

TRANSITION PROCESSES IN FERMENTATION TECHNOLOGIES

A. Sokolenko, O. Shevchenko, S. Litvynchuk

National University of Food Technologies

Key words:

Transients
Fermentation technologies
Anaerobic digestion
Energy-related transformations
Gas-holding capacity

Article history:

Received 23.0.2019
Received in revised form
09.10.2019
Accepted 21.10.2019

Corresponding author:

O. Shevchenko

E-mail:

tmipt@ukr.net

ABSTRACT

The materials of the article are concerned with the analysis of the set of transients present in the technologies of anaerobic digestion of sugar-containing media, energy-material transformations and the search for relationships between the parameters that characterize the named set.

With the known limiting factor at the final stage of fermentation — the osmotic pressure of solutes - an assessment was made regarding the possibilities of intensification of mass transfer processes based on the use of internal energy factors of gas-liquid media. The main factor of the hydrodynamic state is the gas-holding capacity, the corresponding mathematical formalizations are proposed. On the basis of the laws of Gay-Lussac, Archimedes, Newton's third law, the transition from the estimation of the gas-holding capacity to the estimation of the energy potential of the circulating circuits was first proposed.

The search for the possibility of limiting the osmotic pressure has led to proposals for the use of subcritical fermentation modes due to the balance of quantitative indices of pressure C₂H₅OH and the simultaneous extraction of it from the fermented medium.

The obtained mathematical dependences imply the possibility of intensive influence on the gas-holding capacity and hydrodynamic modes by variable pressures in gas volumes. The consequence of the latter is the regulated effects on the dissolved gas phase concentration indicator, which is associated with the mass transfer resistance at the interface between the yeast cells and the liquid phase.

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В БРОДИЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

А. І. Соколенко, О. Ю. Шевченко, С. І. Літвинчук

Національний університет харчових технологій

У статті проведено аналіз сукупності перехідних процесів, характерних для технології анаеробного зброджування цукровмісних середовищ, енерго-матеріальних трансформацій і пошуків взаємозв'язків між параметрами, що характеризують названу сукупність.

За відомого обмежувального фактора на кінцевому етапі бродіння — осмотичного тиску розчинених речовин — виконано оцінку можливостей інтенсифікації масообмінних процесів на основі використання внутрішніх енергетичних факторів газорідинних середовищ. Основним чинником гідродинамічного стану визначено газотримувальну здатність, запропоновано відповідні математичні формалізації. На основі законів Гей-Люссака, Архімеда, третього закону Ньютона вперше запропоновано перехід від оцінки газотримувальної здатності до оцінки енергетичного потенціалу циркуляційних контурів.

Пошуки можливостей обмеження осмотичних тисків підтвердили доцільність використання докритичних режимів бродіння за рахунок балансів кількісних показників тиску C_2H_5OH і синхронного вилучення його зі зброджуваного середовища.

Одержані математичні залежності підтвердили можливість інтенсивного впливу на газотримувальну здатність і гідродинамічні режими змінними тисками в газових об'ємах. Наслідком останніх є регульовані впливи на показник концентрації розчиненої газової фази, з якою пов'язують опір масопередачі на межі поділу поверхонь контактування дріжджових клітин з рідинною фазою.

Ключові слова: перехідні процеси, бродильні технології, анаеробне зброджування, енергоматеріальні трансформації, газотримувальна здатність.

