

УЛОВЛЕННЯ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ У ВІДЦЕНТРОВОМУ АПАРАТІ З СІТЧАСТОЮ НАСАДКОЮ

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

Виконано розрахунок ефективності масообміну у відцентровому апараті з сітчастою насадкою, який враховує складну взаємодію конструктивних, гідродинамічних та фізико-хімічних параметрів процесу. У цьому дослідженні розроблена методика базується на використанні емпіричних рівнянь, які описують механізми масопереносу між газовою та рідинною фазами в умовах інтенсивного турбулентного потоку. Особливістю розрахунків є застосування критеріїв подібності, таких як Рейнольдса, Вебера та Галілея, що дозволяє врахувати комплексний вплив параметрів, пов'язаних з конструкцією апарата, властивостями робочих середовищ та гідродинамічними умовами.

В основі моделювання є рівняння для визначення коефіцієнта масообміну, яке враховує вплив таких конструктивних параметрів апарата, як радіус насадки, висота шару сітчастого матеріалу, розмір осередків сітки. Також враховано гідродинамічні характеристики, зокрема швидкість потоку газу та рідини, густину та в'язкість обох фаз, а також значення поверхневого натягу рідини. Ці параметри є критичними для досягнення високого ступеня контакту фаз і підвищення ефективності масопереносу.

Визначено коефіцієнт масообміну залежно від витрати газу та рідини, їхніх теплофізичних властивостей, а також від геометричних характеристик конструкції апарата. Припущено, що кінцева концентрація вуглекислого газу на виході з апарата дорівнює нулю, а це дозволяє моделювати ідеальні умови для оцінки максимальної ефективності процесу.

Результати дослідження дозволили не лише прогнозувати ефективність процесів масообміну для різних умов експлуатації, але й оптимізувати конструкцію апарата. Завдяки цьому вдалося визначити параметри, які забезпечують найефективніше розділення газової та рідинної фаз. Зокрема оцінено вплив зміни висоти сітчастої насадки, діаметра апарата, витрати рідини та газу на показники ефективності.

Таким чином, проведені розрахунки дозволяють оцінити взаємозв'язок між геометричними параметрами насадки, швидкістю потоку та ефективністю масообміну. Це має практичне значення для промислового впровадження відцентрових апаратів із сітчастими насадками у різних галузях. Особливо це стосується таких напрямків, як очищення газів від шкідливих компонентів, хімічна та нафтохімічна промисловість, де необхідний інтенсивний і стабільний масообмін у стиснутих умовах роботи.

Ключові слова: масообмін, відцентровий апарат, біогаз, очищення, сітчаста насадка.

Вступ

Україна, як і багато інших країн світу, стикається з низкою енергетичних випробувань, посилені останніми роками. Російські обстріли енергетичної інфраструктури призвели до масштабних відключень електроенергії, що суттєво вплинуло на життя мільйонів українців та економіку країни.

Знищення енергетичної інфраструктури, дефіцит електроенергії та загроза енергетичної безпеки підкреслює вразливість української енергосистеми перед зовнішніми загрозами та необхідність диверсифікації джерел енергії. Енергетична криза негативно впливає на всі сектори економіки, призводячи до зниження виробництва, зростання цін та погіршення умов життя населення.

Україна вживає заходи для стабілізації енергосистеми, такі як імпорт електроенергії з європейських країн для покриття дефіциту, відновлення пошкодженої інфраструктури після обстрілів, введення графіків відключення електроенергії для уникнення надмірного навантаження на енергосистему, а також залучення міжнародних партнерів для допомоги у відновленні енергетичної системи.

Незважаючи на вищезазначені проблеми, енергетика в Україні має значний потенціал для розвитку, ключовими напрямками якого можна зазначити децентралізацію енергії, розвиток розподіленої генерації на основі як відновлювальних, так і традиційних джерел енергії, інтеграцію у європейську енергетичну систему ENTSO-E, диверсифікацію відновлювальних джерел енергії.

Одним зі шляхів до сталого розвитку та енергетичної незалежності є розвиток відновлювальних джерел енергії. Біогаз, який виробляється з органічних відходів, є одним з перспективних напрямків у цьому секторі.

