

УДК 579.22, 576.8, 536+621.36](06)(082)

ТЕПЛО- ТА МАСООБМІН В АПАРАТАХ ОТРИМАННЯ БІЛКА НА ОСНОВІ ВОДЕНЬОКИСЛЮЮЧИХ БАКТЕРІЙ

Трошенькін Б.О.¹, д.т.н., Кравченко О.В.², чл.-кор. НАН України, Трошенькін В.Б.,³ к.т.н.

*Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України
вул. Комунальників, 2/10, м. Харків, 61046*

¹Трошенькін Б.О., д.т.н., проф, ORCID 0000-0003-1505-4717;

²Кравченко О.В., чл.-кор. НАН України, зав. відділу комплексних енерготехнологій,
e-mail: krav@ipmach.kharkov.ua, ORCID 0000-0003-0048-6744;

³Трошенькін В.Б., ст.н.с., к.т.н., тел. 067-7955267, e-mail: troshenkinv@gmail.com, ORCID 0000-0001-9661-9489

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2026.5>

Розглянуто сучасний стан робіт з одержання білка на основі воденьокислюючих бактерій. Для виявлення недоліків апаратурного оформлення процесу вирощування біомаси створено експериментальну установку та проведено низку досліджень. Результати зіставлені за наявними даними. Рекомендовано замість ферментерів з мішалками застосовувати плівкові апарати. Складено послідовність розрахунку тепломасообміну в плівковому апараті. Наведено економічні та екологічні переваги промислового виробництва білка порівняно з сільськогосподарським.

The current state of works on protein production based on hydrogen-oxidizing bacteria are considered. To identify the shortcomings of the hardware design of the biomass cultivation process an experimental installation was created and a number of studies were conducted. The results were compared with known data. It is recommended to use film apparatus instead of fermenters with mixers. A sequences of calculations of heat and mass transfer in a film apparatus is developed. The economic and environmental advantages of industrial protein production compared to agricultural production are presented.

Бібл. 17, рис. 3.

Ключові слова: водень, воденьокислюючі бактерії, білок, тепломасообмін, економічні та екологічні переваги, біореактор.

Вступ. Водневі бактерії є мікроорганізмами, що використовують енергію окислення водню для утилізації вуглекислого газу з утворенням високоживильної біомаси.

Практичний інтерес до цих бактерій виник через можливість їх використання для харчування космонавтів при тривалих польотах.

Але в даний час зростання попиту у світовій економіці на продовольство призвело до збільшення навантаження на земельні та водні ресурси. Також збільшилося навантаження на традиційні види копалин, що використовуються безпосередньо для вироблення електроенергії і палив для вирощування, транспортування та переробки сільськогосподарських культур.

Розгортання виробництва білка на основі водневих бактерій дозволяє пом'якшити ці навантаження та скоротити викид парникових газів у навколишнє середовище.

Зазначені обставини сприяли активізації робіт з удосконалення технології отримання білка [1-5].

Позитивним чинником стало також створення процесів одержання водню з низькою вартістю. Наприклад, нетрадиційна технологія електролізу вугільної пульпи дає можливість знизити вартість водню на 50 % порівняно з вартістю водню, одержуваного електролізом води [6].

Мета та завдання дослідження. Вирішення проблеми отримання білка наразі знаходиться на стадії завершення лабораторних досліджень та попереднього ескізного опрацювання конструкції дослідно-промислового біореактора.

У ході цього дослідження ставили завдання перевірити надійність окремих вузлів та всієї системи в цілому. Мета – виявити недоліки апаратурного оформлення процесу та надати рекомендації з їх усунення у дослідно-промисловій установці.

Друге завдання полягало у визначенні можливості використання у дослідах водню, що отримується при взаємодії сплавів алюмінію та кремнію з водою. Це найпростіший спосіб виробництва водню в автономних умовах, у т. ч. у космосі.

Експериментальна частина. У вивченні біосинтезу на основі водородокислюючих бактерій беруть участь багато наукових колективів. За їх даними харчування бактерій у ферментері забезпечується за принципом збалансованих середовищ, згідно з яким співвідношення середовищ, що подаються в біореактор, копіює співвідношення компонентів у біомасі. Зокрема, у структурі газового живлення дотримується співвідношення (% об'ємн.): $H_2 - 68,2 \pm 2$: $O_2 - 21 \pm 1$: $CO_2 - 11 \pm 1$. Інші речовини подавали в реактор у вигляді водного розчину сполук азоту, фосфору, сірки, хлору, калію, натрію, магнію, кальцію, заліза (розчин Шлегеля).

Мікроелементи, що додаються до розчину, містили: нікель, кобальт, мідь, цинк, марганець, молібден, бор (склад Хогланда). Необхідність в елементах живильного середовища (грами, на один грам біомаси): азот – 120 ± 5 , фосфор – $17,8 \pm 1$, сірка – $5,2 \pm 0,3$, калій – $4,1 \pm 0,2$, магній – $4,3 \pm 0,4$.

У широких межах концентрацій азоту, фосфору, сірки, калію та магнію у навколклітинному середовищі швидкість зростання бактерій не змінюється.

На основі консультацій з провідними мікробіологічними організаціями було створено стенд, керування процесом у якому здійснювалось в автоматичному режимі (рис. 1).