Постановка проблеми. Перебіг будь-якого процесу потребує енергетичного підґрунтя у формі хімічних, теплових, електричних, механічних потенціалів, рівень яких визначається відповідними параметрами. Останні поділяються на рушійні та параметри опору і зміни хоча б одного з них вказують на можливість реалізації перехідного процесу, результатом якого є зміна концентрацій речовин за рахунок хімічних реакцій, біохімічних, механічних або термодинамічних взаємодій в енергетичних потенціалах, досягнення фазових переходів тощо. Важливо, що з точки зору оцінки наявності перехідних процесів у більшості випадків можливо прийти до бачення кількох їх рівнів. Так, наприклад, анаеробне зброджування цукровмісних середовищ у загальній оцінці має відповідати поняттю перехідний процес хоча б за початковими і кінцевими результатами його перебігу. Водночас у його структурі відбуваються енергетичні трансформації, деструкція вхідного енергоматеріального потоку цукрів і синтез спирту та діоксиду вуглецю в ендогенних процесах [1—3], зміни осмотичних тисків і концентрацій розчиненого CO_2 утворення диспергованої газової фази, конвективне перемішування в самопливних

процесах за примусового охолодження тощо. Наведений перелік процесів, навіть з програмованими трансформаціями [4; 5], вказує на відносну складність забезпечення оптимальних або хоча б раціональних їх перебігів.

Стратегічне завдання ендогенного синтезу спирту потребує забезпечення живлення і номінальних термодинамічних параметрів і це за наявності внутрішнього протиріччя в основній задачі, оскільки синтез C_2H_5OH означає зростання осмотичних тисків до рівнів, які оцінюються критичними. Ця основна перепона означає, що подальший напрямок удосконалення технологій анаеробного зброджування цукровмісних середовищ має стосуватися докритичних по осмотичних тисках режимів, які мають бути стабілізованими в динамічному плані. Така стабілізація досягається рівноважним з синтезом виведенням з культурального середовища спирту, наприклад, за рахунок суміщення процесів бродиння і перегонки.

Реалізація названого суміщення потребує забезпечення тисків у системах, за яких їх значення відповідатимуть температурам фазових переходів не вище $32^{\circ}C$. Однак забезпечення умов міцності бродильних апаратів при тисках $0,004\dots 0,005$ МПа за геометричних параметрів у кілька десятків m^3 є складним і економічно недоцільним. Проте вихід із такої ситуації стосується створення локальних об'ємів зі зниженими до названих параметрів тисків [6—8]. Важливо, що за таких умов енергетичне забезпечення фазового переходу забезпечується за рахунок теплоти бродиння.

Наявність диспергованої фази CO_2 , об'єму газової фази в надрідинному просторі і досвід використання спиртовловлювачів вказують на можливість детермінованої організації видалення спирту з газовою фазою за використання посиленних циркуляційних контурів [9; 10]. Важливо також, що останні потужно доповнюють гідродинамічні режими середовищ за рахунок таких показників, як приведені швидкості газової фази, швидкості спливання диспергованої газової фази і газоутримувальна здатність.

Мета дослідження: розробка математичних формалізацій відображення перебігів перехідних процесів для одержання оцінок впливів фізичних параметрів середовищ і геометричних параметрів бродильних апаратів.

Матеріали і методи. Використано феноменологічні узагальнення відомих принципів і законів для відображення перехідних процесів з відповідними енергоматеріальними трансформаціями на основі взаємозв'язків між геометричними, гідродинамічними і термодинамічними параметрами середовищ.

Результати дослідження. Оскільки важливим фактором впливу названо величину приведеної швидкості газової фази, яка визначається відношенням об'ємного потоку CO_2 до площі поперечного перерізу бродильного апарата, то це означає, що впливовим фактором додатково мають визначатися його геометричні параметри:

$$w_{пр} = \frac{V_{CO_2}}{F_{ап}} = \frac{4V_{CO_2}}{\pi d_{ап}^2}, \text{ м/с}, \quad (1)$$

де V_{CO_2} — об'ємний потік газової фази, задіяний у циркуляційному контурі, m^3/c ; $F_{ап} \cos^{-1}(\theta)$ і $d_{ап}$ — відповідно, площа поперечного перерізу (m^2) і діаметр апарата (м).

Важливість геометричних параметрів бродильних апаратів можливо відслідкувати на історії створення їх у пивоварній галузі, яка відображена в сучасних циліндро-конічних танках (ЦКТ) зі значними діапазонами об'ємів і співвідношень розмірів діаметрів (від 3 до 5 м) до висот (від 10 до 40 м).

