

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗДІЛЕННЯ ПОВІТРЯ ДЛЯ МАЛОТОННАЖНОГО ВИРОБНИЦТВА КИСНЮ

Басов А.М., PhD, старший викладач

Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. У статті проведено системний порівняльний аналіз трьох основних методів розділення повітря — криогенного, адсорбційного (КЦА) та мембранного — з метою визначення їх придатності для малотоннажного виробництва технічного кисню під тиском 160 бар. Показано, що мембранний метод принципово не дозволяє отримати кисень чистотою вище 60%, а адсорбційні установки потребують дорогого кисневого компресора для досягнення необхідного тиску, що суттєво погіршує їхню економіку у малотоннажному сегменті. Лише криогенний метод забезпечує концентрацію кисню 99,7% і вище при коефіцієнті вилучення понад 40%, що є необхідною умовою для заправки балонів. Для реалізації обрано схему з надлишковим зворотнім циклом, в якій рідкий азот із зовнішньої ємності виступає єдиним джерелом холоду, що дозволяє відмовитися від компресора середнього тиску та детандера — найдорожчих вузлів класичних повітророздільних установок. Проведено тепловий розрахунок основного пластинчасто-ребристого теплообмінника з побудовою $Q-T$ та $Q-(1/T)$ діаграм, розраховано матеріальні та теплові баланси нижньої (~6 бар) та верхньої (~1,3 бар) ректифікаційних колон. Досліджено три режими роботи з витратами рідкого азоту 10, 13 і 17 кг/год. Встановлено, що оптимальним є режим із витратою 13 кг/год, який забезпечує продуктивність по газовому кисню 34,73 м³/год при питомих витратах електроенергії 0,88 кВт·год/кг. Техніко-економічне обґрунтування підтвердило рентабельність 35% і термін окупності 2,83 року, що є конкурентоспроможним показником. Обґрунтовано, що установки на основі надлишкового зворотного циклу є економічно привабливою і технічно досяжною альтернативою адсорбційним системам у ніші малотоннажного виробництва кисню високої чистоти під тиском.

Ключові слова: розділення повітря, надлишковий зворотній цикл, адсорбція, мембранне розділення, ректифікаційна колона, термодинамічний аналіз, $Q-T$ діаграма, криогенна техніка, повітророздільна установка, азот

Постановка проблеми та її зв'язок з науковими завданнями. Промислове розділення повітря на кисень, азот та аргон є одним із ключових технологічних процесів сучасної індустрії. Кисень широко застосовується в металургії, скловарінні, хімічній та медичній галузях, а також для автогенного зварювання і різання металів. Загальними тенденціями розвитку установок для розділення повітря є: зниження витрат на виробництво продуктів поділу, зменшення розмірів установок та витрат корозійностійкої сталі й кольорових металів, підвищення надійності й автоматизація процесів управління [1, 2].

На сьогодні для отримання кисню і азоту застосовуються три основні методи: криогенний, адсорбційний та мембранний. Кожен із них має певний діапазон продуктивності та чистоти продукту, в якому є найбільш конкурентоспроможним. Вибір оптимального методу для малотоннажного виробництва кисню під тиском є актуальним науково-практичним завданням, що потребує системного порівняльного аналізу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Мембранний метод розділення повітря базується на різній швидкості дифузії компонентів крізь синтетичні волокна модуля. Наукові основи некриогенних методів закладено ще в середині XIX ст.: у 1855 р. А. Фік кількісно описав процеси дифузії (закони Фіка), а в 1866 р. Т. Грем вперше отримав збагачене киснем повітря (46,6% O₂) шляхом мембранного розділення [3]. Сучасні мембрани з селективністю 8–10 дозволяють отримувати азот чистотою 99% при коефіцієнті вилучення понад 50%. Проте отримання кисню чистотою вище 60% на мембранних установках залишається практично неможливим [4].