Особливості біогазу як палива

Україна володіє значними ресурсами біомаси, та має потенціал для розвитку біогазової енергетики [1]. Виробництво біогазу дозволить не лише зменшити залежність від імпорتنних енергоносіїв та знизити викиди парникових газів, але й вирішить проблему утилізації великої кількості органічних відходів сільського господарства та промисловості. Україна має значні ресурси біомаси, що відкриває перспективи для заміщення природного газу вітчизняним біопаливом, зменшення залежності від імпорту енергоносіїв та зниження викидів парникових газів [1]. Наявні в Україні біогазові установки демонструють високу ефективність виробництва електроенергії та біодобрив. Проте для повної реалізації потенціалу біогазової галузі необхідні додаткові інвестиції та підтримка з боку держави [1].

Біогаз є сумішшю різних газів, головними з яких є метан та діоксид вуглецю (CH_4 та CO_2). Склад біогазу варіюється в залежності від сировини, що використовувалась для його виробництва, та умов ферментації [2]. Зазвичай, вміст метану в біогазі становить 50...70 %, а діоксиду вуглецю — 30...50 %. До того ж, у біогазі можуть міститись в незначній кількості інші гази, такі як водень, сірководень, азот та кисень. Проте, до прикладу, наявність домішок сірководню (H_2S) може призвести до корозії обладнання, тому їх також необхідно видаляти.

Вихід та склад біогазу залежить від типу сировини та технології виробництва, зазвичай з 1 тони органічної маси можна отримати 15...50 м³ біогазу [3]. Відносно низький вміст метану в біогазі знижує його теплотворну здатність та ефективність використання як палива. Теплотворна здатність біогазу, зазвичай, становить лише 18...25 МДж/м³, в порівнянні з близько 35 МДж/м³ для природного газу.

Вміст діоксиду вуглецю у складі біогазу значно вищий ніж вміст інших шкідливих домішок і його видалення суттєво покращить енергетичні характеристики палива. Високий вміст CO_2 робить також недоцільним транспортування біогазу на значні відстані та суттєво звужує можливості його використання в промисловості.

Для уловлення діоксиду вуглецю із біогазу використовують різноманітні технології. За типом уловлення відрізняють фізичну та хімічну абсорбцію, а також адсорбційні технології [4]. Відповідно для очистки від CO_2 використовують різні апарати, такі як насадкові колони, мембранні апарати, криогенну сепарацію та ін.

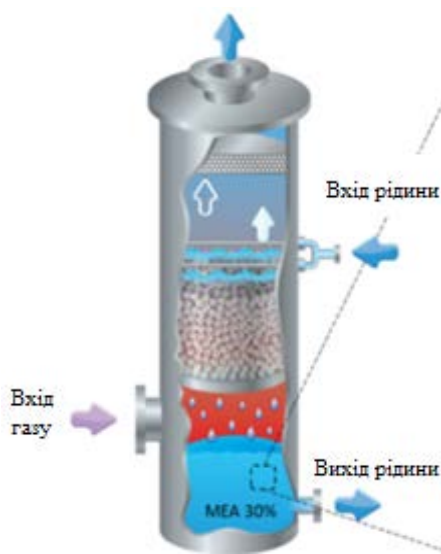


Рис. 1. Насадкова колонна [5]

Найрозповсюдженішим способом уловлення діоксиду вуглецю є насадкові колони [4]. Це вертикальний апарат (рис. 1), який складається з корпусу та насадки [5].

Насадка — це спеціальний наповнювач (часто з сітчастого дроту), що збільшує поверхню контакту між рідиною і газом для інтенсифікації процесу масообміну. Рідина подається зверху колони та стікає вниз по поверхні насадки, газова фаза подається знизу в гору в протилежному напрямку. Як рідина використовується рідкий сорбент, як газова суміш — біогаз. Під час руху фаз між ними відбувається масообмін, у результаті якого рідкий сорбент поглинає CO_2 .

У насадкових колон проста конструкція та відносно низька вартість. З недоліків можна відмітити низьку швидкість масообміну, адже рух газової фази сповільнюється рідиною, що рухається протиток, великі габарити установки, а також складність обслуговування. Низька інтенсивність процесу робить процес уловлення дорогим і часто невигідним з економічного погляду.

Використання відцентрових сил для інтенсифікації процесу

Як альтернатива найрозповсюдженішим насадковим колонам може бути використана відносно нова перспективна технологія — відцентровий насадковий апарат. У порівнянні з насадковими колонами він має низку переваг, серед яких компактний розмір, висока ефективність та на порядок вища інтенсивність масообміну. На рис. 2 показана принципова схема обертової насадки [6].

