

## ІНТЕНСИФІКАЦІЯ МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ОЧИЩЕННІ БІОГАЗУ ВІД БАЛАСТНИХ ДОМІШОК

Долгов В.В., Ружинська Л.І.

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

### Інформація про авторів:

**Долгов Володимир Владиславович:** ORCID: 0000-0002-4603-9643; [dolgov.vladimir@yahoo.com](mailto:dolgov.vladimir@yahoo.com); Аспірант кафедри біотехнології та техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

**Ружинська Людмила Іванівна:** ORCID: 0000-0003-1223-7649; [ruzhli@ukr.net](mailto:ruzhli@ukr.net); Кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біотехнології та техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

Однією з інноваційних сфер енергозбереження є використання біологічної енергії, включаючи виробництво та використання біогазу.

Це не тільки забезпечує альтернативну енергію, а й вирішує екологічні проблеми, пов'язані з утилізацією та переробкою сільськогосподарських відходів з виробництвом органічних добрив, збільшенням урожайності сільськогосподарських культур, відновленням родючості ґрунту.

Для ефективного використання на біогазових електростанціях необхідно видалити баластні домішки, зокрема діоксид вуглецю та сірководень, загальний вміст яких у біогазі може становити до 50%. Серед відомих процесів очищення біогазу від сірководню та діоксиду вуглецю найбільш перспективним, на мій погляд, є процес хімічного поглинання водного розчину моноетаноламіну, який можна використовувати при атмосферному тиску.

Існуючі конструкції обладнання для процесу очищення біогазу шляхом хімічного поглинання призначені для великих обсягів газової фази і не можуть бути використані на сільськогосподарських біогазових установках.

Тому актуальним є вивчення процесів масообміну в нових конструкціях поглиначів, що забезпечують очищення біогазу в біоенергетичних установках для утилізації органічних відходів, що виникають в результаті господарської діяльності агропромислових підприємств.

**Ключові слова:** біогаз, очищення, баластні домішки, абсорбер, хемосорбція, масообмін.

***Dolhov V., Ruzhinska L.*** «Intensification of mass transfer processes in the purification of biogas from ballast impurities»

One of the innovative areas of energy conservation is the use of biological energy, including the production and use of biogas.

This not only provides alternative energy, but also solves environmental problems associated with the utilization and processing of agricultural waste with the production of organic fertilizers, increasing crop yields, renewal of soil fertility.

For efficient use in biogas power plants, ballast impurities, in particular carbon dioxide and hydrogen sulphide, whose total biogas content may be up to 50%, need to be removed. Among the known processes for the purification of biogas from hydrogen sulphide and carbon dioxide, the

most promising, in my opinion, is the process of monoethanolamine aqueous solution chemical absorption, which can be used at atmospheric pressure.

Existing designs of equipment for the biogas purification process by chemical absorption are designed for large volumes of gas phase and cannot be used in agricultural biogas plants.

Therefore, it is relevant to study the mass transfer processes in new designs of absorbers providing biogas treatment in bioenergy installations for the utilization of organic waste resulting from the economic activities of agro-industrial enterprises.

**Keywords:** biogas, purification, ballast impurities, absorber, chemisorption, mass transfer.

### **Постановка проблеми**

**Мета дослідження:** модернізація абсорбера для очищення біогазу з потенційними покращеннями його продуктивності шляхом зміни його конструктивних елементів та/або впровадження нових деталей.

Опираючись на проведені розрахунки та доопрацювання абсорберу створити можливість його використання на агропромислових підприємствах малого та середнього розміру.

