

УДК 663.14. 033, 663.143.2

**ВПЛИВ МАСОПЕРЕНОСУ НА КІНЕТИКУ ПРОЦЕСУ
МІКРОБІОЛОГІЧНОГО СИНТЕЗУ**

А. Н. Ободович, Г. К. Іваницький, доктори технічних наук

В. В. Сидоренко, інженер

Інститут технічної теплофізики, м. Київ

О. В. Подобій, кандидат технічних наук

Національний університет харчових технологій, м. Київ

e-mail: tdsittf@ukr.net

Анотація. *Наведено аналіз особливостей масопереносу кисню в культуральних рідинах у процесі вирощування кормових дріжджів.*

Ключові слова: *кормові дріжджі, поверхня контакту фаз, перенесення маси*

Протікання біотехнологічних процесів у багатьох випадках визначається не тільки швидкістю перетворення субстрату в продукти або утилізацією субстрату клітинами мікроорганізмів, але й швидкістю транспорту одного або декількох компонентів субстрату до клітини або молекули ферменту.

Дифузійні фактори можуть стати вирішальними за здійснення процесів мікробіологічного синтезу і, особливо, за трансформації органічних речовин, здійснюваної клітинами.

Дослідження, опис і технологічне проектування процесів, швидкість яких одночасно залежить як від біохімічних факторів – активності ферменту, швидкості метаболізму, так і від швидкості перенесення маси є, як правило, важкими завданнями, але їх вирішення рідко призводить до надійних кількісних результатів. Саме цією обставиною пояснюється наша увага до цих процесів.

Мета досліджень – вплив переносу масти на кінетику процесів глибинного культивування аеробних мікроорганізмів, до яких відносяться кормові дріжджі.

Матеріали та методика досліджень. Глибинне культивування аеробних мікроорганізмів завжди є складним гетерофазним процесом, у ході якого протікають і масообмін газів, насамперед кисню в рідку фазу і зворотний перехід газоподібних продуктів метаболізму, наприклад, вуглекислого газу [1].

Для таких процесів характерна одночасна залежність швидкості і від дифузійних, і від кінетичних факторів, однак система "газ – рідина – клітина" є, за суттю, трифазною, що неминує створює додаткові труднощі для опису навіть порівняно зі складними газорідними двофазними системами.

Проникнення розчинених у рідкій фазі поживних речовин, у тому числі газоподібних, до клітини відбувається шляхом дифузійного переносу до клітинної стінки з подальшим транспортом через мембрану всередину клітини. Це явище може бути описане моделлю перенесення маси до поверхні твердої частинки, оскільки клітини прийнято вважати "умовно твердою фазою" (рис.1).

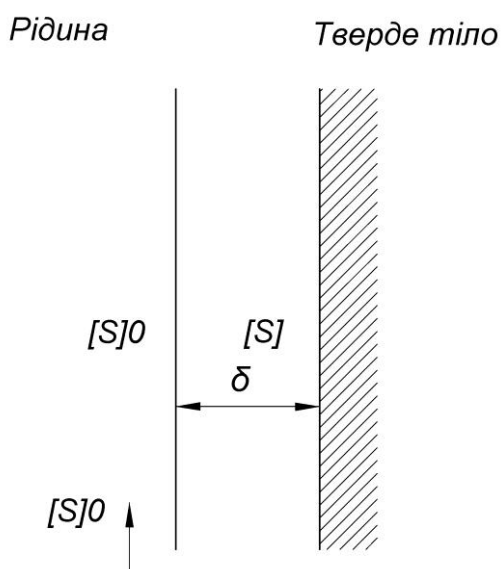


Рис.1. Схема розподілу концентрацій субстрату в потоці рідини на межі контакту з клітиною

Хімічні перетворення на зовнішній поверхні клітини створюють необхідність транспорту вихідних речовин з розчину до поверхні клітини і відводу продуктів від місця їх утворення в розчин.

Всі процеси аналогічного типу проводяться, як правило, або у проточних, або в добре перемішуваних біореакторах. Прийнято вважати, що в ядрі потоку (при достатньому видаленні від часток твердого тіла) концентрація вихідних речовин і продуктів постійні за обсягом, тобто градієнти концентрацій дорівнюють нулю [2].