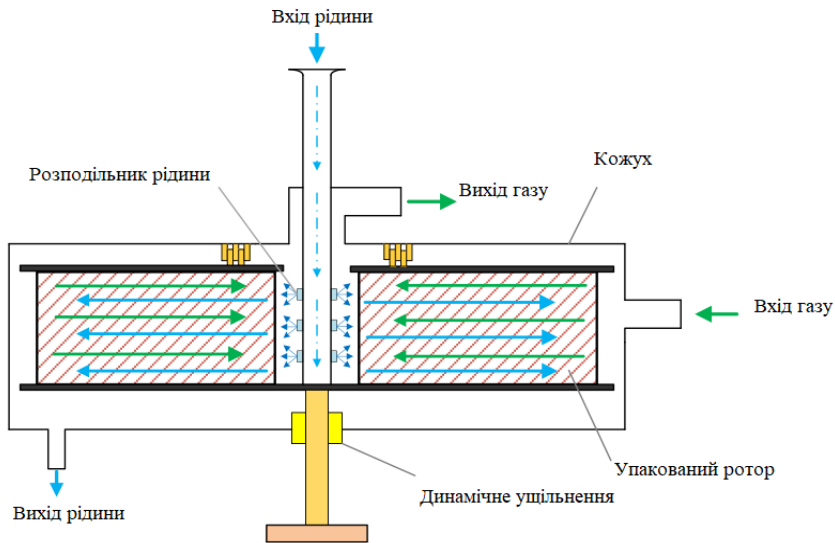


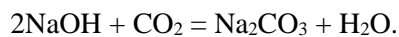
Рис. 2. Принципова схема відцентрового насадкового апарата

Апарат складається з ротора з насадкою, патрубків для входу і виходу газу та рідини, розподільника рідини та кожуха. Рідина потрапляє до апарата через насадку ротора та контактує з газом, що подається протитоком. Під дією відцентрового поля, що утворюється в результаті обертання насадки, рідина розподіляється у вигляді плівки та окремих крапель, що рухаються з високою швидкістю та мають велику площу контакту з газовою фазою. Це суттєво інтенсифікує процес масообміну між газом і рідиною, а отже значно підвищує продуктивність апарата.

Відцентрова насадка має малі габарити, що дозволяє розміщувати подібний апарат у обмеженому просторі. Апарат має низьке споживання енергії, а також широкий діапазон робочих параметрів, зокрема існує можливість регулювати частоту обертання ротора і об'ємні витрати рідини та газової фази. Високий коефіцієнт масовіддачі за рахунок збільшення площі контакту рідини та газової фази дає перевагу відцентровому насадковому апарату у порівнянні з традиційними методами уловлення CO_2 .

Як рідини використовують рідкі абсорбенти. Найрозповсюдженіший абсорбент що використовується у промисловості — це NaOH . У останні роки експериментують з новими речовинами, такими абсорбентами як МЕА (моно-етанол-амін) та PZ (піперазин). Їх зараз активно досліджують та оцінюють вплив абсорбентів на ефективність масообміну [7]. З найперспективніших абсорбентів у літературі зазначається саме МЕА, оскільки в нього високі показники уловлення CO_2 [8].

У відцентровій насадці відбувається хімічна абсорбція, абсорбент вступає у хімічну реакцію з компонентом газової фази та утворює нові сполуки



Гідрооксид натрію є сильним лугом. У разі взаємодії з CO_2 він утворює карбонат натрію і воду. Молекули CO_2 розчиняються у воді, утворюючи вугільну кислоту (H_2CO_3). Вугільна кислота, будучи слабкою, дисоціює на іони H^+ і HCO_3^- . Гідрооксид-іони (OH^-) з луку взаємодіють з іонами водню, утворюючи воду, а іони натрію (Na^+) сполучаються з іонами гідрокарбонату (HCO_3^-), утворюючи карбонат натрію.

Реакція проводиться швидко, не вимагає складного обладнання та специфічних умов, що сприяє широкому використанню у промисловості. Як видно з рівняння, на кожні дві молекули NaOH поглинається одна молекула CO_2 , що дозволяє доволі точно розрахувати необхідну кількість реагентів.

Взаємодія ж між МЕА та CO_2 супроводжується утворенням карбамату, що є ключовим етапом у процесі поглинання. Також на відміну від гідрооксиду натрія, карбамат може розкладатися за підвищеної температури, що дозволяє регенерувати розчин МЕА і виділити чистий CO_2 .

