

УДК 663.1

ENERGY AND MASS-EXCHANGE PROCESSES IN THE CONDITIONS OF AEROBIC SYNTHESIS OF MICROORGANISMS

A. Sokolenko, S. But*National University of Food Technologies***V. Gizhelitsky, L. Golovkina***Uman National University of Horticulture***Key words:**

aerobic fermentation,
yeast,
synthesis,
energy,
interfacial surface,
gas-retaining ability,
oxygen supply

Article history:

Received 23.10.2018

Received in revised form
10.11.2018

Accepted 21.11.2018

Corresponding author:

mif63@i.ua

ABSTRACT

The article is devoted to the peculiarities of energy and mass transfer processes in gas-liquid media in conditions of aerobic synthesis of microorganisms. The natural constraints on the growth of their biomass lead to the need to use technological apparatuses of considerable volumes, which is accompanied by technical difficulties in organizing the delivery of oxygen to the culture medium. The latter is carried out by introducing and dispersing into the fluid medium of compressed air, and the level of dissolved oxygen provides a transition to the modes of aerobic synthesis of microorganisms. On the example of cultivation of yeast-zukromicetes, mathematical dependencies in the ratios of individual technological parameters, which are associated with estimates of the possibilities of creating the interphase surface, are proposed. It is shown that for the same indicators of input air streams introduced into the liquid fraction, the result of the magnitude of the interphase surface of the mass transfer can be significantly different due to energy flows.

On the basis of the laws of equality of action and counteraction and Archimedes, a method is proposed to determine the motive factors for the creation of circulatory contours. The process of transforming the gas stream and the formation of the dispersed gas phase is an irreversible thermodynamic process, which does not involve the possibility of returning to the initial state without changes in the external environment. The physical interaction between the ascending gas flow and the liquid phase leads to the formation of stochastic circulation circuits, which determine the hydrodynamic state of the system with interconnected indicators of the reduced gas phase and gas-holding capacity. Obviously, these two characteristics have an impact on mass-exchange processes, but not only they. Among the influential parameters are the chemical composition of the liquid phase, viscosity, surface tension, temperature and hydrostatic pressure.

DOI: 10.24263/2225-2916-2018-24-12

ЕНЕРГО- І МАСООБМІННІ ПРОЦЕСИ В УМОВАХ АЕРОБНОГО СИНТЕЗУ МІКРООРГАНІЗМІВ

А.І. Соколенко, д-р техн. наук

С.А. Бут, канд. техн. наук

Національний університет харчових технологій

В.М. Гіджеліцький, канд. техн. наук

Л.І. Головкіна

Уманський національний університет садівництва, Умань, Україна

Стаття присвячена особливостям енерго- і масообмінних процесів у газорідних середовищах в умовах аеробного синтезу мікроорганізмів. На прикладі культивування дріжджів-цукроміцетів запропоновані математичні залежності у співвідношеннях окремих технологічних параметрів, які пов'язуються з оцінками можливостей створення міжфазної поверхні.

Показано, що за однакових показників вхідних повітряних потоків, що вводяться в рідинну фракцію, результат по величині міжфазної поверхні масопередачі може бути відчутно різним за рахунок енергетичних потоків. Показники останніх визначаються за інших рівних умов швидкостями контактування газової і рідинної фракцій. На основі законів рівності дії і протидії та Архімеда запропонована методика визначення рушійних факторів створення циркуляційних контурів.

Ключові слова: аеробне бродіння, дріжджі, синтез, енергія, міжфазна поверхня, газоутримувальна здатність, доставка кисню.