Адсорбційний метод (КЦА — короткоциклова адсорбція) працює при температурі навколишнього середовища, що обумовлює відсутність теплоізоляції, малу інерційність і швидкий пуск. Установки КЦА дозволяють отримувати кисень чистотою до 95% (основна домішка — аргон) і азот до 99,9999% [5]. Однак стиснення кисню адсорбційного виробництва до тиску 160 бар у кисневому компресорі суттєво збільшує вартість обладнання та собівартість продукту.

Криогенний метод, розроблений К. Ліндом, Ж. Клодом і П. Гейландтом на початку XX ст., є єдиним, що забезпечує концентрацію кисню від 99,7% при достатньо високому коефіцієнті вилучення [1, 6]. Особливістю криогенних систем є зростання ефективності зі збільшенням продуктивності, а ніша малотоннажного виробництва кисню під тиском практично не зайнята конкурентами [7, 8, 14].

Мета роботи — провести системний порівняльний термодинамічний аналіз мембранного, адсорбційного та криогенного методів розділення повітря для умов малотоннажного виробництва технічного кисню, обрати оптимальну схему та виконати її тепловий і техніко-економічний розрахунок.

Порівняльний аналіз методів розділення повітря. Основні характеристики трьох методів розділення повітря узагальнено в табл. 1. З таблиці випливає, що для отримання кисню чистотою 99,7% і вище, не-

обхідної для автогенного зварювання та заправки балонів під тиском 160 бар, придатний лише криогенний метод. [17]

Таблиця 1

Порівняльна характеристика методів розділення повітря

Параметр	Мембранний	Адсорбційний (КПА)	Криогенний
Макс. чистота O ₂	30–60%	до 95%	99,7% і вище
Макс. чистота N ₂	до 99,9%	до 99,9999%	до 99,9999%
Коефіцієнт вилучення O ₂	<25%	>40%	>40%
Продукт під тиском 160 бар	Неможливо	Потребує компресора	Рідинний насос
Час виходу на режим	Хвилини	Хвилини	Кілька годин
Відносна вартість установки	Низька	Середня	Вища (малі масштаби)
Можливість автоматизації	Повна	Повна	Повна

Ціна адсорбційних установок зростає непропорційно швидко зі збільшенням продуктивності через зростання маси адсорберів пропорційно кубу їхнього діаметра. При споживаній потужності понад 2,5 МВт криогенні повітророздільні установки стають дешевшими за адсорбційні. Порівняння термінів окупності (табл. 2) свідчить, що у малотоннажному сегменті схема з надлишковим зворотнім циклом, позбавлена дорогих вузлів (компресор середнього тиску та детандер), набуває суттєвих конкурентних переваг [2, 9].

Таблиця 2

Залежність терміну окупності від ринкової ціни азоту

Ціна азоту (\$/т)	Окупність криогенної установки (роки)	Окупність адсорбційної установки (роки)
14,87	32	3,4
22,30	15,5	2,5
29,74	6,75	1,85
44,61	3,6	1,5
59,48	2,5	1,1

Схема та принцип роботи повітророздільної установки. Для малотоннажного виробництва кисню під тиском обрано схему з надлишковим зворотнім циклом. Її головна особливість — використання рідкого азоту з окремої ємності як єдиного джерела холоду для компенсації теплопритоків. Це дозволяє відмовитися від компресора середнього тиску та детандера — найдорожчих вузлів класичних установок [7,15].

Установка включає: безмасляний компресор (7–8 бар), систему очищення повітря, основний пластинчасто-ребристий теплообмінник, нижню ректифікаційну колону (~6 бар), верхню ректифікаційну колону (~1,3–1,5 бар), конденсатор-випарник між колонами, рідинний кисневий насос (до 160 бар) та ємність з рідким азотом (77 К, 1,3 бар). Ключові параметри наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Основні параметри установки

