

УДК 628.33: 663.14

КІНЕТИКА МАСОПЕРЕНОСУ КИСНЮ З ПОВІТРЯНИХ БУЛЬБАШОК У ПРОЦЕСАХ БІОСИНТЕЗУ ДРІЖДЖОВОЇ БІОМАСИ

Г. К. Іваницький, О. М. Ободович, доктори технічних наук

В. В. Сидоренко, інженер

Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

e-mail: tdsittf@ukr.net

Анотація. Проведено аналітичне дослідження кінетики абсорбції кисню культуральною рідиною з повітряних бульбашок у процесі вирощування дріжджової біомаси у ферментері в умовах глибинної аерації. Визначено залежності поверхневого та об'ємного коефіцієнтів масовіддачі від середнього розміру газових бульбашок

Ключові слова: вирощування дріжджів, аерація, абсорбція, газовміст, поверхня контакту фаз, масообмін, моделювання.

Для вирощування аеробних мікроорганізмів, до яких, зокрема, належать кормові або хлібопекарні дріжджі, потрібен розчинений молекулярний кисень. Для насичення культурального середовища киснем доцільно застосовувати глибинну аерацію і подавати в ферментер повітря у вигляді дрібнодисперсних бульбашок, які, по можливості, рівномірно розподіляються в об'ємі культуральної рідини. Кисень із повітряних бульбашок абсорбується рідиною, а потім переноситься до клітин мікроорганізмів. Ефективність аерації відіграє вирішальну роль у збільшенні виходу дріжджів та підвищенні їх якості.

Перенос кисню з газової фази до клітин мікроорганізмів відбувається в два етапи. На першому етапі кисень переходить з повітряних бульбашок в об'єм рідини; на другому - абсорбований кисень переходить з рідини в клітини внаслідок градієнту концентрації і дії турбулентних пульсацій. Відомо, що швидкість переносу кисню до клітин лімітується, насамперед, інтенсивністю процесів, які протікають на першому етапі.

Найраціональнішим способом прискорення процесу абсорбції кисню є підвищення об'ємного коефіцієнта масовіддачі [1-3]. Цей коефіцієнт є добутком поверхневого коефіцієнта масовіддачі через поверхню газ-рідина на питому поверхню контакту фаз. Зменшуючи розмір повітряних бульбашок і підвищуючи величину об'ємного газовмісту повітря, диспергованого в культуральній рідині, можна значно збільшити поверхню контакту фаз і таким чином інтенсифікувати процес переносу кисню до рідини [1,2].

Мета досліджень – аналітичне визначення залежності величин поверхневого і об'ємного коефіцієнтів масовіддачі, питомої поверхні контакту фаз і об'ємного газовмісту від розміру повітряних бульбашок, а також вивчення впливу цих параметрів на кінетику процесів глибокого культивування аеробних мікроорганізмів.

Матеріали та методика досліджень. Оцінка необхідної подачі кисню до дріжджових клітин у процесі їх вирощування визначається з умови рівності швидкості перенесення кисню з газової фази в рідину G_{gl} і швидкості споживання кисню клітинами G_{lc} .

Питома швидкість абсорбції $\tilde{G}_{gl} = G_{gl}/V_l$, тобто кількість кисню, що надходить в рідину з повітряних бульбашок, які містяться в одиниці об'єму рідини, визначається з рівняння

$$\tilde{G}_{gl} \equiv \frac{d\tilde{m}_{O_2}}{d\tau} = k_L \tilde{S}_{gl} (c_{sat} - c_p), \quad (1)$$

де $\tilde{m}_{O_2} = m_{O_2}/V_l$ - питома значення маси розчиненого кисню в одиниці об'єму культурального середовища, кг/м³; k_L - коефіцієнт масопередачі кисню через поверхню газ-рідина, м/с; $\tilde{S}_{gl} = S_{gl}/V_l$ - питома площа поверхні контакту фаз, м⁻¹; V_l - загальний об'єм рідини в апараті, м³; c_{sat} - концентрація насичення кисню в культуральній рідині, кгO₂/м³; c_p - поточна концентрація розчиненого кисню в об'ємі культуральної рідини, кгO₂/м³.

