

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ВИХОДУ БІОМАСИ МІКРОВОДОРОСТЕЙ

Григор'єв Р.В., Строганов О.О., Кузь О.П.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

rv.hryhoriev@gmail.com, alexey8k@gmail.com, a.kuz@kpi.ua.

Вступ. Мікрородорості (переважно ціанобактерії) – прокаріотичні, фотосинтетичні організми, які мають високу перспективу стати альтернативним відновлювальним джерелом енергії до нафти та інших відновлювальних джерел, як біоетанол, який виробляють з рослинних культур, які мають вживатися в їжу. Протягом останніх років були зроблені вагомі досягнення як у створенні нових штамів мікрородоростей, так і у побудові й проектуванні нових моделей фотобіореакторів (скорочено – ФБР), які спрямовані на досягнення високого виходу біомаси мікрородоростей дешевим та екологічним шляхом.

Але, досі існує проблема точного розрахунку виходу біомаси на лабораторному та промисловому масштабах, що ускладнює перевірку надійності та перспективності нових винаходів. Можливим вирішенням цієї проблеми є моделювання процесу росту мікрородоростей, яке базується на теоретичних основах гідродинаміки, термодинаміки, атомної та молекулярної фізики й інших дисциплін [1-5].

Метою цієї роботи є огляд досліджень і методів, розроблених саме для проведення розрахунків для такого масштабування.

Матеріали та методи. У роботі було проведено огляд трьох методів, які створені для розрахунку виходу біомаси мікрородоростей за заданих параметрів. Для визначення їх відмінності та особливості було зроблено порівняльний аналіз, який дав змогу визначити їх обмеження, переваги та недоліки.

Для проведення порівняльного аналізу методів були обрані такі фактори:

1. Тип фотобіореактора.
2. Штам ціанобактерій.
3. Тип метода.
4. Порівняння з дослідями.
5. Особливість методу.

Для нашого дослідження було обрано три методи (табл. 1), оскільки вони дають змогу легко визначити їх відмінності та з'ясувати особливості кожного підходу для розрахунку виходу біомаси.

Результати та обговорення. Нами було проведено порівняльний аналіз обраних методів, результати якого показано у таблиці 1.

Метод, розроблений Alexandra D. Holland та Joseph M. Dragavon [1] (перший метод), дає змогу теоретично розрахувати оптимальний ріст мікрородоростей (або вихід біомаси) за такими характеристиками середовища, як швидкість потоку, концентрація біомаси, необхідна кількість вуглекислого газу й нутрієнтів, інтенсивність світла (для спектра 400-700 нм) та специфічні характеристики штаму мікрородоростей для ФБР пластинчатого типу. Цей метод може використовуватися для багатьох штамів мікрородоростей, але в роботі

більшість обчислень проводили зі штамом ціанобактерій *Dunaliella tertiolecta*. Даний метод не потребує виконання симуляції процесів, розрахунки проводять вручну або з використанням комп'ютера. Порівняння з експериментальними даними відсутнє.

Таблиця 1. Особливості авторських методів розрахунку виходу біомаси мікробіодоростей згідно з вибраними факторами.

Фактори порівняння	Перший метод [1]	Другий метод [2]	Третій метод [3]
Тип ФБР:	Пластинчатий	Пластинчатий	Кільцеподібний з внутрішнім освітленням
Штам мікробіодоростей:	<i>Dunaliella tertiolecta</i>	<i>Synechocystis sp. PCC 6803</i>	<i>Nannochloropsis salina</i>
Тип метода:	Системи рівнянь та алгоритми.	Симуляція складної (тривимірної) моделі	Симуляція для спрощеної (двовимірної) моделі.
Порівняння з дослідженнями:	Відсутні	Результати збігаються (Висока точність)	Результати збігаються (Достатня точність)
Особливість методу:	Комп'ютерна симуляція відсутня.	Необхідно калібрування моделі. Універсальний метод.	Модель розрахована лише на один тип ФБР.
Автори:	<i>Alexandra D. Holland та Joseph M. Dragavon</i>	<i>Nicolò S. Vasile та інші</i>	<i>Yuswan Muharam та інші</i>

