

## ENERGY PULSES IN THE ENVIRONMENT OF FERMENTATION APPARATUS

A. Koval, O. Chagayda

National University of Food Technologies

---

|  |   |
|--|---|
| <b>Key words:</b><br><i>Hydrodynamics</i><br><i>Fermentation media</i><br><i>Energy pulses</i><br><i>Gas-retention ability</i> | <b>ABSTRACT</b><br>The information relating to the features of formation of carbon dioxide with subsequent synthesis of dispersed gas phase is given in the article. During energy transformations, chemical energy of sugars is converted into the energy of synthesis of biomass of microorganisms and into the interfacial surface energy in the form of dispersed gas phase. Generalization of the ability of the latter is gas-retention of the dissolved gas and the formation of the dispersed gas phase. The impact of these two components is manifested by changes in pressure, violation of conditions of thermodynamic equilibrium, and creation of energy pulses. As a result, mass transfer intensification occurs, as well as changes in the structure of gas-retention ability in the gas phase, and changes in the modes of synthesis of target compounds. |
| <b>Article history:</b><br>Received 12.03.2015<br>Received in revised form 25.03.2015<br>Accepted 11.04.2015                   |   |
| <b>Corresponding author:</b><br>O. Chagayda<br><b>E-mail:</b><br>npnuht@ukr.net  |   |

---

## ЕНЕРГЕТИЧНІ ІМПУЛЬСИ В СЕРЕДОВИЩАХ БРОДИЛЬНИХ АПАРАТІВ

А.О. Коваль, О.В. Чагайда

Національний університет харчових технологій

*У статті наведено інформацію, яка стосується особливостей утворення діоксиду вуглецю з подальшим синтезом диспергованої газової фази. В енергетичних трансформаціях хімічна енергія цукрів перетворюється частково в енергію синтезу біомаси мікроорганізмів та енергію формування міжфазної поверхні у формі диспергованої газової фази. Узагальненням останньої є газоутримувальна здатність розчиненого газу у формі вже диспергованої газової фази. Вплив на ці дві складові проявляється за рахунок зміни тисків, що порушують умови термодинамічної рівноваги, створюючи енергетичні імпульси, наслідками яких є інтенсифікація масообміну, зміни в структурі газоутримувальної здатності по газовій фазі і в режимах синтезу цільових речовин.*

**Ключові слова:** гідродинаміка, бродильні середовища, енергетичні імпульси, газоутримувальна здатність.

**Постановка проблеми.** Вихідним енергетичним джерелом у бродильних технологіях є цукри, матеріальна трансформація яких призводить до утворен-

ня алкоголю і діоксиду вуглецю. При цьому етиловий спирт продовжує ланцюг хімічного енергоносія, а утворення  $\text{CO}_2$  в процесі синтезу супроводжується механічною і гідродинамічною дією. Остання впливає на загальну динаміку бродіння, а варіювання тисками діоксиду вуглецю означає можливість досягнення регульовальних ефектів та оптимізації системи.

Енергетичний потенціал таких газорідних систем у спиртовій, пивоварній і виноробній промисловості не знаходить практичного використання, однак вирішення цієї проблеми дозволить суттєво покращити енергозабезпечення в бродильних технологіях.

**Метою дослідження** є визначення перспектив створення і використання вторинних енергетичних ресурсів у технологіях бродильних виробництв.

**Методами дослідження** обрано аналітичний огляд і феноменологічні узагальнення.

**Виклад основних результатів дослідження.** Накопичення енергетичних потенціалів у формі розчиненого діоксиду вуглецю завершується утворенням диспергованої газової фази в середовищах і за герметичних технологічних апаратів збільшенням тиску в об'ємах газових середовищ [1, 2]. Приріст такого тиску у своїй динаміці впливає на генерування газової фази відповідно до закону Генрі, за яким розчинність  $\text{CO}_2$ , як і інших газів, пропорційна парціальним тискам [3, 4]:

$$c_n = kp, \quad (1)$$

де  $c_n$  — граничне насичення середовища діоксидом вуглецю,  $\text{кг/м}^3$ ;  $k$  — константа Генрі,  $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{Па})$ ;  $p$  — парціальний тиск відповідної газової фази, Па.