Враховуючи, що, $\tilde{m}_{O_2} \dot{\equiv} c_p$, запишемо рівняння (1) у вигляді

$$\frac{dc_p}{d\tau} = k_L \tilde{S}_b (c_{sat} - c_p) \quad (2)$$

В рівнянні (2) невизначеною є величина питомої площі поверхні контакту фаз \tilde{S}_{gl} . Проведемо оцінку цього параметру.

Діаметр одиничної сферичної бульбашки d_b і площа її поверхні S_b пов'язані з об'ємом бульбашки V_{b1} співвідношеннями $d_b = \sqrt[3]{6V_{b1}/\pi}$ і $S_b = \pi \sqrt[2]{6V_{b1}/\pi}$. При заданих середніх значеннях \bar{d}_b та об'ємного вмісту газових бульбашок в одиниці об'єму рідини $\tilde{V}_g = V_g/V_l$ кількість бульбашок в одиниці об'єму рідини визначається як $\tilde{n}_b = \tilde{V}_g/V_{b1}$. Тоді сумарна поверхня газових бульбашок, що містяться в одиниці об'єму рідини, дорівнює

$$\tilde{S}_{gl} = S_b \tilde{n}_b = \left(\frac{36\pi}{V_{b1}} \right)^{1/3} \tilde{V}_g \quad (3)$$

У цьому рівнянні невизначеним параметром є питомий об'єм сукупності бульбашок $\tilde{V}_g = V_g/V_l$. Проведемо оцінку цього параметру.

При аналізі процесів вирощування біомаси в барботажних ферментерах зазвичай застосовують поняття об'ємного газовмісту $\varepsilon = V_g/(V_g + V_l)$ як відношення об'єму газової фази до об'єму газорідинної суміші в апараті. При проведенні попередніх розрахунків звичайно застосовують значення $\varepsilon = 0,3$ [4].

У цьому дослідженні ми застосовуємо величину ефективного газовмісту ε_l як відношення об'єму газової фази V_g до об'єму рідини в апараті V_l

$$\varepsilon_l = \frac{V_g}{V_l} = \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \quad (4)$$

Очевидно, що $\varepsilon_l > \varepsilon$. При $\varepsilon = 0,3$ значення $\varepsilon_l = 0,43$.

З рівняння (4) випливає, що $\tilde{V}_g = V_g/V_l = \varepsilon_l$. Підставляючи в (3) значення $\tilde{V}_g = \varepsilon_l$ та $V_{b1} = \pi d_b^3/6$, знаходимо питому площу поверхні контакту фаз

$$\tilde{S}_{gl} = \frac{6\varepsilon_l}{d_b} \quad (5)$$

Після підстановки значення \tilde{S}_{gl} з (5) в рівняння (2) одержимо рівняння, що описує зміну з часом концентрації розчиненого кисню c_p в процесі абсорбції.

$$\frac{dc_p}{d\tau} = k_L \tilde{S}_b (c_{sat} - c_p) = \frac{6k_L \varepsilon_l}{d_b} (c_{sat} - c_p) \quad (6)$$

Параметр $k_L \tilde{S}_{gl}$ у правій частині (6) визначає об'ємний коефіцієнт масовіддачі β_V . З урахуванням цього параметру рівняння (6), яке визначає швидкість абсорбції кисню, можна представити у вигляді

$$\frac{dc_p}{d\tau} = \beta_V (c_{sat} - c_p) \quad (8)$$

Об'ємний коефіцієнт масовіддачі β_V розраховується за формулою

$$\beta_V = \frac{6k_L \varepsilon_l}{d_b} \quad (9)$$

Поверхневий коефіцієнт масопередачі k_L будемо визначати в рамках пенетраційної теорії Хігбі [3,5,6], згідно якої перенос газу з бульбашки у рідину відбувається внаслідок нестационарної молекулярної дифузії через шар рідинної плівки на поверхні бульбашки, яка постійно оновлюється в процесі руху бульбашки відносно рідини. В моделі Хігбі коефіцієнт масопередачі k_L пов'язаний з відносною швидкістю бульбашки рівнянням