Параметр	Значення
Витрата повітря на вході	160 кг/год
Тиск у нижній колоні	~6 бар
Тиск у верхній колоні	~1,3–1,5 бар
Чистота продукційного O ₂	99,7%
Тиск продукту (після насоса)	160 бар
Продуктивність по O ₂	30,6 кг/год (34,73 м³/год)
Потужність компресора ($\eta=75\%$)	14,3 кВт
Потужність насоса рідкого O ₂	0,2 кВт
Загальна встановлена потужність	~27,5 кВт
Питомі витрати електроенергії	0,88 кВт·год/кг O ₂

Результати теплового розрахунку. Тепловий розрахунок основного теплообмінника виконано методами Q-T та Q-(1/T) діаграм для трьох значень витрати рідкого азоту: 10, 13 і 17 кг/год. Q-T діаграма дозволяє виявити зони зближення температур гарячих і холодних потоків (пінч-точки). Q-(1/T) діаграма, запропонована в [12, 13], відображає розподіл теплового навантаження в координатах, де паралельність ліній потоків свідчить про мінімальну незворотність теплообміну.

Встановлено, що витрата 10 кг/год є недостатньою для підтримання прийнятних температурних порів у всіх зонах теплообмінника. При витраті 13 кг/год пінч-запас є задовільним по всій довжині апарата, а при 17 кг/год спостерігається надлишок холоду. Витрата 13 кг/год прийнята як розрахункова.

Розрахунок нижньої колони підтвердив можливість отримання азотної флегми чистотою понад 99,9% і кубового залишку з вмістом кисню 38–40%. У верхній колоні досягається чистота кубового кисню 99,7% при коефіцієнті вилучення понад 40%. Охолодження рідкого кисню перед подачею до насоса є обов'язковим для запобігання кавітації в насосному циліндрі.

Техніко-економічний аналіз. Техніко-економічний розрахунок охоплює капітальні вкладення, витрати на оплату праці, електроенергію, рідкий азот, амортизацію та ремонт. Зведені показники для розрахункового режиму (13 кг/год азоту) наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Основні техніко-економічні показники (розрахунковий режим, 13 кг/год N₂)

Показник	Одиниця виміру	Значення
Продуктивність по кисню	м ³ /год	34,73
Встановлена електрична потужність	кВт	27,5
Річні витрати на рідкий азот	тис. грн/рік	631,7
Капітальні вкладення в обладнання	тис. грн	662,3
Річні експлуатаційні витрати	тис. грн/рік	1028,0
Собівартість кисню	грн/м ³	7,26
Очікуваний річний прибуток	тис. грн/рік	666,1
Термін окупності	роки	2,83
Рівень рентабельності	%	35

Аналіз показує, що основну частку операційних витрат (близько 61%) становить вартість рідкого азоту, що підтверджує доцільність розміщення установки як сателіта великотоннажного виробника рідкого азоту. При трьох досліджених режимах терміни окупності склали від 2,83 (13 кг/год) до 4,2 роки (10 кг/год), коефіцієнт економічної ефективності — від 0,238 до 0,30. Рентабельність 35% є високим показником для промислового виробництва. [16]

Висновки:

1. Проведений порівняльний аналіз показав, що лише криогенний метод розділення повітря забезпечує отримання технічного кисню чистотою 99,7% при тиску 160 бар, необхідному для заправки балонів. Мембранний та адсорбційний методи не здатні забезпечити ці параметри.

2. Схема з надлишковим зворотнім циклом дозволяє відмовитися від компресора середнього тиску та детандера, що суттєво знижує капітальні витрати порівняно з класичними установками.

3. Оптимальним є режим із витратою рідкого азоту 13 кг/год, при якому забезпечуються задовільні температурні напори в основному теплообміннику та досягається чистота продукційного кисню 99,7% при коефіцієнті вилучення понад 40%.

4. Питомі витрати електроенергії склали 0,88 кВт·год/кг газового кисню під тиском 160 бар, що свідчить про енергетичну ефективність обраної схеми.

5. Техніко-економічна оцінка підтвердила рентабельність проекту: термін окупності — 2,83 роки, рівень рентабельності — 35%, що є конкурентоспроможним показником порівняно з адсорбційними установками аналогічної продуктивності.

