

УДК 663.033

DOI: 10.32626/2308-5916.2021-22.39-49

О. В. Воробйова, аспірант,

К. В. Корнієнко,

М. В. Шафаренко

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут

імені Ігоря Сікорського», м. Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОГО РІВНЯ ШВИДКОСТІ ПЕРЕМІШУВАННЯ В БІОРЕАКТОРІ

Із розвитком індустріалізації та зростанням населення протягом останніх десятиліть призвели до екологічних порушень у стічних водах (СВ). У статті було зроблено класифікацію та порівняльна характеристика методів очистки СВ. Безпечна та економічно ефективна біологічна очистка є важливим питанням, що необхідно враховувати, особливо для галузей, які повинні знайти фінансово прийнятні методи очищення, щоб відповідати допустимим рівням скидання. Імобілізовані мікроорганізми на носіях мають більшу стійкість до токсичності та низького виходу мулу. З натурального матеріалу інертні носії не потребують складної експериментальної підготовки на більш ранній стадії. Технологію іммобілізованої мікробної деградації використовують переважно через її високу щільність мікроорганізмів, низький вихід мулу, більш стійкі до токсичності та безперервної роботи. Дослідження перемішування в біореакторі із використанням перемішуючих пристроїв є складним завданням через проблему отримання точної інформації про швидкість потоку та тиску, викликаною мішалкою.

Метою дослідження є визначення ефективного рівня швидкості перемішування у вигляді пропелерної трьохлопатевої мішалки для промислових біогазових реакторів. При вирішенні поставлених завдань застосовувались теоретичні розрахунки швидкості перемішування завдяки гідродинамічного розрахунку. Завдяки використанню 3D моделювання пакету програми SolidWorks досліджено ефективність рівня швидкості обертання мішалки за допомогою розподілу векторів швидкості потоків субстрату. Рівень швидкості з числом обертів $6,3 \text{ s}^{-1}$ для біореактора об'ємом 10 м^3 показало моделювання, що воно є ефективне. Завдяки комп'ютерному моделюванню є можливість досліджувати ефективність пе-

ремішування субстрату та допомоги при модернізації існуючих промислових очисних споруд.

Ключові слова: біореактор, іммобілізація, інертні носії, 3D моделювання, SolidWorks.

Вступ. Перед вибором методу очистки стічних вод, потрібно до уваги взяти ступінь виду забруднення, що визначається у відповідності з «Правилами охорони поверхневих вод від забруднення стічними водами» Постановою КМ N 748 (748-2013-п) від 07.08.2013 [1] і розраховується:

- за кількістю завислих речовин;
- за кількістю розчиненого кисню;
- за допустимою величиною біологічної потреби в ньому;
- за температурою водоймища;
- за гранично допустимою концентрацією шкідливих речовин;
- за зміною активної реакції води.

Також за правилами «Правилам охорони поверхневих вод від забруднення стічними водами» (№ 748 (748-2013-п) від 07.08.2013) [1].

Виробничі стічні води при скиданні їх у водовідвідну мережу не повинні:

- перевищувати витрати стічних вод і вміст завислих, спливаючих речовин, установлених для конкретного промислового підприємства;
- порушувати роботу мереж і споруд;
- містити речовини, які здатні засмічувати труби водовідвідних мереж або відкладатися на стінках труб (окалина, вапно, пісок, гіпс, металева стружка, та інші);
- виявляти руйнівну дію на матеріал труб і елементи очисних споруд;
- містити горючі домішки і розчинені газоподібні речовини, здатні утворювати вибухонебезпечні суміші у водовідвідних мережах і очисних спорудах;
- містити шкідливі речовини в концентраціях, що перешкоджають біологічному очищенню СВ або скиданню їх у водойму (з урахуванням ефективності очищення);
- мати температуру вище 40°C;
- мати рН за межами 6,5-9;
- містити небезпечні бактеріальні забруднюючі речовини;
- мати ХПК, що перевищує БПК_{повн} більш ніж у 1,5 рази.

Стічні води, які не задовольняють зазначеним вимогам, повинні підлягати очищенню за такими методами (рис. 1).