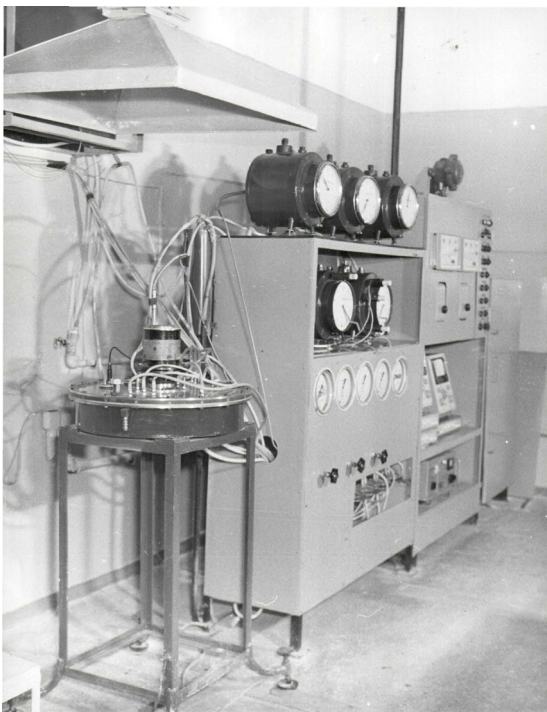


Рис. 1. Мікробіологічний стенд з пультом керування
Fig. 1. Microbiological stand with control panel

У центрі знімка розташовано ферментер, об'єм якого становить 15 л (робочий об'єм культуральної рідини 10 л). Ферментер складається з металевого корпусу з оболонкою для охолодження, верхньою прозорою кришкою з оргскла, вузла диспергування газів і розподілу газорідної суміші по всьому об'єму ферментера, електродвигуна для приводу насоса, елементів для під'єднання газового та мінерального живлення, охолодження, рециркуляції та керування.

Вузол диспергування газів є комбінацією відцентрового насоса і соплових насадок. Культуральна рідина викидається із соплових насадок у розширювальні трубки, при цьому використовується ефект ежекційного підсмоктування газової фази, що приводить до інтенсивного насичення рідини газами.

Перед початком роботи у ферментер заливають воду, частину поживного розчину солей та необхідну кількість культури мікроорганізмів. Потім включають насос ферментера для перемішування середовища та подають суміш газів, яку готують у такий спосіб. Гази з балонів через систему редукторів, клапанів і лічильників подають для змішування у компактну ємність з пружного матеріалу. Керування відкриттям та закриттям вхідних клапанів у ємність здійснюють лічильниками, на кожному з яких встановлені вимикачі таким чином, щоб час відкриття клапанів відповідав заданому співвідношенню газів, що проходять через них, за один оберт стрілки.

У результаті в ємність надходять водень, кисень і вуглекислий газ необхідної пропорції. При наповненні газами еластична ємність збільшується у розмірах, що приводить до спрацьовування вимикачів та припинення надходження газів у ємність. Потім з еластичної ємності суміш газів через додатковий лічильник направляють у ферментер.

Залежно від кількості газів, що надійшли в ферментер, від додаткового газового лічильника йде сигнал на пульт керування, який відкриває відповідні клапани для подачі в ферментер пропорційної кількості розчину мінеральних солей.

Після підйому температури середовища до $30 \pm 1^\circ C$ у оболонку ферментера направляють холодну воду. Температура підтримується постійною в заданому режимі терморегулятором.

У міру зростання біомаси еластична ємність випорожнюється, її об'єм скорочується і знову включаються газові лічильники. Цикл заповнення повторюється у тій самій послідовності.

У працюючій установці в ферментері може відбуватися нерівномірне споживання водню, кис-

ню чи вуглекислого газу мікроорганізмами, через що порушується оптимальне співвідношення газів. Для підтримки в ферментері заданого складу газової фази передбачена система титрування.

Система дозволяє за показаннями датчиків, встановлених у ферментері, визначати співвідношення газів, що надійшли. При нестачі відновлювального середовища сигнал від датчика надходить у систему автоматичного підживлення необхідною кількістю водню. Інший датчик у такий же спосіб фіксує недолік окисного середовища, що також в автоматичному режимі дозволяє подати у ферментер кисень.

Кислотність вимірюють окремо рН-метром, який через блок автоматичного титрування (БАТ-15) фіксує задану рН середовища та подає сигнал на відкриття клапана для дозування аміаку.

Для забезпечення часткової або повної зміни газової фази передбачено систему продування газової порожнини. У процесі зростання біомаси підвищується її концентрація у суспензії. Вимірювання концентрації культуральної рідини в ферментері здійснюють методом пропорційних відхилень, що полягає у вимірі відношення двох світлових потоків, повного та пропущеного через середовище, що вимірюється. Коефіцієнт пропускання вимірюваного середовища, що є відношенням інтенсивності цих потоків, визначають у вигляді відношення відповідних фотострумів безпосередньо за шкалою мікроамперметра. Таким чином, показання мікроамперметра дозволяють знайти коефіцієнт і по ньому концентрацію суспензії, використовуючи відповідні таблиці тарування.

Залежно від концентрації біомаси в суспензії здійснюється дозований злив та долив еквівалентної кількості розчину мінеральних солей.

Для цього застосовують мембранні дозатори. Потім суспензію вручну заливають в електросепаратор Сатурн-2, сепарують, після чого вологу біомасу переводять в сушильну шафу «Снол», висушують і відправляють в холодильник.