Розрахункове дослідження масообміну у відцентровій насадці

Розрахункове дослідження виконано для лабораторного апарата, який виготовлено в КПІ ім. Ігоря Сікорського (рис. 3). В попередніх експериментальних дослідженнях визначено робочі діапазони для витратних характеристик газу та рідини, а також оптимізовано конструктивне виконання сітчастої насадки [9].



Рис. 3. Зовнішній вигляд експериментального апарата [9]

Розрахунок проводився на основі числових даних, поданих у табл. 1. У ній зазначені конструктивні параметри насадки, та діапазон її робочих параметрів.

Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Позначення	Одиниця вимірювання	Значення
Діаметр дроту сітки	d	м	0,00023
Температура робочого середовища	t	°С	20
Тиск робочого середовища	p	атм.	1
Питома площа пакування	a	м ² /м ³	2950
Осьова довжина пакування	l	м	0,031
Внутрішній радіус пакування	r_1	м	0,045
Зовнішній радіус пакування	r_2	м	0,052...0,1
Об'ємна витрата рідини	L	м ³ /год	0,1
Відцентрова швидкість	ω	рад/с	52...157
Об'ємна витрата газу	G	м ³ /год	10-30
Мольна частка CO ₂ на вході	—	—	0,3

Методика розрахунку полягає у обчисленні відношення мольних часток CO₂ за використання поширеної у науковій літературі формули для обчислення об'ємного коефіцієнта масовіддачі [10]

$$\ln \frac{y_{\text{CO}_2}^{\text{in}}}{y_{\text{CO}_2}^{\text{out}}} = \frac{k_y a_e \pi (r_2^2 - r_1^2) h}{G}, \quad (1)$$

де G — об'ємна витрата газу, м³/хв; r_1, r_2 — внутрішній та зовнішній радіус пакування відповідно, м; h — осьова довжина пакування, м; y_{CO_2} — мольна частка CO₂ у газовій фазі.

Для обчислення об'ємного коефіцієнта масовіддачі, ефективної площі та коефіцієнта масовіддачі газової фази використовувались кореляції з експериментальних даних, зазначених у списку використаної літератури [4].

Об'ємний коефіцієнт масовіддачі розраховувався як

$$k_y a_e = 0,01081 Re_G^{1,0281} We_L^{0,09841} Ga^{0,09081}, \quad (2)$$

де Re_G — число Рейнольдса для газової фази; We_L — критерій Вебера для рідкої фази; Ga — число Галілея.

Щоб розрахувати об'ємний коефіцієнт масовіддачі потрібно розрахувати складові рівняння (2).

Для характеристики потоку газової фази розраховується число Рейнольдса, використовуючи таку формулу:

$$Re_G = \frac{d_e u_G \rho_G}{\mu_G}, \quad (3)$$

де d_e — гідравлічний діаметр, м; ρ_G — густина газової фази, кг/м³; μ_G — динамічна в'язкість газу, кг/(м·с); u_G — середня швидкість газу, адже швидкість потоку змінюється під час обертання.

На це впливають геометричні особливості насадки. Розраховується середня швидкість газу за формулою

$$u_G = \frac{G}{\pi h (r_1 + r_2)}, \quad (4)$$

де G — об'ємна витрата газу, м³/год; h — осьова довжина насадки, м; r_1, r_2 — внутрішній та зовнішній радіуси насадки відповідно, м.

Для характеристики рідинної фази розраховуються числа Вебера

$$We_L = \frac{u_L^2}{\rho_L a \sigma}, \quad (5)$$

де ρ_L — густина рідини, кг/м³; a — площа пакування, 1/м; σ — поверхневий натяг рідини, Н/м; u_L — середня швидкість потоку рідини, адже швидкість варіюється по ходу потоку у апараті, розраховується за формулою

$$u_L = \frac{L \rho_L}{3600 \pi h (r_1 + r_2)}, \quad (6)$$

де L — об'ємна витрата рідини, м³/год.

Також для рідинної фази розраховується число Галілея

$$Ga = \frac{\beta g l^3 \rho_L^2}{\mu_L^2}, \quad (7)$$

де g — прискорення вільного падіння, м/с²; l — характерний розмір пакування (товщина металевої сітки), м; μ_L — динамічна в'язкість рідини, кг/(м·с); β — це відношення відцентрового прискорення до прискорення вільного падіння, яке розраховується за формулою

$$\beta = \frac{\omega^2 r}{g}, \quad (8)$$

де r — зовнішній радіус пакування, м; ω — швидкість обертання ротору, рад/с.