Абсолютні розміри апаратів та їх кількість визначаються на основі проєктованої виробничої потужності, динаміки в організації процесів і термодинамічних параметрів їх здійснення. Одночасно з цим мають бути враховані співвідношення діаметрів і висот їх циліндричних і конічних частин, оскільки від них залежить рівень наближення до вимоги мінімізації витрат матеріалів на їх створення. З точки зору інтересів стабілізації температурних режимів вагоме значення має питома поверхня охолодження, яка визначається відношенням відповідної поверхні до об'єму середовища. При цьому очевидно, що два з числа останніх параметри знаходяться в протиріччі. Внутрішня неузгодженість притаманна і задачі вибору об'єму бродильного апарата, оскільки він визначається кубом лінійних параметрів, а поверхня охолодження — їх квадратом.

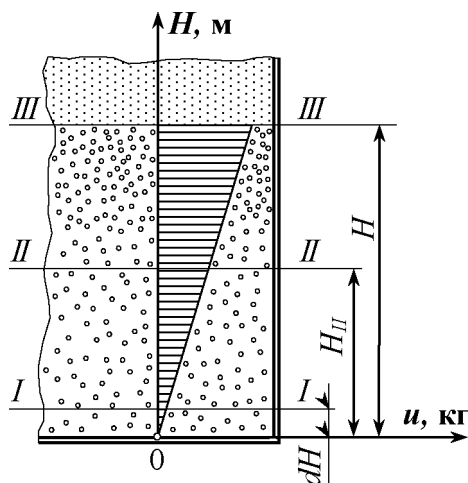


Рис. Схема визначення розподілу газової фази в середовищі циліндричного апарата

Важливість вибору геометричних параметрів бродильних апаратів значно підсилюється їх впливом на гідродинаміку газорідних середовищ. Існування такого впливу підтверджується використанням приведеної швидкості газової фази, що примусово подається в рідинну фазу на фіксованому рівні заглиблення. Така ситуація може оцінюватися як дещо спрощена порівняно з випадками анаеробного бродіння, в яких синтез диспергованої фази CO_2 відбувається у всьому об'ємі. Це означає, що газоутримувальна здатність u буде змінною по висоті і зростаючою по координаті H (див. рис.).

Математичні формалізації для випадку циліндричного апарата відобразимо в припущенні, що на фіксованому проміжку часу t швидкість синтезу m_{CO_2}/dt є величиною, сталою у всьому об'ємі середовища. Тоді в елемен-

тарному об'ємі dV , що відповідає елементарній висоті dH , синтезується газовий потік у кількості:

$$dM_{\text{CO}_2} = \frac{dm_{\text{CO}_2}}{dt} F_{\text{ан}} dH, \text{ кг/с.} \quad (2)$$

Інтегрування в заданих межах приводить до значень:

$$M_{\text{CO}_2}^{\text{II}} = \int_0^{H_{\text{II}}} \frac{dm_{\text{CO}_2}}{dt} F_{\text{ан}} dH = \frac{dm_{\text{CO}_2}}{dt} F_{\text{ан}} H_{\text{II}}, \text{ кг/с} \quad (3)$$

і для перерізу III-III отримаємо:

$$M_{\text{CO}_2}^{\text{III}} = \frac{dm_{\text{CO}_2}}{dt} F_{\text{ан}} H, \text{ кг/с.} \quad (4)$$

Лінійний характер залежності $M_{\text{CO}_2} = M_{\text{CO}_2}(H)$ вказує на можливість визначити залежність щодо газотримувальної здатності. При цьому приймемо припущення, що час перебування кожної бульбашки в середовищі складає:

$$t_{(\text{пл})} = \frac{H - H_{(\text{пл})}}{w}, \text{ с,} \quad (5)$$

де $H_{(\text{пл})}$ — плинна координата газової бульбашки, м; w — швидкість спливання бульбашок диспергованої газової фази, м/с.