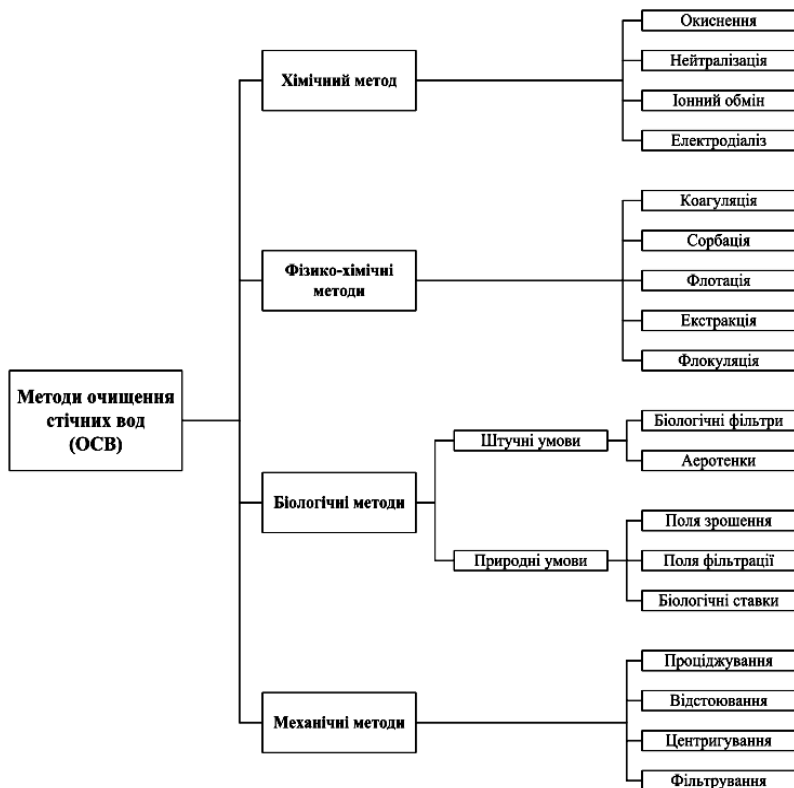


Рис. 1. Класифікація методів очищення СВ

У кожного із методів очистки СВ є свої переваги та недоліки які можна представити у порівняльній таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика методів очистки СВ [2-6]

№	Методи	Характеристика переваг та недоліків
1	Механічний	Очищення можна видалити із СВ нерозчинні мінеральні та органічні сполуки, суттєво знизивши їх концентрацію (залежно від виду стоків вдається «затримати» 65-95% нерозчинних забруднень). Механічні методи очищення СВ: фільтрація, відстоювання, гідроциклонування тощо. Недоліки таких підходів — слабкий вплив на відхилення показників якості води, які викликані розчинними забруднювачами (корегування рН, зміна сольового складу) та наявність елементів, які забиваються і потребують відновлення властивостей (фільтри)

Продовження таблиці 1

2	Фізико-хімічний	Інтенсивніші та ефективніші, ніж механічні, і використовуються для видалення тонкодисперсних, розчинених неорганічних і органічних речовин. Найбільш поширені сучасні методи очищення СВ, що відносяться до даної категорії: електрокоагуляція, електроліз, окислення, флокуляція, іонообмінний метод, коагуляція, сорбція. Висока ефективність — безперечну перевагу фізико-хімічних методів. Проте у таких підходів існують і недоліки: наприклад, великі енерговитрати (електроліз), висока вартість (флокуляція, сорбція) тощо.
3	Хімічний	Суть хімічних методів: у СВ додаються реагенти, які вступають у реакцію з різними видами забруднень утворюючи осад. До недоліків такого очищення можна віднести: висока вартість реагентів, погіршення якості очищеної води (вторинне забруднення) та накопичення небезпечних продуктів реакцій забруднювачів та реагентів
4	Біологічний	При використанні біологічного методу відбувається за рахунок бактерій, що здійснюють біологічне окислення. Хоча такі методи є ефективним для видалення органічних забруднювачів, однак, для підвищення їх інтенсивності потрібні значні енергозатрати при відносно низькому впливові на неорганічні забруднювачі. Проте його переваги перевищують недоліки, а саме: <ul style="list-style-type: none"> • можливість видалення зі СВ широкого спектра органічних забруднень; • самопідлаштування системи до зміни спектру і концентрацій органічних забруднень; • простота апаратного оформлення; • відносно невисокі експлуатаційні витрати