У дослідженні Nicolò S. Vasile та інших [2] було побудовано тривимірну модель ФБР у програмі Comsol®, для проведення симуляції з урахуванням неоднорідності середовища, нелінійного поширення світла, гідродинаміки та інших факторів (другий метод). Перевага цього методу полягає у можливості зосередитися на простих для визначення параметрів, таких як кількість вуглекислого газу, інтенсивність джерела світла або швидкість потоку середовища, та залишити обчислення складних процесів системи програмним засобам. Завдяки такому розподілу задач розробка нових систем та ФБР спрощується, що може прискорити розвиток даної технології. Цей метод показує високу точність та правдивість розрахунків, що можна побачити у разі їх порівняння з експериментальними даними. Дослідження проводили на ціанобактеріях штаму *Synechocystis sp. PCC 6803* у пластинчатому ФБР. Недоліком методу може бути потреба у коштовному комп'ютерному обладнанні, яке складно отримати бюджетним проектам.

Yuswan Muharam та інші [3] розробили двовимірну модель кільцеподібного ФБР з внутрішнім освітленням (рис. 1), в який поступає суміш газів (азот (N₂) та вуглекислий газ (CO₂)) з певною швидкістю (третій метод). З метою визначення залежності швидкості потоку вуглекислого газу та його відповідної концентрації у потоці від росту мікробіодоростей інші параметри залишаються сталими. Після

проведення симуляцій та дослідів за заданих умов, дослідники дійшли висновку, що результати проведених симуляцій збігаються з експериментальними даними, похибка складає від 4% до 5%. Вчені визначили, що швидкість потоку майже не впливає на ріст мікроводоростей. У дослідженні використовували ціанобактерії штаму *Nannochloropsis salina*. Особливо корисним метод може бути для роботи з мікроводоростями в ФБР саме такого типу в лабораторних масштабах, в промислових масштабах метод не практичний.

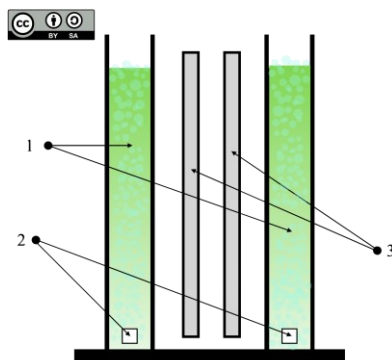


Рис. 1. Зображення поперечного перерізу кільцеподібного ФБР:
1 – середовище культури мікроводоростей; 2 – місця виходу потоку газу (суміш N₂ та CO₂); 3 – джерела світла. (Наведене зображення було зроблено за допомогою матеріалу Muharam Y. та інших [3])

Висновки. У даній роботі було проведено порівняльний аналіз трьох методів моделювання виходу біомаси, визначено їх особливості, переваги та недоліки.

Зазначимо, що дані методи більше зосереджені для проведення розрахунків у лабораторіях, адже вони використовуються для дослідження систем, що знаходяться на етапі вдосконалення ФБР та штамів мікроводоростей, але, в загальному випадку, такі методи мають потенціал для подальшого застосування в майбутніх проєктах більшого масштабу.

Список використаної літератури:

1. Holland A. D., Dragavon J. M. Algal reactor design based on comprehensive modeling of light and mixing. *Algal Biorefineries: Cultivation of Cells and Products*. 2014. Vol. 1, P. 25-68.
2. Vasile N. S., Cordara A., Usai G., Re A. Computational analysis of dynamic light exposure of unicellular algal cells in a flat-panel photobioreactor to support light-induced CO₂ bioprocess development. *Frontiers in Microbiology*. 2021. No 12. P. 639482.
3. Muharam Y., Pramadana A. B., Wirya A. S. Modelling and simulation of a bubble column photobioreactor for the cultivation of microalgae *Nannochloropsis salina*. *Chemical Engineering Transactions*. 2017. No 56. P. 1555-1560.
4. Luzzi G., McHardy C. Modeling and Simulation of Photobioreactors with Computational Fluid Dynamics — A Comprehensive Review. *Energies*. 2022; 15(11):3966.
5. Mink A., et al. Comprehensive Computational Model for Coupled Fluid Flow, Mass Transfer, and Light Supply in Tubular Photobioreactors Equipped with Glass Sponges. *Energies*. 2022; 15(20):7671.