Розрахунок ефективної площі масообміну

$$a_e = 0,01081 Re_G^{0,0997} We_L^{0,06736} Ga^{0,0787}. \quad (9)$$

Розрахунок коефіцієнта масовіддачі газової фази

$$k_y a_e = 0,08827 Re_G^{0,03207} We_L^{0,03105} We Ga^{0,01212}. \quad (10)$$

Безрозмірні критерії обчислювались згідно з геометричними та гідродинамічними характеристиками відцентрової установки. Розрахунки показали, що найбільше на об'ємний коефіцієнт масовіддачі впливає витрата газової фази (рис. 4). Такий вплив можна пояснити зростанням числа Рейнольдса та відповідно інтенсифікацією масообмінних процесів.

З графіка (рис. 4) також видно, що збільшення частоти обертання насадки суттєво менше впливає на об'ємний коефіцієнт масовіддачі $k_y a_e$. Тому оберти апарата потрібно вибирати, враховуючи гідродинамічні умови експлуатації. Зниження частоти обертання апарата нижче ніж 500 об/хв найчастіше недоцільно, адже може виникнути явище заливання насадки [10]. Водночас зростання обертів з 500 до 1500 об/хв збільшує коефіцієнт масовіддачі приблизно на 20 %.

За мінімальної витрати газової фази 10 м³/год і мінімальної частоти обертання 500 об/хв масо-

вий коефіцієнт масовіддачі становить $153,17 \text{ моль}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$, за максимальної витрати $30 \text{ м}^3/\text{год}$ і максимальної частоти обертання — $1500 \text{ об}/\text{хв}$, він становив $608,07 \text{ моль}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$, тобто збільшився в 4 рази.

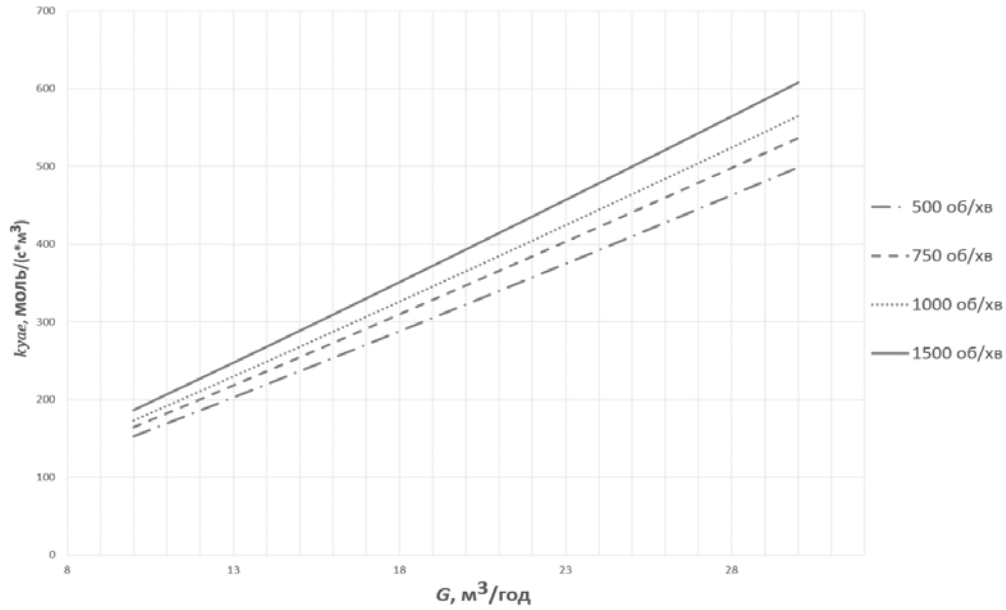


Рис. 4. Залежність об'ємного коефіцієнта масовіддачі від об'ємної витрати газової фази

За результатами розрахунків визначено залежність ефективної площі масообміну від об'ємної витрати газової фази за різних зовнішніх радіусів сітчастого пакування (рис. 5).