Результати дослідження. Достовірність одержуваних результатів визначали шляхом порівняння з опублікованими даними рис. 2 [7].

Як бачимо, за оптимальних умов швидкість біосинтезу дорівнює $\mu = 0,39 \text{ год}^{-1}$. При цьому температура середовища підтримували на рівні $30 \text{ }^\circ\text{C}$ і злив суспензії проводили з концентрацією абсолютно сухих речовин $x = 3,7 \text{ г/л}$.

В основній частині цієї роботи ферментер подавали водень, отриманий електролізом води. У цьому випадку, при підвищенні концентрації суспензії з $0,8 \text{ г/л}$

до $6,0 \text{ г/л}$, швидкість процесу становила $0,35 \text{ год}^{-1}$. При переході на водень, що отримується шляхом взаємодії з водою алюмінію, активованого індієм, галієм, оловом (по 5% кожного елемента), швидкість процесу становила $0,3 \text{ год}^{-1}$ і концентрація - $6,0 \text{ г/л}$. При збільшенні концентрації до 10 г/л спостерігали зниження швидкості до $0,25 \text{ год}^{-1}$.

У період живлення бактерій воднем від реакції сплаву феросиліція з водним розчином лугу швидкість процесу не перевищувала $0,15 \text{ год}^{-1}$ (при $x = 10 \text{ г/л}$).

Слід зазначити, що у разі малих концентрацій біомаса подвоюється кожні $1,5\text{--}2$ години, тоді як за $x = 6\text{--}10 \text{ г/л}$ – через $3\text{--}4$ год.

Ці результати підтверджено попередніми дослідженнями з залученням фахівців в галузі мікробіології.

Необхідно враховувати, що кожні $0,6 \text{ г}$ водню дозволяють отримати 1 г біомаси. Питома калорійність біомаси становить середньому 22175 кДж/кг .

У процесі синтезу бактерії засвоюють $24,5 \%$ енергії окиснення водню. Решта енергії окиснення відводиться у довкілля як тепло. Остаточну оцінку ефективності роботи дослідної установки можна отримати лише після вивчення якості біомаси.

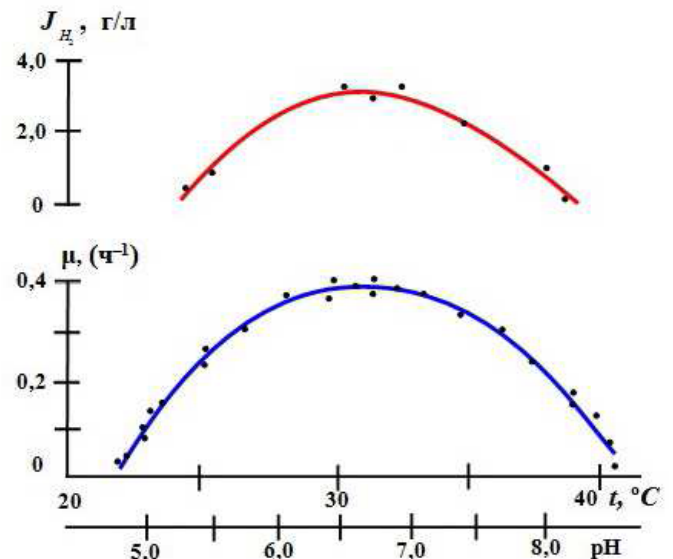


Рис. 2. Залежність економічного коефіцієнта J по водню та швидкості росту μ водневоокислюючих бактерій від температури та рН навколоклітинного середовища

Fig. 2. Dependence of the economic coefficient J for hydrogen and the growth rate μ of hydrogen-oxidizing bacteria on the temperature and pH of the pericellular environment

Спільно з фахівцями Харківського науково-дослідного інституту мікробіології і імунології ім. І.І. Мечнікова було встановлено, що у процесі безперервного культивування синтез білка бактерією *Alkaligenes eutropha* Z1 стабільний і становить 72-74 %, що відповідає літературним даним. Вміст ліпідних, вуглеводних компонентів та нуклеїнових кислот у біомасі в межах норми. Наявність у біомасі інших видів відповідає допустимому рівню.

Проте, можна вважати доведеним, що окремі вузли та вся система загалом працюють цілком надійно.

Тим не менш, виявлено, що апаратне оформлення установки має низку недоліків.

Відомо, що водневі бактерії виділяють з безлічі різних субстратів: ґрунту, озерної та річкової води, піску, мулів, гірських порід. Однак, слід зазначити, що в жодному з таких субстратів немає високих гідродинамічних навантажень як у випробуваному апараті з числом обертів насоса для перемішування 2960 об/хв. Така висока швидкість перемішування викликана слабкою розчинністю водню у водному середовищі та обмеженістю теплообміну через малу поверхню кожуха апарата.

Доцільно розчиняти водень окремо від інших газів. Перевага такого роздільного подання кисню та водню в біореактор полягає у забезпеченні вибухобезпечного процесу [8]. З перерахованих причин апаратне оформлення установки потребує деяких змін.

Під час досліджень разом з фахівцями в галузі мікробіології відзначено, що в аналогічному виробництві білка дріжджовим способом ємнісні ферментери з інтенсивним перемішуванням зазнають значних вібрацій, що призводять до їх передчасного зносу.

Враховуючи ресурс і металомісткість обладнання як біореактори запропоновано приймати стандартні апарати зі стікаючою плівкою (рис. 3).