Враховуючи порівняльну характеристику більш детально розглянемо біологічний метод очистки СВ. Перевагами біологічного методу очищення є:

- повне аеробне біологічне очищення побутових і промислових стоків, при виконанні всіх технологічних вимог, здатна забезпечити видалення близько 90 відсотків органічних забруднень, що містяться у воді.
- біофільтри не втрачають ефективність при підвищенні концентрації забруднюючих речовин у рідині, крім того, втрачає актуальність питання утилізації зайвої кількості активного мулу.
- у разі анаеробного очищення — зменшення витрат на устаткування і супутніх експлуатаційних витрат, так як не потрібна штучна аерація води [7, 8].

Аналіз останніх досліджень. Біореактори можуть працювати в періодичному режимі, періодичному режимі з доливом субстрату, напівперіодичному та безперервному проточному режимах.

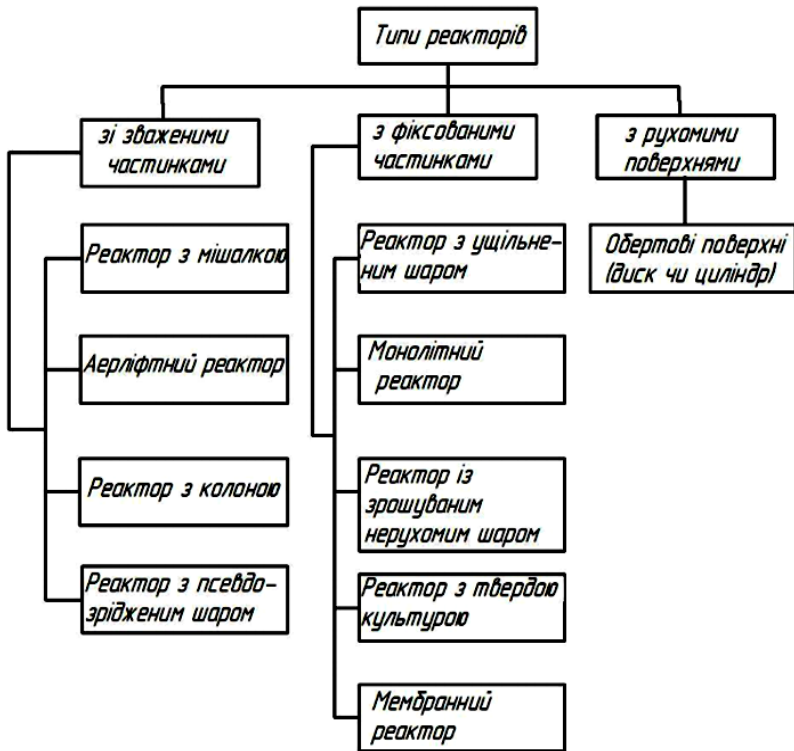
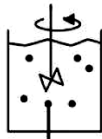


Рис. 2. Типи реакторів [9]

Технологія іммобілізованої мікробної деградації використовують переважно через її високу щільність мікроорганізмів, низький вихід мулу, більш стійкі до токсичності та безперервної роботи. Завдяки іммобілізації мікроорганізми фіксуються на носії для підтримки високої щільності та біологічно активної функції, а також абсорбуючись та розкладаючи органічні речовини сполуки у воді за відповідних умов [10]. Технологія іммобілізованої мікробної деградації також має переваги у збереженні домінуючих бактерій з високою ефективністю обробки, великою кількістю біомаси, стабільною роботою, легким розділенням твердих речовин і рідини, низькою ціною тощо, що має велике значення для дослідження при очищенні органічних СВ.