Для масиву бульбашок, обмеженого значенням $H_{(\text{пл})}$, середній плинний час спливання визначається формулою:

$$t_{(\text{пл})} = \frac{H - H_{(\text{пл})}/2}{w} \sqrt{2}, \text{ с.} \quad (6)$$

Тоді для кожного плинного перерізу отримуємо:

$$u_{(\text{пл})} = \frac{dm_{\text{CO}_2}}{dt} F_{\text{ан}} H_{(\text{пл})} t_{(\text{пл})} = \frac{\frac{dm_{\text{CO}_2}}{dt} F_{\text{ан}} H_{(\text{пл})} \left(H - \frac{H_{(\text{пл})}}{2} \right)}{w}, \text{ кг.} \quad (7)$$

У наведеній методиці розрахунків газотримувальна здатність з розмірністю кг стосується всього об'єму рідинної фракції. Перехід до значень об'ємів диспергованої газової фракції здійснимо на основі рівняння універсального стану Менделєєва-Клапейрона:

$$PV_{(\text{пл})} = u_{(\text{пл})} RT, \text{ Дж,} \quad (8)$$

де P — середнє значення тиску в системі, Па; $V_{(\text{пл})}$ — плинний об'єм газової фракції в середовищі, м³; R — універсальна газова стала, Дж/(кг·К); T — абсолютна температура газової фракції, К.

Звідси плинний об'єм газової фракції становить:

$$V_{(\text{пл})} = \frac{\frac{F_{\text{ан}} H_{(\text{пл})}}{P} \cdot \frac{dm_{\text{CO}_2}}{dt} \left(H - \frac{H_{(\text{пл})}}{2} \right)}{w'}, \text{ м}^3. \quad (9)$$

Середнє значення тиску в системі обчислюється з урахуванням складової P_0 зовнішнього для газорідного середовища тиску і гідростатичного тиску:

$$P = P_0 + \frac{\rho g H}{2} T, \text{ Па.} \quad (10)$$

Оскільки $H_{(пл)} = H$, то умова (9) трансформується до виду:

$$V = \frac{F_{ан} H^2}{2P} \cdot \frac{dm_{CO_2}}{w'}, \text{ м}^3, \quad (11)$$

а з умови (7) випливає:

$$u = 0,5 F_{ан} H^2 \frac{dm_{CO_2}/dt}{w'}, \text{ кг.} \quad (12)$$

З наведеного приходимо до висновку, що газотримувальна здатність в обох формах представлення пропорційна квадрату висоти газорідного шару. Важливість збільшення цього фактора впливу покажемо на основі таких міркувань: відомо, що диспергована газова фаза, як і будь-яке інше тіло, в рідинній фазі отримує силову дію відповідно до закону Архімеда, стимулюючи режими спливання. Величина цієї силовій дії визначається рівнем ваги рідинної фази, що витісняється газовою бульбашкою. Окрім того, не існує жодних заперечень стосовно того, що весь масив газової фази відповідно до принципу суперпозиції підлягає такій силовій дії. Очевидно, що архімедову силу слід визнавати рушійною, під дією якої розпочинається перехідний процес від моменту утворення бульбашки. Початку переміщення відповідає сила опору середовища, а завершення перехідного процесу досягається за їх рівності:

$$\rho g V_6 = \xi f \frac{w^2}{2}, \quad (13)$$

де ρ — питома маса рідинної фракції, кг/м^3 ; g — прискорення вільного падіння, м/с^2 ; $V_6 \cos^{-1}(\theta)$ — об'єм бульбашки, м^3 ; ξ — коефіцієнт опору середовища, який залежить від властивостей рідинної фракції, форми бульбашки; f — площа проекції бульбашки, перпендикулярна до напрямку руху, м^2 ; w — швидкість спливання бульбашки, м/с , в культуральних середовищах близька до значень 0,25...0,27 м/с .