В умовах технологій бродіння газова фаза у надрідинному об'ємі і диспергована газова фаза представлені лише діоксидом вуглецю, а тому парціальні та фізичні тиски збігаються. Таким чином, у наших умовах величина  $p$  відображує загальне значення тиску.

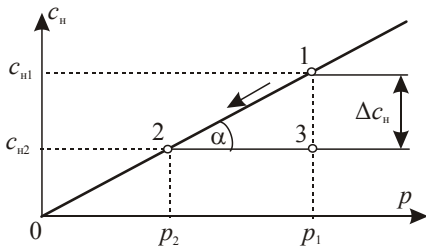


Рис. 1. Залежність між термодинамічними параметрами відповідно до закону Генрі

лінійна залежність  $c_n = c_n(p)$  зображена з кутами нахилу  $\alpha$ , на основі чого враховується вплив температури. У зв'язку з цим слід

При цьому важливо, що у своїй дії на газову фазу тиски  $p$  є змінними, оскільки вони представлені сумою тисків у газовій фазі над середовищем і гідростатичними тисками. За спливання газової фази змінні тиски визначаються відповідними координатами кожної з бульбашок. Особливості таких трансформацій диспергованої газової фази і відповідних енергетичних потенціалів поєднані між собою. Якщо наявність газової фази в надрідинному об'ємі практично не має значення з точки зору масообміну між ними, то перехід до режиму з досягненням критичного тиску означає спрацювання запобіжних клапанів у технологічному апараті і різке зниження тиску. Ця обставина визначає необхідність застосування закону Генрі, геометрична інтерпретація якого наведена на рис. 1.

зазначити, що представлення закону Генрі у формі (1) має класичний вигляд, однак насправді до неї слід ввести складову, яка враховувала б вплив температури. Таке врахування має привести до форми:

$$c_n = c_n(p, t). \quad (2)$$

На графічних залежностях впливи температури враховуються кутом  $\alpha$ . Це означає, що для фіксованого значення температури зброджуваного середовища  $t = \text{const}$  залежність (1) наводиться у формі на рис. 1.

Припустимо, що системою керування термодинамічних параметрів передбачено досягнення максимального тиску  $p_1 = p_{\text{max}}$  і від моменту його досягнення  $p_2$  знижується до певного значення. При цьому зниження концентрації розчиненого діоксиду вуглецю повинно скласти  $\Delta c_n$ :

$$\Delta c_n = c_{n1} - c_{n2}. \quad (3)$$

Виділення питомої кількості  $\Delta c_n$  з швидкоплинним перебігом у часі означає таке ж швидкоплинне збільшення газотримувальної здатності з енергетичним імпульсом. При цьому:

$$\Delta c_n = \Delta p \operatorname{tg} \alpha; \quad (4)$$

$$\Delta p = p_1 - p_2. \quad (5)$$

Важливо, що зміна тиску  $\Delta p$  від координати обраної точки не залежить. Це означає, що масова питома кількість  $\text{CO}_2$  від координати будь-якої точки також не залежить. Однак об'єм газу, що виділяється, від координати залежить і це означає, що величина утримувальної здатності також залежить від розташування відповідних прошарків середовища. Очевидно, що газова фаза виділяється у формі масивів диспергованих бульбашок, загальний об'єм яких обчислюємо з використання рівняння Менделєєва-Клайперона:

$$V_{\text{пит.}} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{P_{(к)}} RT. \quad (6)$$

Як було показано раніше, питома маса  $\text{CO}_2$  є відомою. Також відомий кінцевий тиск  $P_{(к)}$ , який відповідає обраній координаті  $H$ , тоді:

$$P_{(к)} = p_0 + mgH, \quad (7)$$

тому

$$V_{\text{пит.}} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{p_0 + mgH} RT, \quad (8)$$

де  $R$  і  $T$  — відповідно універсальна газова стала і абсолютна температура середовища.