$$k_L = \sqrt{\frac{2D_{gl}v_b}{\pi R_b}}, \quad (10)$$

де D_{gl} - коефіцієнт молекулярної дифузії кисню в рідині; v_b - швидкість спливання бульбашки; $R_b = d_b/2$ - радіус спливаючої бульбашки.

На підставі результатів дослідження, представлених в роботах [5,6], встановлено, що для малих значень числа Рейнольдса ($Re = v_b d_b / \eta_l < 2$) залежність швидкості спливання газової бульбашки в рідині від її радіуса визначається з формули $v_b = k_1 R_b^2$, а при більш високих числах Рейнольдса ($2 < Re < 500$) - з формули $v_b = k_2 R_b^{8/7}$. Коефіцієнти k_1 і k_2 залежать лише від

кінематичної в'язкості рідини η_l і від величини коефіцієнта дифузії D_{gl} . В роботі [4] зазначено, що в процесі вирощування біомаси дріжджів динамічну в'язкість культуральної рідини $\mu_{к.р.} = \eta_{к.р.} \rho_{к.р.}$ можна оцінювати по формулі

$$\mu_{к.р.} = \mu_v \cdot \exp(0,2 \cdot c_{бм}),$$

де μ_v - динамічна в'язкість чистої води; $c_{бм}$ - кількість сухої біомаси в % мас. Згідно цієї формули в процесі вирощування біомаси дріжджів динамічна в'язкість культуральної рідини змінюється в інтервалі 1 ÷ 5 мПа·с. Коефіцієнт дифузії розчиненого кисню в культуральної рідині приймається рівним коефіцієнту дифузії кисню в чистій воді $D_{gl} = 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ (при 30°C) [3,4].

Розраховуючи значення коефіцієнтів $k_1 = f(Re)$ і $k_2 = f(Re)$ для конкретної рідини, можна визначити аналітичні залежності $\nu_b = f(Re)$ в зазначених інтервалах чисел Re . Після підстановки одержаних залежностей $\nu_b = f(Re)$ в рівняння (10) визначаємо залежності поверхневого коефіцієнта масопередачі від розміру бульбашки - $k_L = f(d_b)$. На основі проведеного аналізу одержано наступні формули для визначення залежностей $k_L = f(d_b)$

$$k_L = 0,463 \sqrt{d_b} \quad \text{при } Re \leq 1,917; \quad (11-a)$$

$$k_L = 0,0725 \sqrt{d_b^{1/7}} \quad \text{при } Re > 1,917. \quad (11-б)$$

При розрахунку діаметра d_b в см коефіцієнти k_L визначаються в см/с.

Після підстановки одержаних значень k_L в рівняння (9) визначаємо об'ємний коефіцієнт масовіддачі $\beta_V = f(d_b)$. Відповідно до спливання повітряних бульбашок у воді ($\eta_l = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) залежності $\beta_V = f(d_b)$ можна представити у наступному вигляді

$$\beta_V = 2,775 \cdot \varepsilon \cdot d_b^{-0,5} \quad \text{при } Re \leq 1,917; \quad (12-a)$$

$$\beta_V = 0,435 \cdot \varepsilon \cdot d_b^{-0,93} \quad \text{при } Re > 1,917. \quad (12-б)$$

В цих формулах об'ємні коефіцієнти масовіддачі β_V визначаються в с^{-1} .

Одержані залежності застосовуються при вирішенні рівняння (8), що описує швидкість масопереносу кисню в процесі абсорбції. На основі одержаних результатів проведено розрахунки питомої швидкості абсорбції кисню рідиною рідині $\tilde{G}_{gl} = dc_p/d\tau$, або маси кисню, що абсорбується з бульбашок в одиницю часу в одиницю об'єму культуральної рідини. Швидкість абсорбції \tilde{G}_{gl} визначалась в залежності від середнього діаметра бульбашок \bar{d}_b . Розрахунки проведено для об'ємного в'язності $\varepsilon_l = 0,43$.