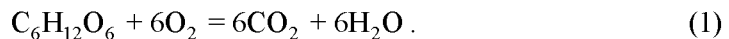
Постановка проблеми. Анаеробні і аеробні процеси бродіння є складовими загального колообігу вуглецю з його біотичними й абіотичними компонентами у величезній кількості процесів. Ланцюг перетворень синтезованих цукрів та інших природних полімерів розпочинається за участі таких речовин як вода і діоксид вуглецю, квантів сонячної енергії та за наявності при цьому хлорофілу як природного каталізатора. Наявність колообігу означає наявність у наступних операціях як деструктивних процесів на спрощення задіяних в них речовин, так і процесів синтезу, в яких створюються незрівнянно більш складні органічні конструкції [1—3]. При цьому процеси деструкції і, одночасно, синтезу за аеробного й анаеробного бродіння синхронізовані з різною матеріальною і енергетичною вартістю. Інтенсивність і загальний результат такого синтезу визначаються наявністю живлення, термодинамічними умовами і наявністю кисню в розчиненій формі. Харчування мікроорганізмів відбувається в процесі постійного обміну речовинами між ними і середовищем та супроводжується сукупністю хімічних реакцій, що визначають ріст, самооновлення, розвиток, приріст біомаси. Енергетичне забезпечення при цьому здійснюється за рахунок розкладання складних речовин живлення й окислення хімічних сполук. Досвід технічної мікробіології вказує на те, що швидкість приросту біомаси або синтезу цільових речовин визначається, по-перше, природними властивостями мікроорганізмів і, по-друге, умовами культурального середовища. Саме останні є факторами впливу, які можуть бути реалізовані. На цій основі бродильні процеси поділяють на аеробні й анаеробні за наявності або відсутності розчиненого в середовищі кисню. Прикладом діапазонів і можливостей впливу є технології синтезу хлібопекарських дріжджів, результативність яких за інших рівних умов визначається наявністю розчиненого кисню. За даними [4; 5] концентрації O_2 в кількості 25%

від стану насичення рідинної фази вже не стримують аеробний синтез і утворення спирту припиняється з максимальним виходом мікробної культури. Проте в сукупності параметрів впливу існує суперечність, пов'язане з вибором температури середовища. Оптимально для дріжджів-цукроміцетів цей показник знаходиться в діапазоні температур 28...32°C, однак розчинність кисню, як і інших газів, зменшується зі збільшенням температури. До того ж кисень відноситься до газів з обмеженою розчинністю, що змушує використовувати спеціальні заходи в обладнанні та технологіях аерації культуральних середовищ.

Мета дослідження: оцінка особливостей та параметрів енерго- і масообмінних процесів в умовах аеробного синтезу мікроорганізмів і напрямків їх інтенсифікації.

Методи дослідження: аналіз і узагальнення фізичних особливостей процесів на основі математичних моделей у рамках законів, що відповідають матеріальним і енергетичним балансам.

Потреби в динаміці доставки кисню в середовища оцінюються з врахуванням очікуваної швидкості приросту біомаси дріжджів на основі процесів повного окислювання глюкози, що відображується залежністю:



Оскільки побудова всякого процесу синтезу здійснюється на основі швидкості приросту біомаси, то це дає змогу встановлювати алгоритм подавання в середовище притоку живлення [6]. За вказаних умов швидкість приросту біомаси $dM_{\text{др}}/d\tau$ є функцією часу $d\tau$:

$$\frac{dM_{\text{др}}}{d\tau} = \frac{dM_{\text{др}}}{d\tau}(\tau), \quad (2)$$

і відобразити динаміку споживання цукру:

$$\frac{dM_{\text{цук}}}{d\tau} = k \frac{dM_{\text{др}}}{d\tau}(\tau), \quad (3)$$

де k — коефіцієнт пропорційності.

У технічних розрахунках швидкість приросту біомаси задається у відсотках, але за відомої початкової маси визначається її абсолютний приріст. Так за початкової маси дріжджів $M_{\text{др}(\text{п})}$ і за годинного приросту 17% маємо на завершення вказаного часу:

$$M_{\text{др}(\text{п})} + \Delta M_{\text{др}} = M_{\text{др}(\text{п})} + 0,17M_{\text{др}(\text{п})} = 1,17M_{\text{др}(\text{п})}. \quad (4)$$

Очевидно, що швидкість приросту біомаси в такому випадку складатиме:

$$\frac{dM_{\text{др}}}{d\tau}(\tau) = \frac{0,17M_{\text{др}(\text{п})}}{3600}, \quad \frac{\text{кг}}{\text{с}}. \quad (5)$$

Годинний приріст у логарифмічній фазі в режимах набору, коли об'єм середовища зростає, і в режимах відбору за стабілізованого об'єму може бути сталим

при виразі його у відсотках, а в режимах відбору стабілізується й абсолютний приріст.

На основі умов (3) та (5) записуємо:

$$\frac{dM_{\text{цук}}}{d\tau} = k \frac{PM_{\text{др(п)}}}{3600}, \quad \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \quad (6)$$

де P — коефіцієнт погодинного приросту дріжджів, а коефіцієнт пропорційності k відображує числове співвідношення між масами використаного цукру і синтезованих дріжджів.