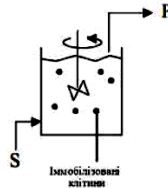
Основні види біореакторів з іммобілізованими клітинами (рис. 3).

Бioreктори з рухомим шаром іммобілізованих клітин



Іммобілізовані клітини

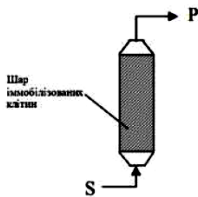
Періодичної дії



Іммобілізовані клітини

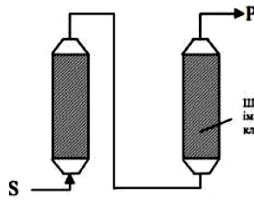
Проточний з перемішуванням

Бioreктори з нерухомим шаром іммобілізованих клітин

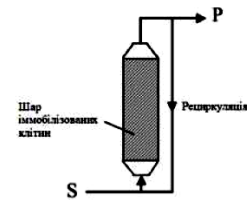


Шар іммобілізованих клітин

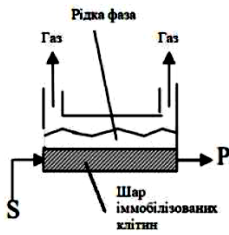
З нерухомим шаром (проточний)



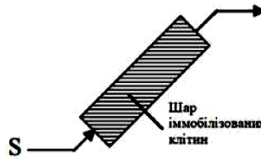
Серія реакторів із нерухомим шаром



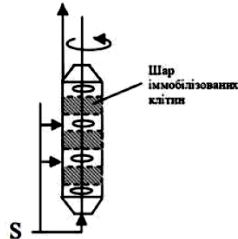
З рециклом



Горизонтальний із нерухомим шаром

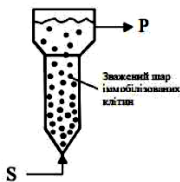


Похилий

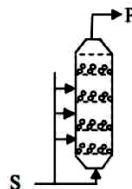


Секційний з нерухомим шаром

Бioreктори з зваженим шаром іммобілізованих клітин



Проточний із зваженим шаром



Секційний проточний із зваженим шаром

Рис. 3. Типи біореакторів з іммобілізованими клітинами

Хоча для кожного методу іммобілізації клітин є великий вибір різних типів реакторів, для оптимальної продуктивності необхідно ретельного

узгодити спосіб іммобілізації та конфігурації біореактора. Також потрібно узгодити конструкцію агрегату клітин та вибір умов в біореакторі.

Для ідеальної технології іммобілізованих мікроорганізмів вибір іммобілізованого носія є найважливішим особливо для створення високоефективного іммобілізованого реактора та високоефективних та інтенсивних і стійких мікроорганізмів. Важливо знайти іммобілізовані носії зі стабільною продуктивністю, хорошим масопередачею, високою інтенсивністю, тривалим терміном служби та низькою ціною [11]. До поширених носіїв для іммобілізації належать натуральні матеріали та синтезовані матеріали. Безсумнівно, що перший має переваги нижчої вартості, легко отримати та не потребує складної експериментальної підготовки на більш ранній стадії, що може бути широко використано у виробництві [12].

Дослідження перемішування в біореакторі із використанням перемішувачів пристроїв є складним завданням через проблему отримання точної інформації про швидкість потоку та тиску, викликану мішалкою. Метою роботи є дослідження ефективного рівня швидкості перемішування завдяки пропелерній трьохлопатевої мішалки для промислових біологічних реакторів об'ємом 10 м^3 .

Матеріал та результати дослідження. Для більш ефективного перемішування в біореакторах з іммобілізованими на інертних носіях мікроорганізмів була досліджена в програмі SolidWorks пропелерна трьохлопатева мішалка розміром $0,6 \text{ м}$ [14, с. 718-725], що забезпечує осові потоки (рис. 4).