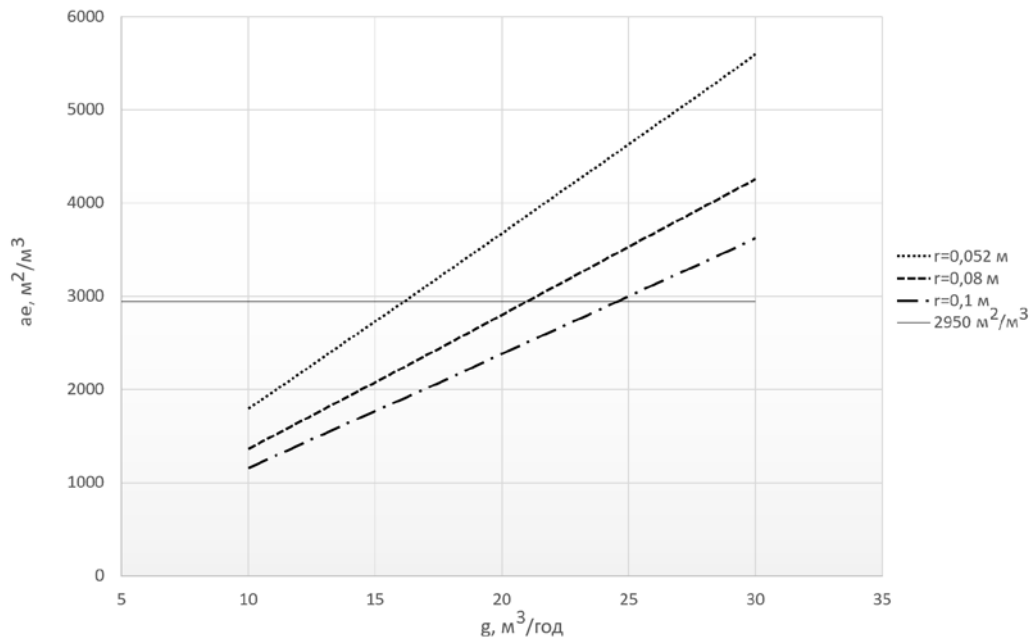


Рис. 5. Залежність ефективної площі масообміну від об'ємної витрати газової фази

З графіка (рис. 5) видно, що зі збільшенням об'ємної витрати газової фази, показник ефективної площі зростає. Збільшення зовнішнього радіуса сітчастої насадки збільшує площу масообміну, і, що очевидно, дозволяє підвищити продуктивність апарата. Горизонтальна лінія на графіку відповідає фактичній площі пакування сітчастої насадки, що становить 2950 м^2 .

Висновки

В роботі розрахунковим методом проаналізовано можливості уловлення CO_2 у відцентровому апараті з сітчастою насадкою, прототип якого розроблено в попередніх дослідженнях авторів [9]. Проведені розрахунки показують, що в апараті з радіусом насадки $r = 100 \text{ мм}$ та її ефективною площею тепломасообміну $a = 2950 \text{ м}^2/\text{м}^3$ можна утилізувати вуглекислий газ для установки з ма-

совою витратою біогазу до 25 м³/год. При цьому об'ємний коефіцієнт масовіддачі становить близько 450 моль/(с·м³). Збільшення обертів інтенсифікує масовіддачу, проте для реальної експлуатації оберти вище 1000 об/хв можуть бути недоцільні: зростають витрати на привод апарата та ускладнюється балансування його ротора.