Виконання умови (13) означає вирівнювання силових дій, що показує доцільність звернення до третього закону Ньютона. Це доводить, що існування диспергової газової фази не тільки призводить до руйнування суцільності рідинної фракції, а і переводить її в напружений стан, проявом якого є утворення циркуляційних контурів з інтегральною силовою дією:

$$S = \rho g V. \quad (14)$$

З урахуванням умови (11) можна записати:

$$S = \rho g \frac{F_{ан} H^2}{2P} \cdot \frac{dm_{CO_2}}{w'}. \quad (15)$$

Співвідношення параметрів, записані умовою (15), відповідають усталеному режиму перебігу процесів. Це означає сталу швидкість синтезу диспергованої газової фракції і стабілізований тиск. Однак абсолютно виразно видно, до яких змін приводить зміна тиску в системі. Очевидно, що найбільш доступним фактором варіювання є тиск P_0 у газовій надрідинній фазі. Його зниження синхронно викликає реакцію системи на збільшення газотримувальної здатності і силової дії S на підвищення інтенсивності циркуляційних контурів. Проте така термодинамічна реакція системи у формі розширення диспергованої газової фракції не є повним завершенням відгуку системи, оскільки зниження тиску обумовлює зменшення розчинності CO_2 і призводить до певного рівня десатурації й утворення додаткової газової фази. Однак така ситуація означає вихід за межі усталеного режиму і перехід до нового перехідного процесу, який заслуговує на спеціальне дослідження.

Наведені математичні формалізації стосуються узагальнень у відображенні фізичних явищ в сукупності їх перебігів. Взаємні впливи і трансформації відповідають принципу Ле Шательє і закону найбільш імовірного стану середовищ, що знаходить прояв у використанні трьох понять щодо швидкостей газової фази. Перше з них стосується приведеної швидкості (умова (1)), друге — відносної швидкості спливання диспергованої газової фракції (умова (13)), а у формулах (9), (11), (12) і (15) фігурують значення абсолютної швидкості спливання газової фази. При цьому остання на основі принципу суперпозиції визначається сумою відносної і швидкості рідинної фази в циркуляційних контурах:

$$w' = w + w_{\text{рід}}. \quad (16)$$

Оскільки наявність газової фракції в рідинній супроводжується і оцінюється кількісно рівнем набухання середовища, то це означає можливість визначення абсолютної швидкості w' з умови (11) і здійснення переходу до визначення швидкості рідинної фази у висхідних частинах циркуляційних контурів. Але замкнутість останніх і наявність у дії закону нерозривності потоків призводять до висновку про те, що швидкості руху рідинної фази у висхідних і опускних об'ємах контурів збігаються. Таке припущення наближає до можливості оцінки енергетичного потенціалу сукупності циркуляційних контурів, а у розрахункових формулах має фігурувати маса рідинної фракції:

$$E = m_{\text{рід}} \frac{w_{\text{рід}}^2}{2} = m_{\text{рід}} \frac{(w' - w)^2}{2}, \text{ Дж.} \quad (17)$$

Значення потужності циркуляційних контурів визначається добутком інтегральної силової дії на швидкість точок її прикладання у формі:

$$N = \rho g \frac{F_{\text{ан}} H^2 (w' - w)}{2Pw'} \cdot \frac{dm_{\text{CO}_2}}{dt} \sin^{-1}(\theta), \text{ Вт.} \quad (18)$$

Наведені розрахункові залежності дають можливість оцінки впливу висоти рідинної і газорідинної фракцій на інтенсивність перебігу процесів як у плинних значеннях, так і в кінцевому варіанті відповідно до гідродинамічних і енергетичних параметрів анаеробного самопливного синтезу газової фракції на основі інших геометричних і термодинамічних параметрів.