Найвдаліша модель обтікання твердих частинок рідиною або газом припускає існування поблизу твердої поверхні плівки нерухомої фази, що не рухається разом з рідиною, а як би гальмується твердою поверхнею.

У таких нерухомих плівках товщиною δ (рис.1) перенесення маси можливе тільки у вигляді молекулярної дифузії, а сама плівка є єдиним опірм масопередачі. Товщина плівки визначається фізичними властивостями рухомої і нерухомої фаз та гідродинамічною обстановкою в апараті. Експерименти показують, що ефективна товщина плівки рідини біля поверхні твердого тіла тим менше, чим вище швидкість руху рідкої фази щодо твердої. У відомих межах можна вважати, що між товщиною плівки і швидкістю рідини існує обернено пропорційна залежність.

Концентрація вихідної речовини S на кордоні плівки з ядром потоку буде такою ж, як і в потоці, тобто $[S_o]$. Внаслідок дифузійного опору плівки концентрація субстрату на поверхні твердої фази повинна бути менше $[S_o]$ і може бути позначена через $[S]$. У відповідності з моделлю (рис.1) рушійна сила переносу маси через плівку становить $[S_o] - [S]$, а швидкість цього перенесення

$$r_d = \beta_s \cdot ([S_o] - [S]), \quad (1)$$

де r_d – швидкість перенесення субстрату через одиничну поверхню плівки; β_s – коефіцієнт масопередачі, віднесений до тієї ж поверхні.

Для тонких плівок товщиною δ перший закон Фіка для сталої молекулярної дифузії може бути описаний у вигляді кінцевої різниці:

$$r_d = \frac{D_s}{\delta} \cdot ([S_o] - [S]), \quad (2)$$

де D_s – коефіцієнт дифузії субстрату в плівці.

При культивуванні мікроорганізмів велике значення має не тільки перенесення маси на межі розділу "тверде тіло - рідина", але і на кордоні "газ - рідина", тому для дихання мікроорганізмам необхідний розчинений у рідині кисень.

При складанні моделі перенесення маси "газ - рідина" скористаємося двоплівковою теорією, згідно якої з обох сторін до поверхні контакту фаз примикають тонкі плівки (рис.2), в яких і зосереджено опір переносу маси.

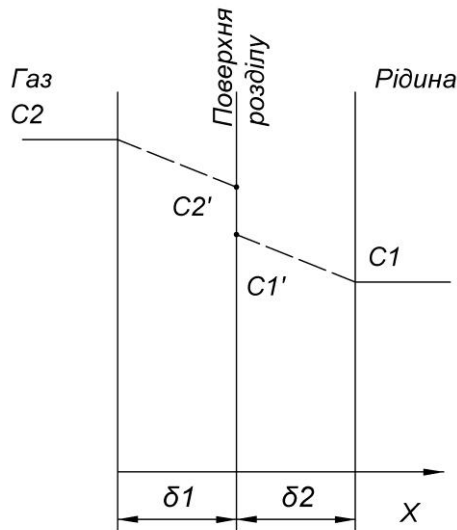


Рис.2. Модель перенесення маси в системі "газ - рідина" за двоплівковою теорією

Передбачається, що всередині плівок відсутнє будь яке перемішування, тому перенесення речовини з ядра однієї фази до поверхні розподілу і далі в ядро іншої фази відбувається шляхом молекулярної дифузії, причому мала товщина плівок дозволяє використовувати закон Фіка у вигляді кінцевих різниць, тобто для одиничної поверхні контакту фаз

$$r_2 = \frac{D_s}{\delta_1} \cdot (C_2 - C_2'); \quad r_1 = \frac{D_s}{\delta_2} \cdot (C_1' - C_1). \quad (3)$$

Для кількісних розрахунків доводиться також припускати, що на поверхні розподілу фаз встановлюється термодинамічна рівновага, тобто

$$C_2' = \gamma \cdot C_1'. \quad (4)$$

У цьому випадку виявляється, що загальний коефіцієнт масопередачі β пов'язаний з коефіцієнтом масовіддачі у фазах $\beta_1 = \frac{D_1}{\delta_1}$ і $\beta_2 = \frac{D_2}{\delta_2}$ за правилом підсумовування опорів

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2}. \quad (5)$$

Як і раніше, тут використані позначення: D_i – коефіцієнт молекулярної дифузії, δ_i – товщина плівки у відповідній фазі.

