігрітий у РТО газ (процес 6–1), надходить на компримування до компресора колони.

Для охолодження конденсаторів колон у кожну з них вбудований випарник відповідної холодильної машини. За рахунок цього конденсується частина речовини і створюється потік флегми, що зрошує насадки. Для випаровування флегми в зоні куба використовуються конденсатори холодильних машин, вбудовані у куби колон. Тепло конденсації робочого тіла надходить до продукту.

Таблиця 2. Параметри роботи холодильної машини у різних режимах роботи установки

№ з/п	Технологічний процес	Колона	
		Перша	Друга
1. Отримання пропану			
1.1.	Температурний рівень, °С	-30 ... -35	-35 ... -40
1.2.	Холодопродуктивність, кВт	15	30...45
2. Очищення пропілену			
2.1.	Температурний рівень, °С	-38 ... -45	-38 ... -45
2.2.	Холодопродуктивність, кВт	15	30...45
3. Отримання ізобутану			
3.1.	Температурний рівень, °С	-5	-10
3.2.	Холодопродуктивність, кВт	10...15	25...30

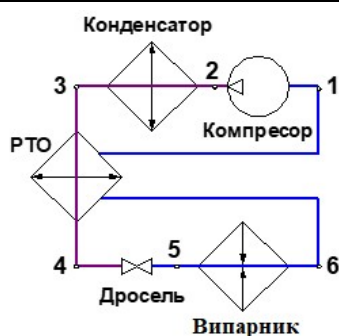


Рис. 4 Традиційна схема холодильної установки

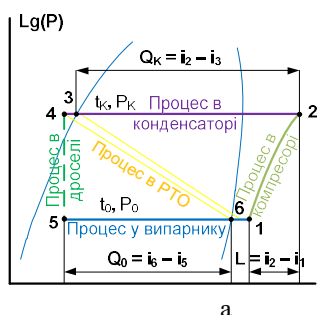
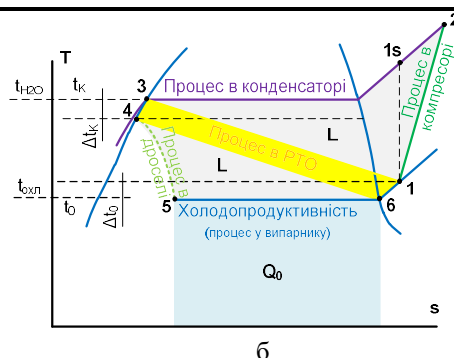


Рис. 5. Цикл холодильної машини в lgP-i (а) та T-s (б) діаграмах



Холодопродуктивність $Q_0 = i_6 - i_5$ відповідає заданому тепловому потоку, необхідному для охолодження конденсатора колони Q_k . Тепловий потік від конденсатора ПХМ $Q_k = i_2 - i_3$ підводиться до куба колони.

З енергетичного балансу холодильного циклу випливає, що

$$i_2 - i_3 = (i_6 - i_5) + (i_2 - i_1)$$

або

$$Q_k = Q_0 + L, \quad)$$

де L – робота компресора.

Формули показують, що в холодильному циклі відводиться більше тепла, ніж можна отримати холоду у випарнику ПХМ. Якщо цей баланс не відповідає заданому, необхідному для реалізації процесу ректифікації, у колоні може утворитися надлишок теплоти. Внаслідок цього флегма поступово випарується, а тиск у ректифікаційному апараті підвищуватиметься. Для досягнення стабільності в колоні частину тепла холодильного циклу слід відводити у зовнішній водяний конденсатор, який входить до складу будь-якого холодильного агрегату.

У результаті проведених досліджень для забезпечення процесу ректифікації було прийнято серійний компресорно-ресиверний агрегат на фреоні-22 АКР-50 [12].

Як було показано вище, відкидні фракції, отримані в процесі вилучення пропану, містять інші цінні компоненти. Основними для важкої фракції є бутан та ізобутан, для легкої – пропілен. Для їх переробки потрібно змінити температурний рівень охолодження конденсаторів колон і підведення теплоти до кубів (табл. 2).

Результати експериментальних досліджень

У табл. 3 представлені результати очищення пропану чистотою близько 90% у дослідно-промисловій установці, а в табл. 4 – параметри роботи колон і СТХП.

На рис. 6, а дано зразок сертифіката на багатоконпонентну суміш, що використовується для отримання пропану. Продуктивність установки по вихідній суміші на першому етапі відповідала проєктній – 30 $\text{нм}^3/\text{год}$, чистота продукційного пропану – 99,9%.

Для отримання продукту 99,96% (рис. 6, б) необхідна подвійна перегонка (доочищення від пропілену) в другій колоні.

Таблиця 3. Результати переробки «брудного» пропану

Склад модельної суміші:	Продукт:
Метан – 0,31%	Пропан чистотою 99,9%
Етан – 0,49%	Домішки:
Пропан – 89,6%	етан 351,18 ppm
І-бутан – 4,2%	пропілен 325,18 ppm
Н-бутан – 5,4%	ізобутан 323 ppm
Продуктивність по пропану – 1200 кг на добу (50 кг/год=24,8 м ³ /год)	

**Таблиця 4. Робочі параметри колон, що підтримуються
у процесі очищення**

Параметр	Колона К1	Колона К2
Тиск у колоні (надл.) кг/см ²	2,62	2,57
Тиск холодоагенту R22 на вході у випарник ПХМ (т. 5, рис. 4) кг/см ²	1,88	0,55
Температура охолодження К (°С)	256 (-17)	243 (-30)