### **Аналіз останніх досліджень**

Швидко зростаючі потреби енергії у всьому світі призвели до величезного виснаження ресурсів викопного палива. Це робить необхідним пошук альтернативних джерел енергії, які мають мінімальний вплив на навколишнє середовище. У цьому контексті біогаз є одним із стійких джерел енергії, які можна отримати з багатьох видів біомаси, включаючи відходи. Технологія анаеробного перетравлення є однією з найбільш перспективних технологій, яка має потенціал перетворити різноманітну біомасу в багатий метаном біогаз, вуглецево-нейтральну альтернативу викопному паливу. Крім того, технологія анаеробного розкладання має ряд переваг, включаючи зменшення вмісту твердих речовин, зменшення запаху, зменшення викидів парникових газів та збільшення доходу від неринкових переваг порівняно із звичайними системами поводження з відходами [1, 2]. У Німеччині, яка є провідною країною у цій галузі, понад 50% потенціалу біогазу є результатом енергетичних культур, оброблених на понад 7000 біогазових установках [3]. Анаеробне розкладання має широке застосування для стабілізації осаду завдяки низькій вартості, рекуперації енергії та мінімізованому виробництву біотвердих речовин.

Процес анаеробного розкладання опосередковується чотирма основними етапами - гідролізом, ацидогенезом, ацетогенезом та метаногенезом. Вони здійснюються консорціумом мікроорганізмів: ацидогенних бактерій, ацетогенних бактерій та метаногенних бактерій [4]. Мікробна спільнота анаеробного процесу дуже складна. Є два прокаріотичні царства, які тісно взаємодіють між собою: Бактерії та Археї. Перший етап передбачає гідроліз складної органічної речовини до більш простих сполук. На другому етапі відбувається ацидогенез цих органічних речовин з утворенням органічних кислот та водню. На завершальному етапі метан і метаногени з органічних кислот та водню виробляють метан та діоксид вуглецю.

Біогаз є продуктом анаеробного бродіння органічних продуктів. З палива на біомасі біогаз має особливе значення і може успішно замінювати викопне паливо для виробництва електроенергії та тепла. Для отримання продуктивного та вигідного біогазу його необхідно переробити перед використанням. Таким чином, перед використанням необроблений біогаз піддається кондиціонуванню (очищенню), що призводить до властивостей, необхідних

користувачам. Очищення біогазу - це операція утримання небажаних компонентів біогазу перед тим, як його використовувати в процесі згоряння. Яким би не був кінцевий спосіб використання біогазу, використовувати його в необробленому стані неможливо. Єдиним компонентом, що переробляється, є метан.

Біогаз є цінною відновлюваною енергією, а також вторинним носієм енергії, що виробляється з біологічно розкладаються органічних матеріалів шляхом анаеробного травлення. Він може використовуватися як паливо або як вихідний матеріал для виробництва хімічних речовин, водню та/або синтез-газу тощо. Основними складовими біогазу є метан ( $\text{CH}_4$ ) та вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ) з різною кількістю забруднень, таких як аміак ( $\text{NH}_3$ ), водяна пара ( $\text{H}_2\text{O}$ ), сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ ), метилсилоксани, азот ( $\text{N}_2$ ), кисень ( $\text{O}_2$ ), галогеновані леткі органічні сполуки (VOCs), окис вуглецю ( $\text{CO}$ ) та вуглеводні. Наявність та кількість цих забруднень значною мірою залежать від джерела біогазу, яким може бути анаеробне розкладання багатьох субстратів та розкладання звалищ. Видалення цих забруднень, особливо  $\text{H}_2\text{S}$  та  $\text{CO}_2$ , значно покращить якість біогазу для подальшого використання. [5]

Для очищення біогазу доступні декілька процесів, які залежать від різних принципів поділу [6, 7]: абсорбція рідини газів (фізична, наприклад, очищення водою чи органікою, хімічна, така як очищення аміном), адсорбція (PSA), проникнення газової мембрани або кріогенність. Ці технології спрямовані на отримання біометану з якісною газовою сіткою та найвищим коефіцієнтом відновлення метану  $\text{RCH}_4$  (як правило, вище 97%).

Хімічна абсорбція вуглекислого газу може здійснюватися за допомогою різних типів контакторів. Вибір між упаковкою, пластинчастим та мембранним контактором зазвичай здійснюється на основі масштабу та бюджету. Хоча структурована упаковка вважається більш придатною для малих масштабів через її високу вартість, випадкові упаковки, як повідомляється, підходять для малих та великих розмірів колон, якщо пакувальний матеріал вибирати ретельно [8].