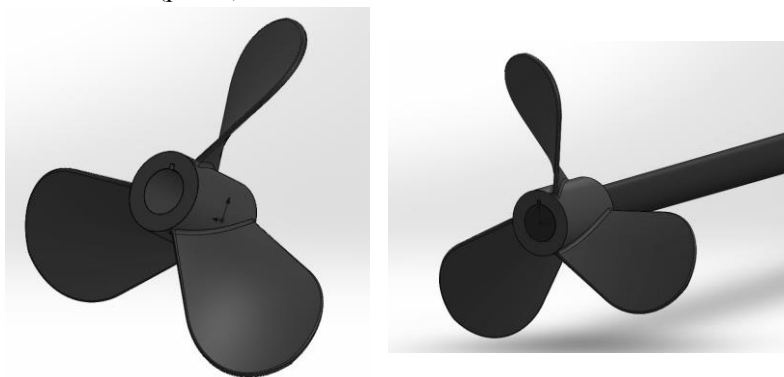


Рис. 4. Конструкція мішалки в програмі SolidWorks

Перед проведенням 3D моделювання у програмі необхідно зробити гідродинамічний розрахунок. Процес утворення біогазу відбувається в суспензії стічної води і інертного носія з біомасою. Спочатку розраховуємо критерії Архімеда [13]:

$$Ar = \frac{gd_n^3}{\nu_c^2} \cdot \frac{\rho_n - \rho_c}{\rho_c},$$

де d_n — діаметр частинки інертного носія з біомасою; $\nu_c = 0,705 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ — коефіцієнт кінематичної в'язкості СВ при температурі 37°С . ρ_n — густина частинки інертного носія з біомасою; $\rho_c = 993,2 \text{ кг/м}^3$ — густина СВ при температурі 37°С .

Умова утворення суспензії [13]:

$$S = \frac{n_0 d_M^2 \rho}{\mu} = 6,6 Ar \left(\frac{d_n}{d_M} \right)^{0,5} \frac{D}{d_M},$$

де n_0 — розрахункове число обертів перемішуючого пристрою; d_M — діаметр перемішуючого пристрою; D — внутрішній діаметр біореактора; ρ — густина суспензії; μ — коефіцієнт динамічної в'язкості суспензії

Тоді знаходимо розрахункове число обертів перемішуючого пристрою:

$$n_0 = \frac{S \mu}{d_M^2 \rho}.$$

Приймаємо стандартне число обертів ($6,3 \text{ с}^{-1}$) пропелерної мішалки та проводимо комп'ютерне 3D моделювання в SolidWorks. Задаємо параметри обертутрилопатевої мішалки, напрямку руху лопатей та область в якій буде проводитись розрахунок перемішування води (рис. 5).

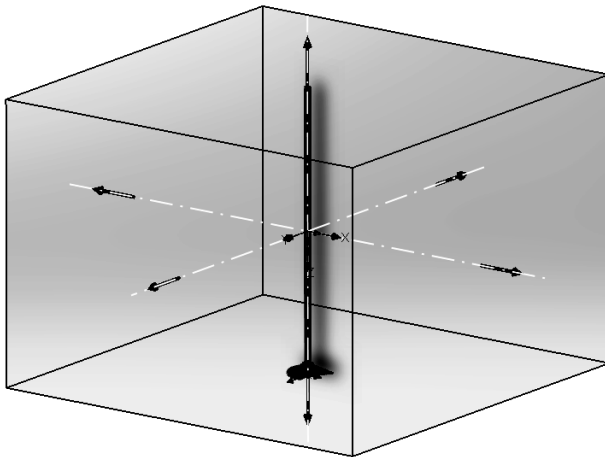


Рис. 5. Визначена область моделювання

Задавши параметри та швидкість мішалки, проводимо моделювання швидкості тиску суспензії (рис. 6) та траєкторії потоку суспензії (рис. 7-8).