Апарат складається з розподільного пристрою, пучка вертикальних труб та сепаратора. При роботі апарата розчин солей потрапляє до розподільного пристрою і далі розподіляється за перерізом апарату. Циліндричні вставки в кожній трубці дозволяють розподілити розчин у вигляді плівки на внутрішній поверхні труб. Залежно від заданих умов плівка може стікати в ламінарному або турбулентному режимі. Тепло, що виділяється під час реакції, відводиться від зовнішньої поверхні труб холодною водою, яка подається в міжтрубний простір. Розчин стікає у сепаратор, де відокремлюється від газів.

Апарат має два циркуляційні контури. Один – для газів, інший – для розчину. Крім того, при ферментері розташовано апарат інтенсивного перемішування для розчинення водню в культуральній рідині.

Особливості тепло- та масообміну у ферментерах. Фактично мікробіологічний процес можна розглядати як макрореакцію, на швидкість якої впливають чинники довкілля: температура, рН, концентрації

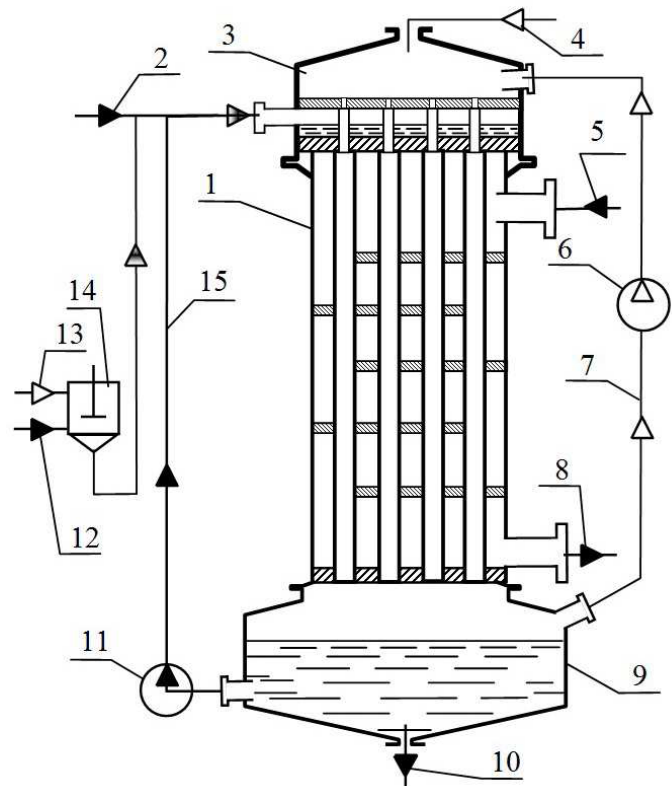


Рис. 3. Схема плівкового апарата

- 1 - корпус апарата 2 - вхід культуральної рідини,
3 - розподільна камера, 4 - вхід газів O_2 та CO_2 ,
5, 8 - вхід та вихід охолоджувальної води,
6 - газодувка, 7 - трубопровід для циркуляції газів,
9 - сепаратор, 10 - злив біомаси, 11 - відцентровий насос, 12 - вхід культуральної рідини, 13 - вхід водню,
14 - мішалка для розчинення водню,
15 - трубопровід для циркуляції суспензії

Fig. 3. Film apparatus diagram

- 1 - apparatus body, 2 - cultural liquid inlet,
3 - distribution chamber, 4 - O_2 and CO_2 gas inlet,
5, 8 - cooling water inlet and outlet, 6 - gas blower,
7 - gas circulation pipeline, 9 - separator,
10 - biomass drain, 11 - centrifugal pump,
12 - cultural liquid inlet, 13 - hydrogen inlet,
14 - stirrer for dissolving hydrogen,
15 - suspension circulation pipeline

субстратів: біомаси, продуктів метаболізму, включаючи розчинені у рідині газу.

При цьому допущенні рівняння кінетики макрореакції повинні включати, зокрема, рівняння масообміну, теплообміну та тепловий баланс.

При автоматичному регулюванні процесу на заданому рівні відпадає необхідність у цих рівняннях, але у цьому разі температура є вхідним параметром для кінетичних рівнянь.

Дотримання цього принципу важливе лише під час проведення експериментальних робіт. Але без попереднього розрахунку тепло- масообміну неможливо вибрати тип апарата та оцінити його продуктивність. Підтримка процесу ферментації на заданому рівні режимних параметрів визначається головним чином, умовами тепло- та масообміну між фазами. У свою чергу швидкість цього процесу залежить від величини поверхні контакту фаз.

Однак при перемішуванні двофазної та трифазної суміші будь-яким способом, наприклад мішалками або застосуванням барботажу, величина міжфазної поверхні залишається невідомою.

Розрахунок масообміну в апаратах з мішалками заснований на припущенні, що рідина є деяким скупченням «рідких частинок», розмір яких можна порівняти з найменшим масштабом турбулентних пульсацій λ_0 , що виражається рівнянням:

$$\lambda_0 = v^3/\rho^3\varepsilon,$$

де v - кінематична в'язкість рідини, ρ - густина рідини, ε - дисипація енергії на одиницю маси суспензії (визначається за витратами енергії мішалкою).