Для абсорбції використовуються різні хімічні абсорбенти, які мають як переваги, так і недоліки. Вони включають, але не обмежуючись ними: луги, алканоламіни, іонні рідини та деякі суміші легкодоступних хімічних речовин. Основна увага в цьому дослідженні зосереджена на амінах, оскільки вони широко використовуються у всьому світі для очищення біогазу. Їм переважно віддають перевагу завдяки вищій надійності, більшій придатності та меншим інвестиційним та експлуатаційним витратам [9]. Основна увага приділяється первинному аміну Моноетаноламіну (MEA), оскільки він має високу поглинальну здатність діоксиду вуглецю [10]. Тема щодо очищення біогазу за допомогою MEA вивчалась, але з точки зору модернізації апарату зроблено не так багато.

MEA ефективно поглинає домішки в біогазі. Він може виводити  $\text{CO}_2$  з біогазу, в результаті чого біометан перевищує 85%  $\text{CH}_4$ . Температура розчинника впливає на процес поглинання. Більш висока концентрація MEA призводить до високого поглинання, оскільки 30% розчин MEA мав найчистіший газ. Температура розчинника також впливала на процес поглинання, оскільки швидкість реакції залежить від температури. Ефективність видалення зростала із збільшенням температури і була зафіксована на рівні 77% при 40 °C. [11]

В наш час все більше уваги приділяється різним стратегіям біоконверсії біомаси у багатий метаном біогаз через збільшення глобального потепління, необхідність стійкого поводження з відходами та високі енергетичні витрати [12]. Виробництво біогазу шляхом анаеробного перетравлення забезпечує значні переваги перед іншими формами виробництва біоенергії. На відміну від викопного палива, біогаз в анаеробному травленні постійно

відновлюється, оскільки його виробляють з біомаси, яка є живою формою накопичення сонячної енергії завдяки фотосинтезу [13]. Він був оцінений як одна з найбільш енергоефективних та екологічно вигідних технологій виробництва біоенергії [14]. Це може значно зменшити викиди ПГ порівняно з викопним паливом за рахунок використання місцевих ресурсів.

При хемосорбції очищення газових потоків абсорбційним методом поглинання цільового компонента рідким поглиначем супроводжується хімічною взаємодією молекул газу з молекулами активного компонента абсорбенту та переходом його в зв'язаний стан. При цьому концентрація компонента в рідині зменшується, що призводить до збільшення градієнта концентрацій і прискоренню поглинання газу в рідкій фазі в порівнянні з фізичною абсорбцією. Таким чином, в цьому випадку кінетика абсорбції визначається не тільки швидкістю масообміну, а й кінетичними закономірностями реакції. Залежно від того, яка швидкість визначає загальну швидкість перенесення маси цільового компонента, розрізняють кінетичну і дифузійну області протікання хемосорбції. У кінетичній області лімітуючою є швидкість хімічної взаємодії, в дифузійній області - швидкість дифузії цільового компонента в зоні реакції. Якщо швидкості реакції і масопередачі сумірні за величиною, то процес протікає в змішаній, дифузійно-кінетичній області.

Для проведення процесів хемосорбції в промисловості використовується конструкції обладнання такі як для процесів фізичної абсорбції.

Оскільки хемосорбції протікає на поверхні розділу фаз, абсорбери повинні мати розвинену поверхню контакту між рідиною і газом. За способом утворення цієї поверхні абсорбери умовно поділяються на наступні 4 групи: поверхневі і плівкові; насадкові; барботажні (тарілчасті); розпилюючі.

Існують розроблені конструкції цих абсорберів, які успішно експлуатуються в промисловості при синтезі газу та очищенні природного газу. Продуктивність цих абсорберів за газовою фазою складає 100000-200000 м<sup>3</sup>/год [15]. Але ці абсорбери не можуть бути використані в біогазових установках продуктивністю (300-500) м<sup>3</sup>/год, внаслідок неможливості створення в них активного гідродинамічного режиму, який забезпечить ефективне вилучення баластних домішок з біогазу.