Першим наслідком з плівкової теорії масопередачі є можливість великої відмінності в опорах різних фаз, тоді одним з доданків у правій частині рівняння (5) можна знехтувати і зробити висновок про зосередження опору в одній з фаз, першій або другій (рис.2). Цей висновок повністю підтверджується практикою, причому для системи "газ – рідина" опір зосереджено в газовій фазі, якщо газ добре розчинний в рідині, і в рідкій фазі, якщо газ погано розчинний в рідині. Для дихання аеробних мікроорганізмів, до яких належать кормові дріжджі, необхідний розчинений кисень, який є газом, що погано розчиняється. Тому можна вважати, що опір переносу маси зосереджено у рідкій фазі, а коефіцієнт масопередачі рівний коефіцієнту масовіддачі у фазі рідини.

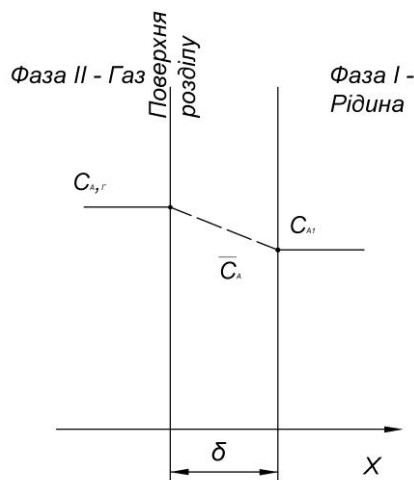


Рис. 3. Зосередження опору в рідкій фазі за перенесення маси компонента А і споживання його клітинами

За гарного перемішування клітини рівномірно розподілені за обсягом рідини, а внаслідок малої величини δ можна знехтувати тією кількістю клітин,

які опиняються в плівці рідкої фази поблизу поверхні розподілу фаз. При такому допущенні перенесення маси компонента А з газової фази в рідку буде протікати зі швидкістю

$$r_d = \beta_A \cdot (C_A - C_{A1}). \quad (6)$$

Таким чином, встановлено, що за культивування аеробних мікроорганізмів, якими є дріжджі та дріжджеподібні гриби роду *Candida*, перенесення маси здійснюється так.

Кисень з газової фази переходить у рідку. Розчинений в рідкій фазі кисень (O_2) і поживні речовини (вуглеводи, азот, фосфор тощо) переходять з рідкої фази в тверду. Дріжджова клітина умовно вважається "твердою фазою" (рис.4). Вищезгадане перенесення маси здійснюється в дифузійній області і носить назву дифузійне, загальна швидкість перенесення маси в дифузійній області за культивування дріжджів складатиметься з швидкості переносу маси з газової фази в рідку r_{d1} і з рідкої – в тверду r_{d2} :

$$r_d = r_{d1} + r_{d2} \quad (7)$$

Визначити експериментально і кількісно вирахувати швидкість і коефіцієнт переносу маси з фази у фазу скрутно. Так само скрутно виміряти товщину плівки на межі розподілу фаз.

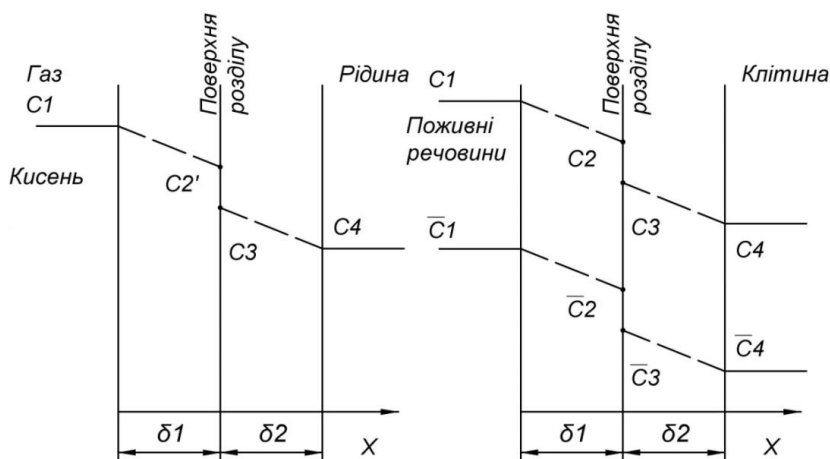


Рис. 4. Модель перенесення маси при вирощуванні дріжджової клітини

Тому, для спрощення розрахунків були порівняні швидкість перенесення маси в дифузійній зоні і швидкість перетворення субстрату (споживання поживних речовин) в кінетичній зоні.