Знайдені співвідношення, що стосуються динаміки деструкції цукрів, дають змогу повернутися до оцінки споживання кисню в системі. За молекулярної маси цукру 180 одиниць і молекулярної маси шести молекул кисню 192 одиниці їх співвідношення становить:

$$x = \frac{192}{180} = 1,067. \quad (7)$$

Останнє означає, що на кожний кілограм спожитого цукру в середовище необхідно ввести 1,067 кілограма кисню. Тоді маємо:

$$\frac{dM_{\text{кис}}}{d\tau} = 1,067k \frac{PM_{\text{др(п)}}}{3600}, \quad \frac{\text{кг}}{\text{с}}. \quad (8)$$

Запропонована умова (8) відображує матеріальний баланс у формі рівняння (1), що означає її правомірність незалежно від перебігу біохімічних реакцій, наслідком яких є права частина умови окислювання глюкози. На останньому слід зробити певний акцент, оскільки синтез біомаси не може завершуватися тільки утворенням діоксиду вуглецю і води, а обов'язково супроводжується утворенням складових з'єднань біомаси.

Витратам кисню на процеси синтезу біомаси мікроорганізмів присвячено значну кількість досліджень [5], узагальненням яких була визнана кількість кг кисню на приріст 1 кг абсолютно сухої маси дріжджів. У такій інтерпретації її основа знову стосується матеріального балансу, оскільки абсолютно сухі речовини складають 25% від загальної маси дріжджів. Якщо виходити з цього положення, то швидкість споживання кисню відображується залежністю:

$$\frac{dM_{\text{кис}}}{d\tau} = 0,25M_{\text{кис(п)}} \frac{dM_{\text{др}}}{d\tau}, \quad (9)$$

де $M_{\text{кис(п)}}$ — витрати кисню на приріст абсолютно сухої маси дріжджів.

З урахуванням умов (8) та (9) одержуємо:

$$0,25M_{\text{кис(п)}} = 1,067k. \quad (10)$$

Звідси за відомого значення k визначаємо:

$$M_{\text{кис(п)}} = 4,268k. \quad (11)$$

Результати. Наведені міркування приводять до логічного висновку про те, що можливості аераційних систем дріжджовирощувальних апаратів за показником швидкості розчинення кисню повинні відповідати динаміці споживання O_2 дріжджами в перерахунку на швидкість приросту біомаси або на швидкість зменшення концентрації цукру в середовищі. Така відповідність балансів відображується залежністю:

$$\frac{dM_{\text{кис}}}{d\tau} = k_M F (c_H - c_T), \quad \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \quad (12)$$

де k_M — коефіцієнт масопередачі на межі поділу диспергованої газової фази і рідинного середовища, м/с; F — площа поверхні поділу фаз, м^2 ; c_H і c_T — відповідно концентрація насичення і плинна концентрація кисню. Добуток $k_M F$ називають об'ємним коефіцієнтом масопередачі:

$$k_V = k_M F, \quad \frac{\text{м}^3}{\text{с}}. \quad (13)$$

Числові значення коефіцієнтів масопередачі і поверхні поділу фаз залежать від таких фізичних параметрів рідинної і газової фаз, як температура, в'язкість, поверхневий натяг, гідродинамічний режим газорідинного середовища, умови утворення диспергованої газової фази, газоутримувальна здатність, швидкість спливання газових бульбашок тощо.

У свою чергу, умови створення диспергованої газової фази, швидкості її спливання, величини газоутримувальної здатності залежать від геометричних параметрів апаратів і газорідинних середовищ та величин енергетичних параметрів введення газової фази в рідинну. Швидкості висхідних і опускних ділянок циркуляційних контурів газорідинної суміші залежать від рівномірності розподілу вхідних газових потоків по перерізу апаратів в горизонтальних площинах. У результаті за практично стабілізованої відносної швидкості газової фази (відносно рідинної) на рівні 0,25...0,27 м/с швидкості рідинної фази досягають значень 0,3...0,5 м/с. Це означає, що абсолютні швидкості спливання газової фази наближаються до 0,60...0,75 м/с зі зменшенням газоутримувальної здатності системи і поверхні поділу фаз та з погіршенням кисневого режиму середовища.

Оскільки інтенсивність гідродинамічних режимів залежить від газоутримувальної здатності, то пошук першопричини або першопричин слід починати з визначення параметрів впливу на неї. Відповідь на запитання про вплив рівня аерації завжди позитивна. Так, збільшення кількості (інтенсивності) вхідного потоку повітря, що вводиться в систему, газоутримувальну здатність підвищує.