Наприклад, запропонована конструкції абсорбера з перемішувачем пристроєм [18], що містить корпус з турбінною мішалкою у вигляді вала з зануреними у рідину лопатками, пристрій для подачі газу до лопаток, заспокоювач потоку та патрубків для відведення очищеного газу. Лопатки закріплені у верхній і нижній частині роторного колеса. Пристрій для подачі газу виконаний у вигляді співвісно розміщеної на валу труби і з'єднаної з кожухом роторного колеса, який оснащений щілиною з перерізом у вигляді труби Вентурі та вікном для подачі рідини [18].

Недоліком цього апарату є те, що при проходженні газу через щілиновидний канал не забезпечується ефективно його диспергування у рідині.

Пропонується абсорбер [19], що містить заповнений абсорбентом корпус з патрубками, а також вертикальний порожнистий вал для подання в абсорбент забрудненого газу, при цьому вал оснащено мішалкою у вигляді перфорованих трубок, сполучених з порожниною вертикального порожнистого вала. При цьому вертикальний порожнистий вал оснащено додатковою мішалкою, закріпленою над мішалкою у вигляді перфорованих трубок [19].

Недоліком відомого абсорбера є те, що газорозподільча трубка і мішалка розміщені на одному валу, обертаються з однаковою швидкістю, і газ, що виходить з перфорованої трубки

барботує через рідини у вигляді крупних бульбашок, які не диспергуються в бульбашки лопатями мішалки, отже, це знижує міжфазову поверхню та ефективність процесу абсорбції.

### **Цілі статті**

Використання біогазу в енергетиці та хімічному виробництві обмежується високим вмістом баластних домішок (до 50%), зокрема вуглекислого газу та сірководню.

З відомих способів очищення біогазу від баластних домішок найбільш ефективним, на наш погляд, є хемосорбція розчинами амінової групи, зокрема розчином моноетаноламіну.

Використання цього способу гальмується відсутністю інженерних розробок абсорберів для біогазових установок фермерських господарств.

Тому **ціль статті** – полягає в розробленні методики розрахунку процесів гідродинаміки та масообміну, що протікають в апаратах з перемішувачем та барботером при хемосорбції та проведенні кількісної оцінки можливостей використання цих апаратів для очищення біогазу від баластних домішок

### **Виклад основного матеріалу**

Розроблення нових конструкцій абсорберів для біогазових установок продуктивністю від 50 до 500  $m^3/год$  вимагає проведення кількісної оцінки параметрів процесів гідродинаміки та масообміну, що протікають при очищенні біогазу хемосорбцією в цих апаратах.

Для розроблення методики розрахунку абсорбера з механічним перемішувачем та барботером розглянемо конструкцію запропонованого нами апарату. На рисунку 1 наведена конструкція абсорбера, що складається з корпусу з штуцерами, а також з вертикального валу з мішалкою. Під мішалкою встановлений газорозподільчий пристрій у вигляді згорнутої в тор перфорованої трубки.

Нове конструктивне виконання мішалки та газорозподільчого пристрою забезпечує диспергування газової фази в рідині для зменшення діаметру газових бульбашок в рідині і створення розвиненої міжфазової поверхні [16].

В корпус, через подається абсорбент, а біогаз – подається через отвори перфорованої трубки газорозподільчого пристрою. Газ, що проходить через отвори – барботує у рідині. Бульбашки біогазу інтенсивно диспергуються мішалкою, яка закріплена на валу. Газорідинна суміш піднімається вгору всередині циркуляційного контуру, утвореного змійовиком в канал якого, через підводиться і відводиться теплоносій, який забезпечує необхідну для проведення процесу температуру. Збагачений газ з газорідинної суміші виводиться через кришку абсорбера, а рідина поступає вниз і відводиться через штуцер у днищі абсорбера.