За культивування клітин, коли їх популяція знаходиться в стані рухомої рівноваги, швидкість перенесення маси в дифузійній області та швидкість споживання кисню і поживних речовин в кінетичній зоні однакові:

$$r_d = r_k, \quad (8)$$

де r_d – швидкість перенесення маси в дифузійній області; r_k – швидкість перетворення субстрату в кінетичній області.

Споживання кисню і поживних речовин дріжджовою клітиною відбувається зі швидкістю:

$$r_k = \frac{dc}{dt} = q \cdot x \cdot \mu, \quad (9)$$

де q – потреба в кисні для синтезу АСД. г O_2 / г; μ – питома швидкість росту дріжджів г / г · год, або год⁻¹; x – концентрація дріжджів у середовищі, г / л.

Таким чином, підставивши в рівняння (8) рівняння (9) і (6), отримаємо:

$$r_d = r_k = \beta_A \cdot (C - C_1) = q \cdot x \cdot \mu. \quad (10)$$

Швидкість перенесення маси в дифузійній області можна визначити за рівнянням:

$$r_d = q \cdot x \cdot \mu. \quad (11)$$

Величини q , x , μ визначаються експериментально.

З рівняння (10) і (11) коефіцієнт переносу маси буде дорівнювати

$$\beta = \frac{q \cdot x \cdot \mu}{(C - C_1)}. \quad (12)$$

Висновки

Синтез мікроорганізмів проходить найбільш ефективно, якщо швидкість перенесення маси поживних речовин і кисню в клітину дорівнює швидкості їх споживання клітиною. Зниження швидкості перенесення в дифузійній області призводить до нестачі кисню і поживних речовин в клітині, що сповільняє швидкість її росту і може призвести до загибелі.

Тому для інтенсифікації процесів мікробіологічного синтезу необхідно дотримуватися умови рівності швидкостей перенесення в дифузійній області та споживання в кінетичній області.

Список літератури

1. Вербина Н.М. Микорбиология пищевых производств / Н.М. Вербина. – М.: Агропромиздат, 1988. – 256 с.
2. Экологическая биотехнология / Под ред. К.Ф. Форстера, Д.А. Дж. Вейза; пер. с англ. – Л.: Химия, 1990. – 384 с.
3. Новый справочник химика и технолога. Ч.1. Процессы и аппараты химических технологий. – С-Пб.: АНО НПО "Профессионал", 2004. – 848 с.
4. Ободович А.Н. Экспериментальное определение коэффициента массообмена при культивировании микроорганизмов с применением метода дискретно – импульсного ввода энергии (ДИВЭ) / А.Н. Ободович, Т.Е. Мудрак, С.И. Костик, В.В. Сидоренко // Промышленная теплотехника. – 2015. – №3. – С. 24.

ВЛИЯНИЕ МАССОПЕРЕНОСА НА КИНЕТИКУ ПРОЦЕССОВ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

А. Н. Ободович, Е. В. Подобий, В. В. Сидоренко

Аннотация. *Представлен анализ особенностей массопереноса кислорода в культуральных жидкостях в процессе выращивания кормовых дрожжей.*

Ключевые слова: *кормовые дрожжи, поверхность контакта фаз, массоперенос*

EFFECT OF MASS TRANSFER ON THE KINETICS OF MICROBIOLOGICAL SYNTHESIS

A. Obodovich, E. Podobiy, V. Sidorenko

Annotation. *The paper analyzes the features of mass transfer of oxygen into the culture fluid in the process of growing the fodder yeast.*

Keywords: *fodder yeast, surface contact phase, mass transfer.*