При розрахунках застосовано значення концентрації насичення розчиненого кисню в культуральній рідині $c_{sat} = 5,2$ мг/л, що відповідає даним, наведеним в роботі [4].

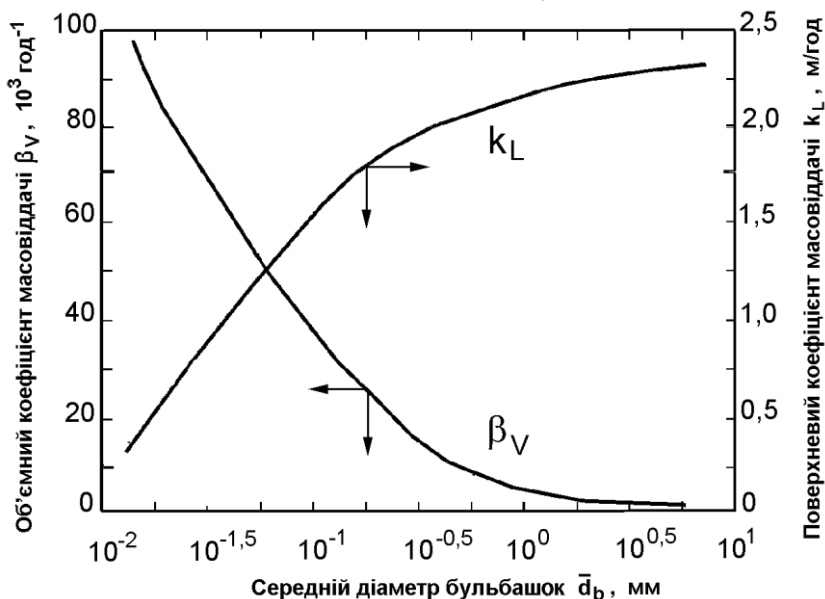
Рівноважну концентрацію розчиненого в культуральній рідині кисню c_p визначали із співвідношенню $c_p = 0,4 \cdot c_{sat} = 2,2$ мг/л.

Результати досліджень. Значення параметрів, які визначають швидкість абсорбції кисню - v_b , k_L , \tilde{S}_{gl} , β_V залежно від середнього діаметра \bar{d}_b диспергованих у рідині повітряних бульбашок, наведені в таблиці. В останньому рядку таблиці представлено в залежності від середнього діаметру бульбашок також величини швидкості абсорбції кисню культуральною рідиною в перерахунку на одиницю об'єму рідини - $\tilde{G}_{gl} = f(\bar{d}_b)$. Розрахунки проведено при стандартних значеннях ефективного об'ємного газівмісту $\varepsilon_l = 0,43$.

Залежність параметрів абсорбції від середнього діаметру бульбашок \bar{d}_b .

Параметри	Розраховані величини							
	0,01	0,05	0,1	0,2	0,4	1,2	1,6	2,0
R_b , мм	0,0054	0,136	0,54	1,72	3,8	13,34	18,5	24
v_b , см/с	13,2	29,4	41,6	52,3	55,0	59,5	60,7	61,7
k_L , 10 ⁻³ см/с	2600	520	260	130	65	22	16	13
\tilde{S}_{gl} , см ⁻¹	34,22	15,29	10,82	6,80	3,575	1,31	1,07	0,87
β_V , с ⁻¹								

Характер залежності величин поверхневого коефіцієнту масопереносу k_L , та об'ємного коефіцієнту масовіддачі β_V від середнього діаметру повітряних бульбашок \bar{d}_b показано на рисунку.