Рис. 1 – Абсорбер з мішалкою і газорозподільчим пристроєм

Для оцінки процесів масовіддачі, що відбуваються в абсорберах доцільно використати об'ємний коефіцієнт масовіддачі в рідкій фазі з урахуванням протіканні хімічної абсорбції. Цей коефіцієнт визначається за рівнянням [16]:

$$\beta_{pV}^* = \beta_p \cdot \Phi \cdot a,$$

Об'ємний коефіцієнт масовіддачі  $\beta_{pV}$  при фізичній абсорбції в апаратах з відкритою турбінною мішалкою і барьотером розраховують за рівняннями виду [16]:

За умови  $\varepsilon_V < 10$

$$\beta_{pV} = \beta_p \cdot a = 0,06\varepsilon_N^{0,81}$$

Для  $\varepsilon_V > 10$

$$\beta_{pV} = \beta_p \cdot a = 0,153\varepsilon_N^{0,39}$$

Питома поверхня контакту фаз  $a$  в абсорберах з барботером і механічним перемішувачем залежить від властивостей розчину МЕА0,  $\varepsilon_M$  питомої дисипації механічної енергії, що вводиться в апарат перемішувачем, співвідношення швидкостей  $W_z$  газу та  $u_b$  спливання бульбашок газу і визначається за формулою [17]:

$$a = 1,44(\varepsilon_N^{0,4} \cdot \rho_p^{0,2} / \sigma_p^{0,6}) \left( \frac{W_z}{u_b} \right)^{0,5};$$

Коефіцієнт прискорення  $\Phi$ , дозволяє оцінити в скільки разів коефіцієнт масовіддачі при хімічній абсорбції перевищує коефіцієнт масовіддачі при фізичній абсорбції за умов однакової рушійної сили процесу [15]. Цей коефіцієнт залежить від значень кінетичного  $R$ , стехіометричного  $M$  та дифузійного  $\theta$  параметрів. [16] і визначається рівнянням:

$$\Phi = \frac{2(M\sqrt{\theta} + 1)}{1 + \sqrt{1 + 4(M\sqrt{\theta} / R^2)}}.$$

Позначимо коефіцієнт дифузії  $D_{pCO_2}$  баластних домішок і  $D_{МЕА}$  реагента (моноетаноламіна) в розчині, концентрації баланстних домішок на поверхні розділу фаз  $A_p$ , констант швидкості  $r_n$ . Тоді кінетичний параметр  $R$ , знаходять з рівняння [16]:

$$R = \sqrt{\frac{2}{n+1} \cdot r_n \cdot B_0^\beta \cdot D_{pCO_2} \cdot A_p^{\alpha-1} / \beta_p};$$

де  $n=2$ ;  $\beta=1$ ;  $\alpha=1$ .

Стехіометричний  $M$  і дифузійний  $\theta$  параметри, знаходять з рівнянь:

$$M = \frac{B_0}{n \cdot A_p};$$

$$\theta = \frac{D_{МЕА}}{D_{pCO_2}};$$

Для визначення константи прямої хімічної реакції  $r_n$ , при умові що швидкість оберненої хімічної реакції є незначною, можна скористатись формулою [16]:

$$\lg r_n = 11,07 - 2140/T.$$

Швидкість поглинання  $CO_2$   $1m^3$  хемосорбенту знаходиться за формулою:

$$M_{CO_2} = \beta_B \cdot \Phi \cdot A_p^*.$$

Проведені розрахунки процесу хемосорбції в апараті з відкритою турбінною мішалкою і барботером. Номінальний об'єм апарату  $V_n=3.2 m^3$  діаметр мішалки  $d_m=0.32 m$ ,

частота обертання  $n = 2,67 \text{ с}^{-1}$ . Витрати біогазу  $V_2 = 300 \text{ м}^3/\text{год}$ . Витрати біогазу , вміст  $\text{CO}_2$  в біогазі

В результаті розрахунків встановлено, що швидкість поглинання  $\text{CO}_2$  розчином 15% розчином MEA складає  $(0,009 \div 0,011) \frac{\text{кмоль}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}}$  отже в апараті забезпечується вилучення вуглекислого газу з біогазу.

### Висновки

Запропонована методика розрахунку абсорбера з механічним перемішувачем пристроєм і барботером.

Виконані розрахунки об'ємних коефіцієнтів масовіддачі при хемосорбції вуглекислого газу розчинами моноетаноламіну та швидкості поглинання  $\text{CO}_2$  розчином MEA свідчать про можливість очищення біогазу від баластних домішок в апараті з відкритою турбінною мішалкою і барботером.