«Рідкі частинки» є по суті агломератом, розмір якого залежить від умов перемішування (через дисипацію енергії і пов'язаний з нею внутрішній масштаб турбулентності λ_0). Після врахування нерівномірності турбулентності робочого об'єму апарата отримують ряд емпіричних і напівемпіричних формул для визначення інтенсивності масообміну. На жаль, цей розрахунок дає вкрай наближені результати [9].

Підвищити точність розрахунків вдається лише при заміні апарата з мішалкою на плівковий апарат. У стандартних плівкових апаратах відомі геометричні розміри труб тепломасообміну, а також характер їх розташування в трубних решітках [10].

Ця обставина дає можливість визначити інтенсивність теплообміну залежностями безрозмірних чисел Нуссельта від чисел Рейнольдса і Прандтля [11]. При цьому в процесі тепловіддачі від плівки, що розігрівається

за рахунок біореакції, до стінки труб, що охолоджують, необхідно застосовувати модернізоване число Нуссельта в залежності від числа Рейнольдса, в якому як визначальний розмір прийнята товщина плівки, що стікає.

Слід також враховувати, що за вмістом біомаси в мінеральному розчині в межах 1–3 г/л теплофізичні властивості культуральної рідини мало відрізняються від властивостей води. Але з підвищенням концентрації необхідно враховувати зростання в'язкості.

У цій стадії розрахунків виникли певні труднощі. Відсутність у літературі відомостей про теплофізичні характеристики досліджуваної культуральної рідини свідчить, що мікробіологи недооцінюють значення інженерних проблем. У ситуації, що склалася, довелося за вимірюваною густиною культуральної рідини підбирати молочні вершки з аналогічною щільністю, що дозволило скористатися довідковими даними [12].

Тепловіддача у міжтрубному просторі також підпорядковується аналогії Рейнольдса. Потік води омиває трубний пучок у поперечному напрямку, що забезпечується відповідним розташуванням перегородок у міжтрубному просторі. Характер розташування труб у трубних решітках враховують введенням у рівняння коефіцієнта, що є відношенням відстаней між трубами по перерізу апарата в поперечному напрямку до поздовжнього [13].

Коефіцієнти тепловіддачі від плівки до стінки труб у 2-3 рази вищі, ніж від стінки до холодної води. Ця обставина приводить при тому ж самому питомому тепловому потоці до значень температурних напорів із зовнішнього боку, що в 2-3 рази перевищує значення з внутрішньої сторони труб.

Передбачалося, що перша дослідно-промислова установка матиме продуктивність біомаси 10000 т/рік. Зважаючи на те, що на 1 кг біомаси необхідно 0,6 кг водню, то на рік потрібно розчинити 6000 т водню. Отже, за годину потрібно розчинити 685 кг водню. Але 24,5 % теплоти окиснення водню використовують мікроби. Звідси 75,5 % енергії окиснення необхідно відвести у довкілля. Це, загалом, становить енергію теплоти $0,755 \cdot 685 = 517$ кг водню. Теплота окиснення водню знаходиться в межах 142 МДж/кг. Простий розрахунок показує, що за годину необхідно відвести $Q = 73,438 \cdot 10^9$ Дж (або $204,16 \cdot 10^5$ Вт·год). При питомому тепловому навантаженні $q = 30000$ Вт/м² поверхня апарата складе:

$$F = Q/q = 680 \text{ м}^2.$$

Сучасні промислові плівкові апарати мають площу поверхні теплообміну близько 620 м².

Далі необхідно перевірити, чи достатньо цієї поверхні для забезпечення масообміну між супутнім потоком газу та плівкою.

Для розрахунку масообміну застосовна залежність між дифузійним числом Нуссельта і числами Рейнольдса і Прандтля, що підтверджено, зокрема, при дослідженні масообміну між плівкою суспензії латексу, що піднімається, та супутнім потоком повітря [11].

Економічні та екологічні переваги промислового виробництва білка перед сільськогосподарським. Вартість промислового виробництва білка переважно залежить від використовуваних газів, серед яких домінує вартість водню.

Останнім часом створено процес виробництва водню електролізом вугільної пульпи. Так, у США вартість однієї тонни водню, одержуваного електролізом вугільної пульпи, при витраті електроенергії 5,3 кВт•год на один кг водню, її ціні 0,04 дол/кВт•год і ціні вугілля 32 дол/т, становить 1700 дол, що на 50% нижче вартості водню, отриманого електролізом води [6].

Проведені нами експерименти показали, що при температурі 210-220 °С та тиску 9-11 МПа витрати енергії при електролізі вугільної пульпи становлять 2,66-2,82 кВт•год на один кг водню. Це дозволяє знизити вартість водню на 20-30 %, порівняно з даними американських авторів. Зараз відбувається підбір матеріалу анода, оскільки саме анод схильний до інтенсивної корозії.

Але згадані труднощі легко долаються при електролізі вугільних пластів у підземних умовах. У цьому випадку сам пласт є анодом і його руйнування саме має відбуватися при газифікації [14].

За розрахунками молдавських мікробіологів один біореактор ємністю 100 м³ може виробити за 2 доби стільки білка, що на рік дає один гектар пшениці. Звідси випливає, що такий реактор здатний виробити на рік кількість білка, яку можна отримати з пшениці з багатьох гектарів посівних площ. Природно, що в цьому випадку виключається весь парк механізмів та с/г машин, що забезпечують вирощування, підживлення, збирання, транспортування та переробку врожаю пшениці.