Висновки

Сукупність процесів у технологіях анаеробного зброджування цукровмісних середовищ у зв'язку зі змінними параметрами їх перебігу мають ознаки перехідних і таких, які відбуваються в режимах певних послідовностей і супроводжуються трансформаціями матеріальних та енергетичних потоків. Визначальним чинником таких змін є швидкість зброджування цукрів, яка, визначаючи динаміку змін матеріальних і термодинамічних параметрів, у зворотному зв'язку залежить в узагальненій формі від гідродинамічного стану.

Газоутримувальна здатність середовища, у свою чергу, залежить від геометричних параметрів, оскільки вони визначають значення приведеної газової фази, яка в умовах анаеробних умов бродиння має яскраво виражену висотну нерівномірність у зв'язку з генеруванням CO₂ у всьому об'ємі. Одержані аналітичні залежності стосуються кількостей генерованого діоксиду вуглецю з вказівкою на вплив геометрії бродильних апаратів. Запропоновано фізичне обґрунтування визначення енергетичних потенціалів газорідних середовищ у сполученні закону Архімеда і третього закону Ньютона, доведено можливість впливів на газоутримувальну здатність і гідродинамічні режими змінами тисків у газових надрідних об'ємах бродильних апаратів.

Література

1. Sokolenko A., Shevchenko O., Vasylykivskyi K., Stepanets O., Maksymenko I., Shevchenko A. (2018), *Intensification of energy and mass exchange processes in fermentation technologies: monograph*, Ruse University «Angel Kanchev», Ruse.
2. Шиян П. Л., Сосницький В. В., Олійничук С. Т. Інноваційні технології спиртової промисловості. Теорія і практика. К.: Асканія, 2009. 424 с.
3. Sokolenko A., Shevchenko O., Maksymenko I., Vinnichenko I., Kostyuk V. (2017), Osmotic pressure in the fermentation media technologies, *Ukrainian Food Journal*, Vol. 6, Is. 1, P. 134—140.
4. Кунце В. Технология солода и пива; пер. с нем. С.-Пб.: Профессия, 2001. 912 с.
5. Технологія спирту: підруч. / В. О. Маринченко, В. А. Домарецький, П. Л. Шиян та ін.; під ред. проф. В. О. Маринченка. Вінниця: «Поділля-2000», 2003. 496 с.
6. Патент 103440 UA, МПК C12G 3/10 (2006.01), B01D 3/10 (2006.01), C12C 7/22 (2006.01) Система зброджування сусла у виробництві етанолу / Соколенко А. І., Піддубний В. А., Максименко І. Ф.; заявник Національний університет харчових технологій. — № а201212910; заявл. 13.11.2012; опубл. 10.10.2013, Бюл. № 19, 2013 р.
7. Патент 107407 UA, МПК C12F 3/08 (2006.01) Бродильний апарат / Чагайда А. О., Піддубний В. А., Соколенко А. І., Пімінова Г. А.; заявник Національний університет харчових технологій. — № а201305631; заявл. 30.04.2013; опубл. 25.12.2014, Бюл. № 24, 2014 р.
8. Патент 124159 UA, МПК C12G 3/10 (2006.01), C12P 7/06 (2006.01) Система зброджування сусла у виробництві етанолу / Шевченко О. Ю., Соколенко А. І., Степанець О. І., Максименко І. Ф.; заявник Національний університет харчових технологій. — № u201709860; заявл. 11.10.2017; опубл. 26.03.2018, Бюл. № 6, 2018 р.
9. Інтенсифікація енерго- масообмінних процесів в культуральних середовищах бродильних і мікробіологічних виробництв: монографія / Соколенко А. І., Шевченко О. Ю., Васильківський К. В. та ін. Київ: Видавничий дім «Кондор», 2018, 212 с.
10. Патент 104401 UA, МПК C12F 3/08 (2006.01), C12M 1/00 (2014.01) Бродильний апарат / Криворотько В. М., Соколенко А. І., Максименко І. Ф., Бойко О. О.; заявник Національний університет харчових технологій. — № а201305632 ; заявл. 30.04.2013; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 2, 2014 р.