### Список використаних джерел:

1. Kannah RY, Kavitha S, Banu JR, Karthikeyan OP, Sivashanmugham OP. Dispersion induced ozone pretreatment of waste activated biosolids: Arriving biomethanation modelling parameters, energetic and cost assessment. *Bioresource Technology*. 2017;244: 679-687. DOI: 10.1016/j.biortech. 2017.08.001
2. Kuglarz M, Karakashev D, Angelidaki I. Microwave and thermal pretreatment as methods for increasing the biogas potential of secondary sludge from municipal wastewater treatment plants. *Bioresource Technology*. 2013; 134:290-297. DOI: 10.1016/j.biortech. 2013.02.001
3. Weiland P. Biogas production: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2010; 85:849-860. DOI: 10.1007/s00253-009- 2246-7
4. Mir MA, Hussain A, Verma C. Design considerations and operational performance of anaerobic digester: A review. *Cogent Engineering*. 2016;3: 1181-1196. DOI: 10.1080/23311916. 2016.1181696
5. Olumide Wesley Awe, Yaqian Zhao, Ange Nzihou, Doan Pham Minh, Nathalie Lyczko (2018). A Review of Biogas Utilisation, Purification and Upgrading Technologies, 2-5.
6. L. Yang, X. Ge, C. Wan, F. Yu, and Y. Li, 'Progress and perspectives in converting biogas to transportation fuels', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 40, pp. 1133–1152, Dec. 2014.
7. F. Bauer, C. Hulteberg, T. Persson, and D. Tamm, 'Biogas upgrading - Review of commercial technologies', 2013.
8. Sinnott, R. K. 2005. *Chemical Engineering Design: Chemical Engineering*. Butterworth-Heinemann
9. Molina, C.T., Bouallou, C., 9/15/2015. Assessment of different methods of  $\text{CO}_2$  capture in post-combustion using ammonia as solvent. *J. Clean. Prod.* 103, 463e468.
10. Mao, X.Q., Zeng, A., Hu, T., Xing, Y.K., Zhou, J., Liu, Z.Y., 3/15/2014. Co-control of local air pollutants and  $\text{CO}_2$  from the Chinese coal-fired power industry. *J. Clean. Prod.* 67, 220e227.
11. O.I. Maile, H. Tesfagiorgis, E. Muzenda (2017). The potency of monoethanolamine in biogas purification and upgrading. *South African journal of chemical engineering* 24 (2017) 122e127.
12. Li C, Liu G, Nges IA, Liu J. Enhanced biomethane production from *Miscanthus lutarioriparius* using steam explosion pretreatment. *Fuel*. 2016;179: 267-273. DOI: 10.1016/j.fuel.2016. 03.087
13. Al Seadi T, Rutz D, Prassl H, Köttner M, Finsterwalder T, Volk S, et al. *Biogas Handbook*. Esbjerg, Denmark: University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs Vej; 2008. pp. 9-10
14. Panwar NL, Kaushik SC, Kothari S. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011;15:1513-1524. DOI: 10.1016/j.rser.2010.11.037
15. Кузнецов А.А. Расчеты основных процессов и аппаратов переработки углеводородных газов: Справочное пособие. / А.А. Кузнецов, Е.Н. Судаков // М.: «Химия», 183-224 с.
16. Соколов В.М. Аппаратура микробиологической промышленности / В.М. Соколов, М.А. Яблокова // Л.: Машиностроение. Ленингр. отд.–е. 1988. –278 с.
17. Семенова Т.А. Очистка технологических газов /Т. А. Семенова, И.Л. Лейтес, Ю. В. Аксельрод, М. И. Маркина, С. П. Сергеев, Е. Н. Харьковская – М.: «Химия», 1977. – 488 с.
18. Барботажный абсорбер: пат. 2040957 РФ: МПК В01D53/12 опубл. 09.08.1995
19. Абсорбер: пат. 98531 Україна: МПК В01D53/18 опубл. 27.04.2015