Річ у тому, що з переходом на новий спосіб виробництва білка відбувається економія ресурсів та здійснюється значний позитивний вплив на довкілля.

Відомо, що частка шкідливих викидів з відпрацьованими газами автомобільних двигунів становить 39–63 % загального забруднення довкілля. Шкідливі викиди включають окис вуглецю, вуглеводні та оксиди азоту [15]. Особливо забруднює атмосферу закис азоту – «звеселяючий газ», оскільки він має

в 300 разів більшу здатність затримувати теплове випромінювання, ніж молекула вуглекислого газу. Це надзвичайно потужний парниковий газ [16].

Крім того, при існуючому способі виробництва та транспортування продукти харчування насичуються дуже канцерогенною речовиною – бенз(а)піреном [17].

Висновки. В результаті дослідження процесу вирощування біомаси встановлено:

1. Окремі вузли експериментальної установки та системи в цілому діють задовільно, проте в апаратурному оформленні потрібні зміни.

2. Властивості водню, що отримується при взаємодії алюмінію з водою, у процесі вирощування біомаси аналогічні електролізному водню. Потрібні додаткові дослідження причин низької ефективності водню, одержуваного при взаємодії сплаву феросиліцію з лугом.

3. Синтез білка бактеріями у процесі безперервного культивування стабільний і становить 72–74 %, що узгоджується з літературними даними.

4. Для підвищення вибухобезпечності процесу водень слід розчиняти в апараті інтенсивного перемішування окремо від кисню та вуглекислого газу.

5. Враховуючи ресурс та металомісткість обладнання, як біореактор необхідно застосовувати плівковий апарат замість ємнісного апарата з мішалкою. Площу поверхні тепломасообміну плівкових апаратів визначають залежно від безрозмірних чисел Нуссельта від чисел Рейнольдса і Прандтля як з внутрішнього, так і з зовнішнього боку пучка труб, що охолоджуються.

7. Надано економічні та екологічні переваги перебудови виробництва білка з сільськогосподарських способів на промисловий, заснований на використанні водневокислюючих бактерій.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Pat. US 12320014 B2.* Microorganisms and artificial ecosystems for the production of protein, food, and useful co-products from C1 substrates. Int. Cl. C12N1/20, C12P1/04, C25B1/04. Inventors: John S. Reed, Jil Geller, Sonali Hande. Pleasanton, CA (US). Assignee: Kiverdi, Inc., Pleasanton, CA (US). Appl. No.: 18/210,901. Filed: Jun. 16, 2023. Publ. Date: Jun. 3, 2025.

2. *Pat. WO 2024/253609 A1.* Sustainable waste management system of bio-circular technology involving a microbial consortium. Int. Cl.: B09B3/00, C12P1/04. Inventor; and Applicant: Basal, Ahmet (TR). Agent: Kordinat inovasyon ve fikri mulkiyet yonetimi Ltd. Stl; 34340 Besiktas/Istanbul (TR). Appl.: PCT/TR2023/050690. Filed: 18.07.2023. Publ. Date: 12.12.2024.

3. *Pat. US 10,696,941 B2*. Method and apparatus for growing microbial cultures that require gaseous electron donors, electron acceptors, carbon sources, or other nutrients. Int. Cl.: C12M3/00, C12M1/20. U.S. Cl.: C12N1/20, C12M41/46, C12M41/48. Inventors: Peter Dalla-Betta, Hayward, CA (US); John S. Reed, Berkeley, CA (US). Assignee: Kiverdi, Inc., Berkeley, CA (US). Appl. No.: 14/839,074. Filed: Aug. 28, 2015. Publ. Date: Jun. 30, 2020.
4. *GB 2594454 A*. Method for producing biomass using hydrogen-oxidizing bacteria. Int. Cl.: C12N1/20, A23K10/10, B01D53/84, C12P1/04, C12Q3/00, B01D2251/95. Inventors: Patrick William Mansfield Robert, Pander Bart, Krabben Preben, Nicholas Rowe Peter. Assignee: Deep Branch Biotechnology Ltd.; Crown Way, Cardiff CF14 3UZ, (UK). Appl. No.: 2006071.1. Filed: 24.04.2020. Publ. Date: 03.11.2021.
5. *Pat. EP 4473125 A1*. Process for biotechnological production of a bioproduct. Int. Cl.: C12P7/6436, C12M23/58, C12M43/00. Inventors: Philipp Arbter, Tyll Utesch, An-Ping Zeng. Current Assignee: Colipi GmbH; Hamburg (DE). Appl.: EP 22709595.7A, Filed: 01.02.2022. Publ. Date: 11.12.2024.
6. *Мессерле В.Е., Устименко А.Б.* Тридцать первая Международная техническая конференция по использованию угля и топливным системам // Теплоэнергетика. 2007. № 3. - С.71-76.
7. *Волова Т.Г., Терсков И.А., Сидько Ф.Я.* Микробиологический синтез на водороде. - Наука, 1985. - 116 с.
8. *Pat. AU 2021277653 B2*. Microorganisms and artificial ecosystems for the production of protein, food, and useful co-products from C1 substrates. Int. Cl. C12P1/04, C12P5/00, C12M1/04, C12P7/64, C25B1/04. Inventors: Reed, John S.; Geller, Jil; Hande, Sonali. Kiverdi, Inc.; Agent/Attorney: Arcadia Intellectual Property, Level 40 140, William Str., Melbourne, VIC, 3000 (AU). Appl. No: 2021277653. Filed: 30.11.2021. Publ. Date: 21.12.23.
9. *Бирюков В.В., Кантере В.М.* Оптимизация периодических процессов микробиологического синтеза. - Наука, 1985. - 296 с.
10. *РТМ 26-01-71-75* (Руководящий технический материал). Испарители со стекающей пленкой. Методика теплового и гидромеханического расчета / Сост. Б.А. Трошенькин. - Мин. хим. и нефт. маш., 1975, - 43 с. Режим доступа: <https://www.twirpx.com/file/3494809/>
11. *Трошенькин Б.А.* Циркуляционные и пленочные испарители и водородные реакторы. - Киев: Наук. думка, 1985. - 176 с. Режим доступа: <https://www.twirpx.com/file/3495851/>
12. *Чубин И.А., Маслов А.М.* Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов // Пищевая промышленность. 1970. - 184 с.
13. *Мигай В.Е., Фирсова Э.В.* Теплообмен и гидравлическое сопротивление пучков труб. - Наука. 1986. - 195 с.
14. *Патент 112569* Україна, МПК(2016.01). E21B 43/295(2006.01), C10G 1/00. Спосіб підземної газифікації вугілля та склад для його здійснення / Трошенькін Б.О., Янко С.В., Трошенькін В.Б., Хом'як К.М. // Власник: Інститут проблем машинобудування ім. А. Н. Підгорного НАН України. - № а 2014 09035; Заявл. 11.08.2014; Опубл. 29.06.2016, Бюл. № 18. - 10 с.
15. *Мищенко А.И.* Применение водорода для автомобильных двигателей. - Киев: Наука, 1984. - 143 с.
16. *Falkovski, P.G.* Life's Engines: How Microbes Made Earth Habitable (Pop Science). Princeton and Oxford: Princeton University Press. 2015. ISBN 978-0691155371.
17. *Левчук И.В.* Науково-методологічні основи удосконалення технохімічного контролю сировини і готової продукції олійножирових виробництв. Автореф. ...дис. ... докт. техн. наук. 05.18.06. - Харків: НТУ ХПИ. 2018. - 42 с.