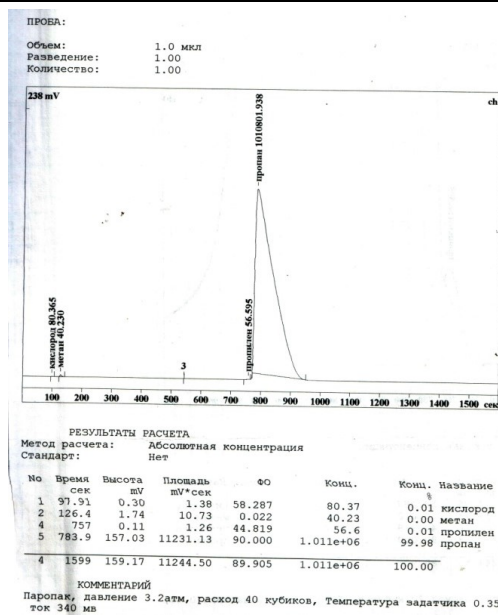
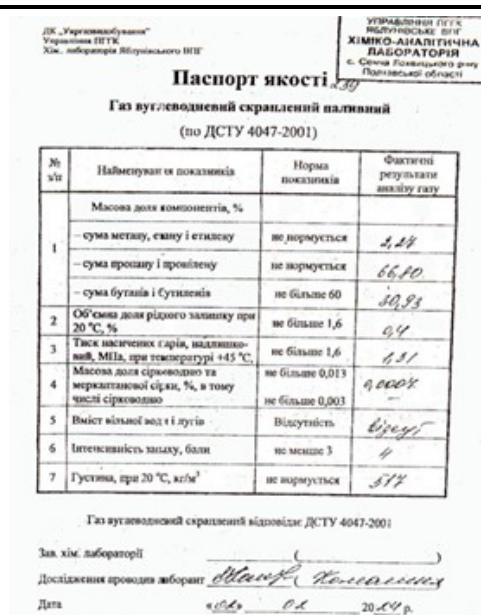


Рис. 6. Вихідний продукт (а) і хроматограма пропану, отриманого при переробці в дослідно-промисловій ректифікаційній установці

Висновки

До складу пропан-бутанових сумішей, як правило, входять і інші вуглеводні, які можуть бути використані як натуральні робочі тіла холодильних машин. Оскільки бінарні суміші, утворені компонентами суміші, є неазеотропними, вилучення кожного індивідуального компонента можливе методами фазової сепарації. Для заданих умов (невеликі витрати) раціонально використовувати дві колонні, заповнені нерегулярною насадкою.

Система підведення теплоти до куба колон і відведення теплоти від конденсаторів організована на базі двох парокompресійних холодильних машин, вбудованих у технологічний цикл.

Випробування дослідно-промислової установки під час подачі вихідної пропан-бутанової суміші із заданою продуктивністю показало, що в результаті переробки можна отримати пропан чистою 99,9%. Чистоту пропану можна збільшити шляхом повторної перегонки у другій колоні.

У розробленій установці можлива безвідходна переробка сировини з одержанням бутану, ізобутану й пропілену. Для цього потрібно змінити температурний рівень охолодження конденсаторів колон і підведення теплоти до кубів.

Література

1. UNEP (United Nations Environment Programme). Report of the technology and economic assessment panel: Alternative refrigerants for high ambient temperature countries. Nairobi: UNEP, 2021. 184 p.
2. Lemmon E. W., Huber M. L., McLinden M. O. NIST Reference fluid thermodynamic and transport properties (REFPROP. Version 9.1): U.S. Department of commerce. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland. 2013.
3. Kidnay A. J., Parrish W. R., McCartney D. G. Fundamentals of natural gas processing (2nd ed.). CRC Press, 2011. 574 p. <https://doi.org/10.1201/b14397>.
4. Green D. W., Southard M. Z. Perry's chemical engineers': handbook. 9th edn. New York: McGraw-Hill Education, 2018. 2272 p.
5. Kiss A. A. Advanced distillation technologies: Design, control and applications. Chichester: John Wiley & Sons, 2013. 418 p. <https://doi.org/10.1002/9781118543702>.
6. Симоненко Ю. М., Грудка Б. Г. Насадкові колони в технології отримання натурального холодоагенту – пропану (R290). *Фізика аеродисперсних систем*. 2026. № 64. С. 30–40. <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2026.64.361461>.
7. Gorak A., Sorensen E. Distillation: Fundamentals and principles. Academic Press, 2014. 506 p. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-66923-9>.
8. Lim J. S., Ho Q. N., Park J.-Y., Lee B. G. Measurement of vapor-liquid equilibria for the binary mixture of propylene (R-1270) + propane (R-290). *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2004. Vol. 49. Iss. 2. P. 192–198. <https://doi.org/10.1021/jc030106k>.
9. Pu X., Cao R., Liu Y., Hao Y., Jiang W., Wu L., Bai Z. Precise correlation of propylene-propane system and its analysis of relative volatility. *Fluid Phase Equilibria*. 2018. Vol. 473. P. 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2018.06.016>.
10. Javed A., Hassan A., Babar M., Azhar U., Riaz A., Mujahid R., Ahmad T., Mubashir M., Lim H. R., Show P. L., Khoo K. S. Comparison of the exergy efficiencies of various heat-integrated distillation columns. *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 18. Article 6498. <https://doi.org/10.3390/en15186498>.
11. Wagner A. M. Review of thermosyphon applications. Report number: ERDC/CRREL-TR-14-1 Affiliation: Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory. 2014. 37 p.
12. Razzaq M. A., Ahamed J. U., Hossain M. A. M., Hossain S. A review on hydrocarbon (HCS) as an alternative refrigerant: based on thermodynamic and environmental approach. *Mechanical Engineering Research Journal*. 2018. Vol. 11. P. 86–96.

Надійшла до редакції 06.05.2026