В подальших дослідженнях заплановано провести експериментальну перевірку отриманих залежностей на прототипі апарата з відцентровою насадкою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Г. Гелетука, П. Кучерук, Ю. Матвеев, і Т. Ходаковская, «Перспективи виробництва біогазу в Україні,» *Відновлювальна енергетика*, № 3, с.73-77, 2011.
- [2] В. Мойсєенко, «Вплив складу біогазу на показник горіння,» *Енергоефективність в будівництві та архітектурі*, вип. 8, с. 231-235, 2016.
- [3] В. Баадер, Е. Доне, і М. Бреннедерфер, *Біогаз: теорія і практика*. Москва: Колос, 1982, 148 с.
- [4] K. J.A. de Waal, and W. J. Beek, "A comparison between chemical absorption with rapid first-order reactions and physical absorption in one packed column," *Chemical Engineering Science*, vol. 22, iss. 4, pp. 585-594, April, 1967.
- [5] I. Gladich, A. Abotaleb, and A. Sinopoli, "Tuning CO₂ Capture at the Gas/Amine Solution Interface by Changing the Solvent Polarity," *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 124/45, pp. 10245-10256, November, 2020.
- [6] Wei Zhang, Peng Xie, Yuxing Li, Lin Teng, and Jianlu Zhu, "Hydrodynamic characteristics and mass transfer performance of rotating packed bed for CO₂ removal by chemical absorption," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 79, pp. 110-123, July, 2020.
- [7] K. P. Dhaneesh, and P. Ranganathan, "A comprehensive review on the hydrodynamics, mass transfer and chemical absorption of CO₂ and modelling aspects of rotating packed bed," *Separation and Purification Technology*, vol. 295, pp. 392-408, April, 2022.
- [8] M. Jasim, D. Eimer, and G. Rochelle, "Carbon Dioxide Absorption and Desorption in Aqueous Monoethanolamine Solution in a Rotating Packed Bed," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 46, iss. 9, pp. 2823-2833, April, 2007.
- [9] A. Solomakha, P. Barabash, and V. Rifert, "Experimental investigation of mass transfer characteristics in centrifugal humidifier," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 53, pp. 221-234, August, 2024, 102769.
- [10] Youzhi Liu, Fagfang Zhang, Deyin Gu, Guisheng Qi, Weizhou Jiao, and Xiaoyan Chen, "Gas-Phase Mass Transfer Characteristics in a Counter Airflow Shear Rotating Packed Bed," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 94, iss. 4, pp. 771-778, January, 2016.

Рекомендована кафедрою інженерних систем у будівництві ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 20.01.2025

Заболотний Олексій Анатолійович — аспірант кафедри теплової та альтернативної енергетики, e-mail: alexes-2000@ukr.net ;

Соломаха Андрій Сергійович — канд. техн. наук., доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики, e-mail: a.solomakha@kpi.ua .

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ

O. A. Zabolotnyi¹
A. S. Solomakha¹

Capture of Carbon Dioxide in a Rotated Packed Bed with Wire Mesh Packing

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

The calculation of mass transfer efficiency in a centrifugal apparatus with a wire mesh packing has been performed, taking into account the complex interaction of structural, hydrodynamic, and physicochemical parameters of the process. In this study, the developed methodology is based on empirical equations that describe the mechanisms of mass transfer between the gas and liquid phases under conditions of intense turbulent flow. A distinctive feature of the calculations is the application of similarity criteria, such as Reynolds, Weber, and Galileo numbers, which make it possible to account for the complex

influence of parameters related to the apparatus design, properties of the working media, and hydrodynamic conditions.

The modeling is based on equations for determining the mass transfer coefficient, which consider the influence of such structural parameters of the apparatus as the radius of the packing, the height of the wire mesh layer, and the cell size of the mesh. Hydrodynamic characteristics, including the flow velocity of the gas and liquid, the density and viscosity of both phases, as well as the surface tension of the liquid, were also taken into account. These parameters are critical to achieving a high degree of phase contact and enhancing mass transfer efficiency.

The calculations made it possible to determine the mass transfer coefficient as a function of the gas and liquid flow rates, their thermophysical properties, and the geometric characteristics of the apparatus design. It was assumed that the final concentration of carbon dioxide at the outlet of the apparatus equals zero, allowing for the modeling of ideal conditions to evaluate the maximum efficiency of the process.

The results of the study enabled not only the prediction of mass transfer process efficiency under various operating conditions but also the optimization of the apparatus design. This made it possible to identify the parameters that ensure the most effective separation of gas and liquid phases. In particular, the influence of changes in the height of the wire mesh packing, the apparatus diameter, and the flow rates of the gas and liquid on efficiency indicators was assessed.

Thus, the calculations, carried out, enabled to evaluate the relationship between the geometric parameters of the packing, flow velocity, and mass transfer efficiency. This has practical significance for the industrial implementation of centrifugal apparatuses with wire mesh packing in various fields. It is especially relevant for areas such as gas purification from harmful components, the chemical and petrochemical industries, where intensive and stable mass transfer is required under compact operating conditions.

Keywords: mass transfer, rotated packed bed, biogas, wire mesh packing, gas purification.

Zabolotnyi Oleksii A. — Post-Graduate Student of the Chair of Thermal and Alternative Energy, e-mail: alexes-2000@ukr.net ;

Solomakha Andrii S. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Thermal and Alternative Energy, e-mail: a.solomakha@kpi.ua