**HEAT AND MASS EXCHANGE IN PROTEIN
PRODUCTION DEVICES
BASED ON HYDROGEN OXIDIZING BACTERIA**

Troshen'kin B.A.¹, Kravchenko O.V.², Troshen'kin V.B.³

*A. Pidhorny Institute of Energy Machines and Systems of
National Academy of Sciences of Ukraine,
61046, Kharkiv, Komynalnikiv str., 2/10*

¹*Troshen'kin B.A., Doctor of Technical Sciences, Prof.,
ORCID 0000-0003-1505-4717;*

²*Kravchenko O.V., Corresponding member of NAS
of Ukraine, Head of Complex Energy Technologies
Department, e-mail: krav@ipmach.kharkov.ua, ORCID
0000-0003-0048-6744;*

³*Troshen'kin V.B., Ph.D., tel. +38 (067) 79-55-267, e-mail:
troshenkinv@gmail.com, ORCID 0000-0001-9661-9489*

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2026.5>

Global economic development trends urgently require the transition of agricultural food production to industrial scale.

Numerous patents recently obtained confirm that many countries are interested in protein production processes, particularly those based on hydrogen-oxidizing bacteria.

Research into this process is currently in the laboratory experimentation and preliminary design stages for pilot plants.

This paper examines the current state of development in protein production using hydrogen-oxidizing bacteria. To identify deficiencies in the biomass cultivation process, a pilot plant was created and a series of studies were conducted. The results were compared with existing data.

Based on the experimental results, the key principles of the biomass production process were clarified, and the reliability of individual components of the laboratory setup was verified.

A comprehensive analysis of the resulting biomass, conducted in I. Mechnikov Institute of Microbiology and Immunology (Kharkiv, Ukraine) established that, during continuous cultivation, protein synthesis by the *Alkaligenes eutropha* Z1 bacterium is stable, accounting for 72-74 % of the resulting biomass, consistent with published data. The content of lipid, carbohydrate components, and nucleic acids is within normal limits. The presence of other species in the biomass does not exceed permissible levels.

Thus, it has been proven that the individual components and the entire system operate reliably.

Based on the results of experimental studies of the process, it was recommended to change the equipment design of the stand – to dissolve hydrogen in the cultural liquid before feeding it to the fermenter, and to use film devices as fermenters with stirrers.

A calculation sequence for heat and mass transfer in a film fermenter was developed.

It has been shown that the conversion of protein production from agricultural methods to industrial ones will yield significant economic benefits and improve the environment by reducing harmful emissions into the atmosphere.

References 17, figures 3.

Key words: hydrogen, hydrogen-oxidizing bacteria, protein, heat and mass transfer, economic and ecology benefits, bioreactor.

1. *Pat. US 12320014 B2.* Microorganisms and artificial ecosystems for the production of protein, food, and useful co-products from C1 substrates. Int. Cl. C12N1/20, C12P1/04, C25B1/04. Inventors: John S. Reed, Jil Geller, Sonali Hande. Pleasanton, CA (US). Assignee: Kiverdi, Inc., Pleasanton, CA (US). Appl. No.: 18/210,901. Filed: Jun. 16, 2023. Publ. Date: Jun. 3, 2025.