Ситуація щодо моделювання розв'язується застосуванням поняття приведеної швидкості газової фази [6], яка визначається відношенням газового потоку V в $\text{м}^3/\text{с}$ до площі поперечного перерізу апарата $f_{\text{ап}}$:

$$w_{\text{пр}} = \frac{V}{f_{\text{ап}}}, \quad \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (14)$$

Отже, режиму моделювання гідродинаміки в середовищі відповідає наближення до виконання умови $w_{\text{пр}} = \text{const}$. Саме це означає зменшення газового

потоків V при кратному зменшенні площі поперечного перерізу $f_{\text{ап}}$ і, навпаки, за відповідного збільшення стосовно ізооб'ємних апаратів.

Енергетичні витрати, що стосуються утворення міжфазної поверхні F , також пов'язані з газотримувальною здатністю, оскільки:

$$A = \sigma F, \quad (15)$$

де A — робота утворення міжфазної поверхні, Дж; σ — коефіцієнт поверхневого натягу, Дж/м².

За інших рівних умов міжфазна поверхня є функцією газотримувальної здатності:

$$F = F(u)$$

і тому

$$A = \sigma F(u). \quad (16)$$

Утворення міжфазної поверхні відбувається в зоні контактування рідинної фази з вхідним повітряним потоком з відповідною енергетичною трансформацією.

При цьому в локальній зоні створюється високотурбулізований режим на основі повного поглинання кінетичної енергії потоку з потужністю:

$$N = \rho V \frac{w^2}{2}, \text{ Вт}, \quad (17)$$

де w — швидкість входження в контакт газового потоку з рідинною фазою, м/с; ρ — питома маса газового потоку, кг/м³.

Результатом такої взаємодії є утворення диспергованої газової фази в супроводженні дисипативних явищ. Якщо останніми знехтувати і вважати, що потужність утворення міжфазної поверхні і потужність вхідного потоку наближено рівні, то на цій основі виникає можливість оцінки швидкості її синтезу. Від моменту утворення газових бульбашок починає діяти закон Архімеда завдяки створенню рушійного фактора:

$$P_{\text{руш}} = \rho_{\text{рід}} g v_6, \quad (18)$$

де $\rho_{\text{рід}}$ — густина рідинної фази, кг/м³; g — прискорення вільного падіння, м/с²; v_6 — об'єм бульбашки, м³.

Одночасно з початком переміщення бульбашки починається дія опору середовища $P_{\text{оп.с.}}$. Очевидно, що і рушійний фактор, і фактор опору залежать від об'єму бульбашки, як і динаміка перехідного процесу, завершенню якого відповідає рівність $P_{\text{руш}}$ і $P_{\text{оп.с.}}$.

Подальше спливання газових бульбашок супроводжується зменшенням гідростатичних тисків, що приводить до зростання об'ємів, розмірів і поверхонь контактування їх з середовищем. Очевидно, що зростання міжфазної поверхні впливає на користь збільшення швидкості розчинення кисню, однак зменшення тиску відповідно до закону Генрі результативність процесу обмежує.

Повернувшись до умови (16), і з урахуванням (17) одержуємо:

$$\rho V \frac{w^2}{2} = \sigma \dot{F} \text{ і звідси } \dot{F} = \rho V \frac{w^2}{2\sigma}. \quad (22)$$

Остання залежність вказує на те, що найбільш суттєвим фактором впливу на динаміку синтезу міжфазної поверхні є швидкість контактування газової фази з рідинною. Важливо, що технічна реалізація у виборі параметра w є цілком досяжною за рахунок вибору загальної площі барботажних отворів аераційної системи і рівномірності розподілу в них газового потоку.

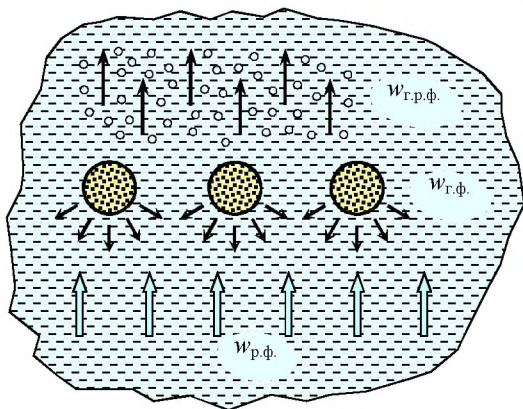


Рис. 1. Ілюстрація щодо спрямування рідинної $w_{р.ф.}$, газової $w_{г.ф.}$ та газорідинної $w_{г.р.ф.}$ фаз

Оскільки останній визначається властивостями гравітаційного поля в проявах закону Архімеда, то це означає технічну доцільність організації зустрічних потоків газової і рідинної фаз (див. рисунок). За зустрічних потоків маємо:

$$w = w_{г.ф.} + w_{р.ф.} \quad (24)$$

Хоча швидкість руху рідинної фази $w_{р.ф.}$ на порядок менша за швидкість газової фази $w_{г.ф.}$, їхні зустрічні потоки доцільні саме у зв'язку з формуванням дисперсної газової фази.