**References:**

1. Kannah RY, Kavitha S, Banu JR, Karthikeyan OP, Sivashanmugham OP. Dispersion induced ozone pretreatment of waste activated biosolids: Arriving biomethanation modelling parameters, energetic and cost assessment. *Bioresource Technology*. 2017;244: 679-687. DOI: 10.1016/j.biortech. 2017.08.001
2. Kuglarz M, Karakashev D, Angelidaki I. Microwave and thermal pretreatment as methods for increasing the biogas potential of secondary sludge from municipal wastewater treatment plants. *Bioresource Technology*. 2013; 134:290-297. DOI: 10.1016/j.biortech. 2013.02.001
3. Weiland P. Biogas production: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2010; 85:849-860. DOI: 10.1007/s00253-009- 2246-7
4. Mir MA, Hussain A, Verma C. Design considerations and operational performance of anaerobic digester: A review. *Cogent Engineering*. 2016;3: 1181-1196. DOI: 10.1080/23311916. 2016.1181696
5. Olumide Wesley Awe, Yaqian Zhao, Ange Nzihou, Doan Pham Minh, Nathalie Lyczko (2018). A Review of Biogas Utilisation, Purification and Upgrading Technologies, 2-5.
6. L. Yang, X. Ge, C. Wan, F. Yu, and Y. Li, 'Progress and perspectives in converting biogas to transportation fuels', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 40, pp. 1133–1152, Dec. 2014.
7. F. Bauer, C. Hulteberg, T. Persson, and D. Tamm, 'Biogas upgrading - Review of commercial technologies', 2013.
8. Sinnott, R. K. 2005. *Chemical Engineering Design: Chemical Engineering*. Butterworth-Heinemann
9. Molina, C.T., Bouallou, C., 9/15/2015. Assessment of different methods of CO<sub>2</sub> capture in post-combustion using ammonia as solvent. *J. Clean. Prod.* 103, 463e468.
10. Mao, X.Q., Zeng, A., Hu, T., Xing, Y.K., Zhou, J., Liu, Z.Y., 3/15/2014. Co-control of local air pollutants and CO<sub>2</sub> from the Chinese coal-fired power industry. *J. Clean. Prod.* 67, 220e227.
11. O.I. Maile, H. Tesfagiorgis, E. Muzenda (2017). The potency of monoethanolamine in biogas purification and upgrading. *South African journal of chemical engineering* 24 (2017) 122e127.
12. Li C, Liu G, Nges IA, Liu J. Enhanced biomethane production from *Miscanthus lutarioriparius* using steam explosion pretreatment. *Fuel*. 2016;179: 267-273. DOI: 10.1016/j.fuel.2016. 03.087
13. Al Seadi T, Rutz D, Prassl H, Köttner M, Finsterwalder T, Volk S, et al. *Biogas Handbook*. Esbjerg, Denmark: University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs Vej; 2008. pp. 9-10
14. Panwar NL, Kaushik SC, Kothari S. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011;15:1513-1524. DOI: 10.1016/j.rser.2010.11.037
15. Kuznetsov A.A. Raschetы osnovnykh protsessov y apparatov pererabotky uhlevodorodnykh hazov: Spravochnoe posobyе. / A.A. Kuznetsov, E.N. Sudakov // М.: «Химия», 183-224 pp.
16. Sokolov V.M. Apparatura mykrobiologicheskoi promyshlennosti / V.M. Sokolov, M.A. Yablokova.// L.: Mashynostroenye. Lenynhr. otd –e. 1988. –278 pp.
17. Semenova T.A. Ochystka tekhnologicheskyykh hazov /T. A. Semenova, Y.L. Leites, Yu. V. Akselrod, M. Y. Markyna, S. P. Serheev, E. N. Kharkovskaia – М.: «Химия», 1977. – 488 pp.
18. Barbotazhnyi absorber: pat. 2040957 RF: MPK V01D53/12 opubl. 09.08.1995
19. Absorber: pat. 98531 Ukraina: MPK V01D53/18 opubl. 27.04.2015

Стаття надійшла до редакції 02 червня 2021 року