Залежності поверхневого k_L та об'ємного β_V коефіцієнтів масовіддачі від середнього діаметра бульбашок \bar{d}_b

З даних, представлених на рисунку і в таблиці витікає, що із збільшенням діаметра бульбашок поверхневий коефіцієнт масовіддачі k_L зростає, а об'ємний коефіцієнт масовіддачі β_V суттєво зменшуються. Це пояснюється різким зростанням поверхні контакту фаз \tilde{S}_{gl} із зменшенням розміру бульбашок в культуральному середовищі при постійній величині газовмісту ε .

Висновки

Сформульовано основні положення для теоретичного аналізу умов постачання необхідної кількості кисню культурам аеробних мікроорганізмів. Застосовано традиційні припущення щодо масопередачі кисню з газової в рідинну фазу, в яких основним параметром є об'ємний коефіцієнт масовіддачі β_V , який залежить від величини газовмісту в культуральній рідині при різних умовах аерації та перемішування. У результаті проведених досліджень

зроблено висновок, що основоположним напрямком за застосування аерації для вирощування мікроорганізмів є забезпечення збільшення площі поверхні контакту фаз за рахунок зменшення розмірів спливаючих бульбашок.

Список літератури

1. Дмитриев С. А. Интенсификация технологического процесса выращивания хлебопекарных дрожжей на основе усовершенствования аэрации: автореф. дисс. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.18.07. "Технология продуктов брожения, алкогольных и безалкогольных напитков" / С.А. Дмитриев. – М., 1993 – 24 с.

2. Бошнятов Б.В. Гидродинамика микропузырьковых газожидкостных сред / Б.В. Бошнятов //Изв. Томск. политехн. ун-та. – 2005. – Т.308, №6. – С.161–164.

3. Математическое моделирование процессов массопередачи кислорода в жидкость из всплывающего пузырька воздуха. / С.Ю.Андреев [и др.]. // Труды междунар.симпоз. "Надежность и качество".. – Пенза, 2013. –. Т.1. –С.13.–17.

4. Разработка и проектирование ферментационного оборудования для аэробного культивирования одноклеточных микроорганизмов / А.Г.Новоселов [и др.]. – СПб.: НИУ ИТМО, ИХиБТ, 2014. – 91 с.

5. Кутателадзе С.С. Гидравлика газо-жидкостных систем. / С.С. Кутателадзе, М.А.Стырикович. – М.: Госэнергоиздат. 1958. – 232 с.

6. Бронштейн Б.И. Гидродинамика, массо- и теплообмен в дисперсных системах. / Б.И.Бронштейн, Г.А.Фишбейн. – Л.: Химия, 1977. – 280 с.

КИНЕТИКА МАССОПЕРЕНОСА КИСЛОРОДА ИЗ ПУЗЫРЬКОВ ВОЗДУХА В ПРОЦЕССАХ БИОСИНТЕЗА ДРОЖЖЕВОЙ БИОМАССЫ

Г. К. Иваницкий, А. Н. Ободович, В. В. Сидоренко

Аннотация. Проведено аналитическое исследование кинетики абсорбции кислорода культуральной жидкостью из пузырьков воздуха в процессе выращивания дрожжевой биомассы в ферментере в условиях глубинной

аэрации. Определены зависимости поверхностного и объемного коэффициентов массоотдачи от среднего диаметра газовых пузырьков.

Ключевые слова: *выращивание дрожжей, аэрация, абсорбция, газосодержание, поверхность контакта фаз, массообмен, моделирование*

KINETICS OF THE MASS TRANSFER OF OXYGEN FROM AIR BUBBLES IN THE PROCESSES OF YEAST BIOSYNTHESIS

G. Ivanitsky, A. Obodovich, V. Sidorenko

Annotation. *The analytical study has been carried out to throw light on the kinetics of oxygen absorption from air bubbles in a culture medium in the process of cultured of the yeast biomass in the bubble-type fermenters. The quantitative dependences of both the surface and volumetric mass transfer coefficients on the average diameter of the gas bubbles have been determined.*

Key words: *yeast cultured, aeration, absorption, gas content of the liquid, interface, modeling*