Висновки.

1. Процес трансформації газового потоку й утворення диспергової газової фази є незворотним термодинамічним процесом, який не припускає можливості повернення до початкового стану без змін у зовнішньому середовищі. Цей реальний процес відбувається в рамках певного часу й швидкості і супроводжується тертям, масообміном, дифузиею та теплообміном в рамках початкових і кінцевих температур газової та рідинної фракцій.

2. Результат взаємодії газового потоку з середовищем є нерівноважним і незворотним, тоді як відносно рідинної фази питання її трансформації потребує подальшої уваги.

Загальна площа отворів $f_{отв}$ визначається залежністю:

$$f_{отв} = \frac{V}{w}. \quad (23)$$

Швидкість газового потоку w в барботажних отворах слід призначати в межах 25...30 м/с [4].

У локальних зонах утворення міжфазної поверхні у зв'язку з перехідними процесами спливання диспергової газової фази формується циркуляційний контур за участю рідинної фази. Очевидно, що за своїм напрямком він збігається з напрямком переміщення газової фази. Оскільки останній визначається влас-

3. Фізична взаємодія між висхідним газовим потоком і рідинною фазою приводить до утворення стохастичних циркуляційних контурів, які визначають гідродинамічний стан системи з взаємопов'язаними показниками приведеної швидкості газової фази і газотримувальної здатності. Очевидно, що ці дві характеристики мають вплив на масообмінні процеси, однак не лише вони. До числа впливових параметрів відносяться хімічний склад рідинної фази, в'язкість, поверхневий натяг, температура і гідростатичні тиски.

4. Оскільки висота рідинної фази може досягати десяти метрів і більше, то це означає співрозмірність максимальних гідростатичних тисків у середовищах і атмосферних тисків. Проте навіть і за менших гідростатичних тисків з'являються особливості в масообмінних процесах, які заслуговують на увагу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Грин Н. Биология / Грин Н., Стаут У., Тейлор Д. // 1 том. Пер. с англ. — Москва : Мир, 1996. — 368 с.
2. Кунце В. Технология солода и пива / Кунце В.; пер. в нем. — С.-Перербург, 2001. — 912 с.
3. Пирог Т.П. Загальна біологія / Пирог Т.П. — Київ : НУХТ, 2010. — 632 с.
4. Соколенко А.И. Исследование процессов аэрации питательных сред и разработка новых конструкций дрожжерастильных аппаратов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / науч. рук. Гандзюк М.П. — Киев: КТИПП, 1972. — 171 с.
5. Семихатова Н.М. Хлебопекарные дрожжи / Семихатова Н.М. — Москва: Пищевая промышленность, 1980. — 200 с.
6. Sokolenko A. Process parameters of aerobic synthesis of microorganisms: scientific development and achievements: collective monograph / Sokolenko A., Koval O. — London: SCIEМСЕЕ, 2018. — Volume 5. — P. 319—333.

ЭНЕРГО- И МАССОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В УСЛОВИЯХ АЭРОБНОГО СИНТЕЗА МИКРООРГАНИЗМОВ

А.И. Соколенко, С.А. Бут

Национальный университет пищевых технологий

В.Н. Гиджелицкий, Л.И. Головкина

Уманский национальный университет садоводства, Умань, Украина

Статья посвящена особенностям энерго- и массообменных процессов в газожидкостных средах в условиях аэробного синтеза микроорганизмов. На примере культивирования дрожжей-сахаромицетов предложены математические зависимости в соотношениях отдельных технологических параметров, которые связываются с оценками возможностей создания межфазной поверхности. Показано, что при одинаковых показателях входящих воздушных потоков, вводимых в жидкостную фракцию, результат по величине межфазной поверхности массопередачи может быть ощутимо различным за счет энергетических потоков. Показатели последних определяются при прочих равных условиях скоростью контакта газовой и жидкостной фракций. На основе законов равенства действия и противодействия и Архимеда предложена методика определения движущих факторов создания циркуляционных контуров.

Ключевые слова: аэробное брожение, дрожжи, синтез, энергия, межфазная поверхность, газодерживающая способность, доставка кислорода.