6. Ніша малотоннажного виробництва кисню під тиском практично не зайнята конкурентами, що відкриває значний ринковий потенціал для установок запропонованого типу.

References

1. Arkharov, A. M., et al. (1975). *Low-temperature engineering*. Energiya. (488 p.)
2. Arkharov, A. M., Mikulina, E. I., & Marfenina, I. V. (1996–1999). *Cryogenic systems* (Vols. 1–2). Mashinostroyeniye.
3. Graham, T. (1866). On the absorption and dialytic separation of gases by colloid septa. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 156, 399–439.
4. Budnevich, S. S. (1979). *Calculation of cryogenic installations*. Mashinostroyeniye. (264 p.)
5. Glizmanenko, D. L. (1975). *Oxygen production*. Khimiya. (384 p.)

6. Epifanova, V. I., & Akselrod, L. S. (1973). *Air separation by deep cooling methods* (Vol. 1). Mashinostroyeniye.
7. Lashchinsky, L. A., & Tolchinsky, A. R. (1970). *Fundamentals of design and calculation of chemical equipment*. Mashgiz.
8. Malkov, M. P. (1985). *Reference book on the physical and technical fundamentals of cryogenics*. Energiya.
9. Poberezhkin, A. E. (2003). *Air separation units: Lecture notes*. ODAKHT.
10. Taran, V. M. (2003). *Module TFS_KTSM*. ODAKHT.
11. COFE CAPE-OPEN Flowsheeting Environment. (n.d.). *Software documentation*.
12. Kravchenko, M. B. (2016). Application of the Q–(1/T) diagram for the analysis of low-temperature machine cycles. *Industrial Gases*, 16(2).
13. Kravchenko, M. B. (2017). Simulation of air separation units in the COCU/CHEMSEP flow simulator. *Industrial Gases*, 17(2).
14. Bucsa, S., Serban, A., Balan, M. C., Ionita, C., Nastase, G., Dobre, C., & Dobrovicescu, A. (2022). Exergetic analysis of a cryogenic air separation unit. *Entropy*, 24(2), 272. <https://doi.org/10.3390/e24020272>
15. Alyaseen, A., Ajeel, R. K., & Mohammed, M. F. (2023). Modeling and design of a multistream plate-fin heat exchanger in the air separation units by pinch technology. *International Journal of Chemical Engineering*, 2023, 9204268. <https://doi.org/10.1155/2023/9204268>
16. Serrano, J. R., Arnau, F. J., García-Cuevas, L. M., & Gutiérrez, F. A. (2022). Thermo-economic analysis of an oxygen production plant powered by an innovative energy recovery system. *Energy*, 255, 124546. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124419>
17. Singla, R., & Chowdhury, K. (2019). Comparisons of thermodynamic and economic performances of cryogenic air separation plants designed for external and internal compression of oxygen. *Applied Thermal Engineering*, 160, 114025. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114025>

COMPARATIVE ANALYSIS OF AIR SEPARATION METHODS FOR SMALL-SCALE OXYGEN PRODUCTION

Basov A.M., PhD, Senior Lecturer
Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine