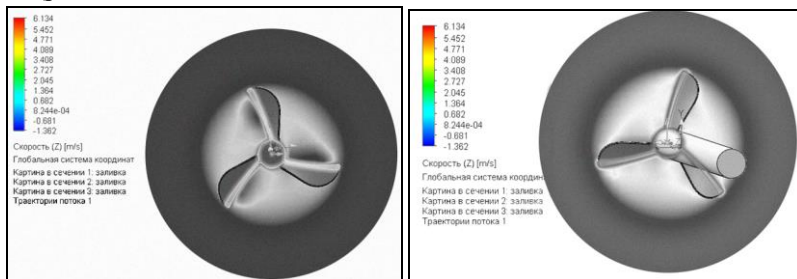


Рис. 6. Переріз швидкості тиску суспензії та напрямок частинок (вид спереду)

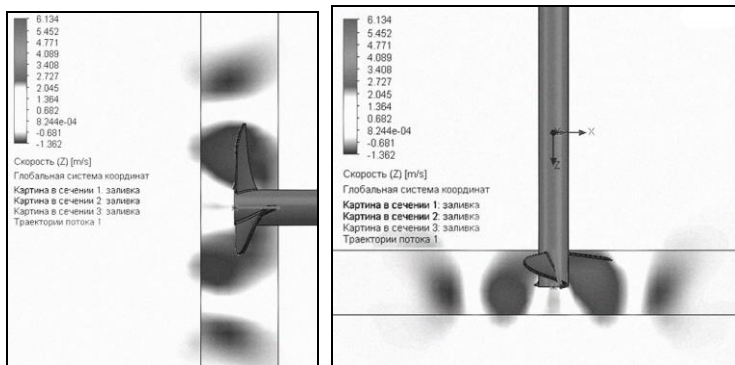


Рис. 7. Переріз швидкості тиску суспензії та напрямок частинок (вид зверху та праворуч)

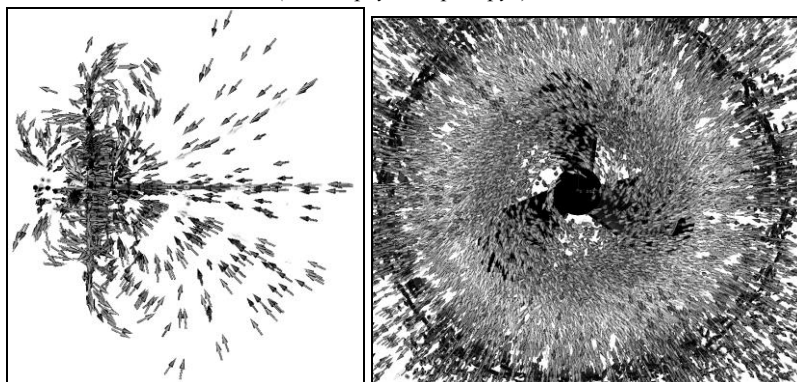


Рис. 8. Траєкторія потоку

Завдяки комп'ютерному моделюванню в пакеті програми SolidWorks можна стверджувати, що змодельована швидкість перемішування є достатньою в промислових біореакторах завдяки пропелерної трюхлопатевої мішалки.

Висновки. Сформовано класифікацію та порівняльну характеристику методів очистки стічної води. Біологічна очистка води є безпечною та економічно ефективною. Мікроорганізми, що закріплені на інертних носіях мають більшу стійкість до токсичних речовин, тому використання їх є перспективним в очисних спорудах. Перемішування в біореакторі із використанням перемішувачів є складним завданням через проблему отримання точної інформації про траєкторію руху потоку, тиску суспензії, через швидкість перемішування та напрямок інертних частинок, щоб вони не осідали на дні реактора. Запропоновано методику дослідження ефективності рівня швидкості перемішування в біореакторі завдяки пропелерної трюхлопатевої мішалки, яка може бути застосована для модернізації конструкції та перевірки перемішування субстрату в повному об'ємі реактора. Перед моделюванням було проведено теоретичні розрахунки швидкості обертання перемішувача, враховуючи умову утворення суспензії. В результаті 3D моделювання в SolidWorks було отримано траєкторії потоку, швидкості, тиску суспензії та напрямки частинок.