2. *Pat. WO 2024/253609 A1.* Sustainable waste management system of bio-circular technology involving a microbial consortium. Int. Cl.: B09B3/00, C12P1/04. Inventor; and Applicant: Basal, Ahmet (TR). Agent: Kordinat inovasyon ve fikri mulkiyet yonetimi Ltd. Stl; 34340 Besiktas/Istanbul (TR). Appl.: PCT/TR2023/050690. Filed: 18.07.2023. Publ. Date: 12.12.2024.

3. *Pat. US 10,696,941 B2.* Method and apparatus for growing microbial cultures that require gaseous electron donors, electron acceptors, carbon sources, or other nutrients. Int. Cl.: C12M3/00, C12M1/20. U.S. Cl.: C12N1/20, C12M41/46, C12M41/48. Inventors: Peter Dalla-Betta, Hayward, CA (US); John S. Reed, Berkeley, CA (US). Assignee: Kiverdi, Inc., Berkeley, CA (US). Appl. No.: 14/839,074. Filed: Aug. 28, 2015. Publ. Date: Jun. 30, 2020.

4. *GB 2594454 A.* Method for producing biomass using hydrogen-oxidizing bacteria. Int. Cl.: C12N1/20, A23K10/10, B01D53/84, C12P1/04, C12Q3/00, B01D2251/95. Inventors: Patrick William Mansfield Robert, Pander Bart, Krabben Preben, Nicholas Rowe Peter. Assignee: Deep Branch Biotechnology Ltd.; Crown Way, Cardiff CF14 3UZ, (UK). Appl.: No.: 2006071.1. Filed: 24.04.2020. Publ. Date: 03.11.2021

5. *Pat. EP 4473125 A1*. Process for biotechnological production of a bioproduct. Int. Cl.: C12P7/6436, C12M23/58, C12M43/00. Inventors: Philipp Arbter, Tyll Utesch, An-Ping Zeng. Current Assignee: Colipi GmbH; Hamburg (DE). Appl.: EP22709595.7A. Filed: 01.02.2022. Publ. Date: 11.12.2024.
6. *Messerle V.E., Ustimenko A.B.* [Thirty-first International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems] / *Teploenergetika* [Thermal power engineering]. 2007. No. 3. - P. 71-76. (in rus.)
7. *Volova T.G., Terskov I.A., Sidko F.Ya.* [Microbiological synthesis on hydrogen]. - Nauka, 1985. - 116 pp. (in rus.)
8. *Pat. AU 2021277653 B2*. Microorganisms and artificial ecosystems for the production of protein, food, and useful co-products from C1 substrates. Int. Cl. C12P1/04, C12P5/00, C12M1/04, C12P7/64, C25B1/04. Inventors: Reed, John S.; Geller, Jil; Hande, Sonali. Kiverdi, Inc.; Agent/Attorney: Arcadia Intellectual Property, Level 40 140 William Str., Melbourne, VIC, 3000 (AU). Appl. No: 2021277653. Filed: 30.11.2021. Publ. Date: 21.12.23.
9. *Birykov V.V., Kantere V.M.* [Optimization of batch processes of microbiological synthesis]. - Nauka, 1985. - 296 c. (in rus.)
10. *GTM 26-01-71-75* [(Guiding technical material). Evaporators with flowing film. Methods of thermal and hydromechanical calculations]. - M.: [Ministry of Chemistry and petroleum engineering], 1975, - 43 pp. Access mode: <https://www.twirpx.com/file/3494809/> (in rus.).
11. *Troshen'kin B.A.* [Circulating and film evaporators and hydrogen reactors]. - Kyiv: Naukova Dumka, 1985. - 176 pp. Access mode: <https://www.twirpx.com/file/3495851/> (in rus.).
12. *Chybin I.A., Maslov A.M.* [Handbook of thermophysical characteristics of food products and semi-finished products] // *Pishchevaya promishlennost* [Food industry]. 1970. - 184 pp. (in rus.).
13. *Migai V.E., Firsova E.V.* [Heat transfer and hydraulic resistance of tube bundles]. - Nauka. 1986. - 195 pp. (in rus.)
14. *Pat. UA112569*. [Method of underground gasification of coal and composition for its implementation]. Int. Cl. E21B 43/295, C10G 1/00. Inventors: Troshenkin B.O., Yanko S.V., Troshenkin V.B., Khomyak K.M.; Owner: A. Pidgorny Inst. of Mechanical Eng. Problems of NAS of Ukraine. - No. a 201409035; Appl.: 11.08.2014; Publ. 29.06.2016, Bull. No. 18. - 10 p. (in ukr.).
15. *Mishchenko A.I.* [Use of hydrogen for automobile engines]. - Kyiv: Nauka, 1984. - 143 pp. (in rus.)
16. *Falkovski, P.G.* *Life's Engines: How Microbes Made Earth Habitable*. (Pop Science). Princeton and Oxford: Princeton University Press. 2015. ISBN 978-0691155371.
17. *Levchyk I.V.* [Scientific and methodological foundations of improving the technochemical control of raw materials and finished products of oil and fat production]. Author's abstract ...diss. ... doct. of techn. sciences. - Kharkiv: NTU kHPI. 2018. - 42 pp. (in ukr.).

Отримано 12.11.2025
Received 12.11.2025

Прийнято до друку 05.02.2026
Accepted for publication 05.02.2026