Abstract. The article presents a systematic comparative analysis of three principal air separation methods — cryogenic distillation, pressure swing adsorption (PSA), and membrane separation — with the aim of determining their suitability for small-scale production of technical oxygen at a filling pressure of 160 bar. It is demonstrated that the membrane method is fundamentally incapable of achieving oxygen purity above 60%, while PSA systems require a costly oxygen compressor to reach the required pressure, which substantially undermines their economic viability in the small-scale segment. Only the cryogenic method can deliver oxygen at a purity of 99.7% and above with an extraction coefficient exceeding 40%, which is the prerequisite for cylinder filling at 160 bar. The selected process scheme is based on the excess reverse cycle, in which liquid nitrogen supplied from an external vessel serves as the sole refrigeration source, thereby eliminating the need for an intermediate-pressure compressor and expander — the most expensive components of conventional air separation units. A thermal design of the main plate-fin heat exchanger was carried out using Q-T and Q-(1/T) diagram methods; material and heat balances of the lower-pressure (~6 bar) and upper-pressure (~1.3 bar) rectification columns were calculated. Three operating modes with liquid nitrogen flow rates of 10, 13 and 17 kg/h were investigated. The mode at 13 kg/h was identified as optimal, providing an oxygen output of 34.73 m³/h at a specific power consumption of 0.88 kWh/kg. Techno-economic assessment confirmed a profitability level of 35% and a payback period of 2.83 years, making the proposed plant a competitive and technically viable alternative to PSA systems in the niche of small-scale high-purity pressurised oxygen production

Keywords: air separation, excess reverse cycle, pressure swing adsorption, membrane separation, rectification column, thermodynamic analysis, Q-T diagram, cryogenic technology, air separation unit, nitrogen

Список використаної літератури

1. Архаров А.М. та ін. Техніка низьких температур.: Енергія, 1975. 488 с.
2. Архаров А.М., Мікуліна Є.І., Марфеніна І.В. Кріогенні системи. Т. 1.: Машинобудування, 1996; Т. 2. М.: Машинобудування, 1999.
3. Graham T. On the absorption and dialytic separation of gases by colloid septa. *Phil. Trans. R. Soc.* 1866. Vol. 156. P. 399–439.
4. Будневич С.С. Розрахунок кріогенних установок. : Машинобудування, 1979. 264 с.
5. Глізманенко Д.Л. Отримання кисню. М.: Хімія, 1975. 384 с.
6. Єпіфанова В.І., Аксельрод Л.С. Розділення повітря методами глибокого охолодження. Т. 1. М.: Машинобудування, 1973.

7. Лашинський Л.А., Толчинський А.Р. Основи конструювання і розрахунку хімічної апаратури. М.: Машинобудування, 1970.
8. Малков М.П. Довідник з фізико-технічних основ кріогеніки.: Енергія, 1985.
9. Побережкін А.Е. Повіторозподільні установки: конспект лекцій. Одеса: ОДАХТ, 2003.
10. Таран В.М. Модуль TFS_KTЗМ. Одеса: ОДАХТ, 2003.
11. COFE CAPE-OPEN Flowsheeting Environment. Документація програмного забезпечення.
12. Кравченко М.Б. Застосування діаграми $Q-(1/T)$ для аналізу циклів низькотемпературних машин. Технічні газети. 2016. Т. 16. № 2.
13. Кравченко М.Б. Моделювання повіторозподільних установок у потоковому симуляторі COCU/CHEMSEP. Технічні газети. 2017. Т. 17. № 2.
14. Bucsa, S., Serban, A., Balan, M. C., Ionita, C., Nastase, G., Dobre, C., & Dobrovicescu, A. (2022). Exergetic analysis of a cryogenic air separation unit. *Entropy*, 24(2), 272.
15. <https://doi.org/10.3390/e24020272>
16. Alyaseen, A., Ajeel, R. K., & Mohammed, M. F. (2023). Modeling and design of a multistream plate-fin heat exchanger in the air separation units by pinch technology. *International Journal of Chemical Engineering*, 2023, 9204268. <https://doi.org/10.1155/2023/9204268>
17. Serrano, J. R., Arnau, F. J., García-Cuevas, L. M., & Gutiérrez, F. A. (2022). Thermo-economic analysis of an oxygen production plant powered by an innovative energy recovery system. *Energy*, 255, 124546. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124419>
18. Singla, R., & Chowdhury, K. (2019). Comparisons of thermodynamic and economic performances of cryogenic air separation plants designed for external and internal compression of oxygen. *Applied Thermal Engineering*, 160, 114025. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114025>

Отримано в редакцію 06.07.2025
Прийнято до друку 02.09.2025

Received 06.07.2025
Approved 02.09.2025