Список використаних джерел:

1. Правила охорони поверхневих вод від забруднення зворотними водами. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/465-99-%D0%BF#Text>.
2. Штепа В. М. Обґрунтування алгоритму експериментально-аналітичних досліджень режимів електротехнічної очистки стічних вод агропромислових об'єктів з метою побудови енергоефективних систем управління. *Енергетика і автоматика*. 2012. № 1 (11). URL: http://nbuv.gov.ua/jpdf/eia_2014_2_10.pdf.
3. Запольський А. К. Фізико-хімічні технології очищення стічних вод. Київ: Вища школа, 2005. 671 с.
4. Мазоренко Д. І., Цапко В. Г., Гончаров Ф. І. Інженерна екологія сільськогосподарського виробництва. Київ: Знання, 2006. 376 с.
5. Экологическая биотехнология. Пер. с англ. / под ред. К. Ф. Форстера, Д. А. Дж. Вейза. Ленинград: Химия, 1990. Пер. изд.: Великобритания, 1987. 384 с.: ил. ISBN 5-7245-0418-9
6. Яковлев С. В., Скирдов И. В., Швецов В. Н. Биологическая очистка сточных вод: Процессы, аппараты и сооружения. 1985. 208 с.
7. Хижняк О. О. Проблема знезаражування природної води. *Наукові вісті*. 2007. № 5. С. 129-135.
8. Проблеми комплексного керування міським середовищем. Львів, 2005. 212 с.
9. Мельник В. М., Ружинська Л. І., Воробйова О. В. Аналіз існуючих біореакторів з іммобілізованими мікроорганізмами. *Комунальне господарство міст*. 2019. № 3 (149). С. 51-57. DOI 10.33042/2522-1809-2019-3-149-51-57. URL: <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/issue/view/118>.

10. Rao J. R., Viraraghavan T. Biosorption of phenol from an aqueous solution by *Aspergillus niger* biomass. *Bioresource Technology*. 2002. Vol. 85 (2). P. 165-171. DOI: 10.1016/S0960-8524(02)00079-2.
11. Vázquez G., Alonso R., Freire S., González-Álvarez J., Antorrena G. Uptake of phenol from aqueous solutions by adsorption in a *Pinus pinaster* bark packed bed. *Journal of Hazardous Materials*. 2006. Vol. 133 (1-3). P. 61-67. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2004.12.041.
12. Shen J., Duvnjak Z. Adsorption isotherms for cupric and cadmium ions on corn cob particles. *Separation Science and Technology*. 2005. Vol. 40 (7). P. 1461-1481. DOI: 10.1081/SS-200053319.
13. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Москва: Химия, 1973. 754 с.
14. Лащинский А. А., Толчинский А. Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры: Справочник. 2-е изд. Ленинград: Машиностроение, 1970. 752 с.

STUDY OF THE EFFECTIVE LEVEL OF STIRRING SPEED IN A BIOREACTOR

With the development of industrialization and population growth in recent decades have led to environmental disruptions in wastewater. The classification and comparative characteristics of wastewater treatment methods were made in the article. Safe and cost-effective biological treatment is an important issue to consider, especially for industries that need to find cost-effective treatment methods to meet acceptable discharge levels. Immobilized microorganisms on carriers have greater resistance to toxicity and low sludge yield. Made of natural material, inert carriers do not require complex experimental preparation at an earlier stage. The technology of immobilized microbial degradation is used mainly due to its high density of microorganisms, low sludge yield, more resistant to toxicity and continuous operation. The study of mixing in a bioreactor using mixing devices is a difficult task due to the problem of obtaining accurate information about the flow rate and pressure caused by the stirrer.

The aim of the study is to determine the effective level of mixing speed in the form of a three-bladed propeller stirrer for industrial biogas reactors. Theoretical calculations of the mixing speed due to hydrodynamic calculation were used in solving the tasks. Using 3D modeling of the SolidWorks package, the efficiency of the stirrer speed level was investigated by distributing the velocity vectors of the substrate flows. The speed level with a speed of 6.3 s^{-1} for a bioreactor with a volume of 10 m^3 showed that the simulation is effective. Computer simulations make it possible to investigate the mixing efficiency of the substrate and to help with the modernization of existing industrial treatment plants.

Key words: *bioreactor, immobilization, inert carriers, 3D modeling, SolidWorks.*

Отримано: 29.10.2021