Хоча в цій частині міркувань введено поняття питомого об'єму газової фази  $V_{\text{пит.}}$ , проте можна стверджувати, що це здійснено з відчуттям «поваги» до рівняння універсального стану газу. Але ж очевидно, що величина  $V_{\text{пит.}}$  у нашому випадку є нічим іншим, як газотримувальною здатністю, що утворена в результаті різкого і швидкоплинного зниження тиску. Таке зародження

додаткової утримувальної здатності спостерігається в повному об'ємі газорідинної суміші і має оцінюватися енергетичним впливом такої потужності і якості, які створити іншими засобами й технологіями впливу практично неможливо.

При цьому необхідно підкреслити особливості таких енергетичних проявів. Вказане генерування диспергованої газової фази призводить до енергетичних витрат на утворення міжфазної поверхні, що повинно враховуватися в загальному енергетичному балансі. Одночасно з цим слід назвати ще одну особливість. На відміну від тієї частини газової фази, що існувала і продовжує існувати в новому режимі після енергетичного імпульсу, щойно генерована дисперсна фаза потрапляє в режим перехідного процесу. Існування такого є неминучим, оскільки на нову, зароджену в середовищі бульбашку миттєво діє архімедова сила незалежно від того, в якому стані знаходиться рідинна фаза. У зв'язку з цим починається відносне переміщення газової фази зі зростаючою швидкістю до значення, за якого сила опору середовища дорівнюватиме архімедовій силі.

Раніше було показано, що суттєво більша частина генерованого  $\text{CO}_2$  з ЦКТ має видалятися. Це вказує на необхідність прийняття рішень про організацію режимів імпульсного енергетичного впливу.

Генерування дисперсної газової фази на фоні вже існуючої означає додатковий розрив суцільності середовища, що супроводжується збільшенням загального об'єму газорідинного середовища і його «набуханням». Останнє означає наявність переміщення кожної складової рідинної маси середовища і всієї маси в цілому. Такий процес є перехідним, оскільки його дія в часі є обмеженою у зв'язку з різким зниженням енергетичного потенціалу розчиненого газу. Математичну модель, яка стосується такого перехідного процесу, можна записати у формі рівняння руху приведеної маси  $m$  системи:

$$m\ddot{y} = P_{\text{руш.}} - P_{\text{оп.}}, \quad (9)$$

де  $m$  — приведена маса системи.

Відповідно до принципу Релея  $m = \frac{1}{3} m_{\text{р.ф.}}$ , де  $m_{\text{р.ф.}}$  — загальна маса рідинної фази;  $P_{\text{руш.}}$  — приведена рушійна архімедова сила;  $P_{\text{оп.}} = mg$  — сила опору переміщення приведеної маси системи;  $\ddot{y}$  — прискорення приведеної маси.

Переміщення приведеної маси системи в перехідному процесі залежить від динаміки зміни рушійної сили, яка може розраховуватися через величину утримувальної здатності. Феноменологічні міркування дозволяють зробити припущення про те, що зародження додаткової утримувальної здатності теж супроводжується інерційними явищами і тому рушійний фактор  $P_{\text{руш.}}$  у своїй динаміці є функцією часу. Хоча в першому наближенні і з урахуванням того, що перехідний процес за умовою (9) в часі переважає час формування диспергованої газової фази більше, ніж на порядок, останнє дозволяє умовно вважати величину  $P_{\text{руш.}}$  після її повного формування змінною у зв'язку з безперервно зменшуваною величиною утримувальної здатності, тому перехідний процес складається з двох етапів. Першому відповідає різке зниження

тиску в газовій надрідинній фазі від  $p_1$  до  $p_2$  (рис. 1) і збільшення сумарного об'єму диспергованої газової фази й утримувальної здатності. На другому етапі в міру зменшення утримувальної здатності прискорення  $\ddot{y}$  отримує від'ємний знак і рівень газорідинного середовища знижується до мінімуму.

Подальша герметизація зароджуваного середовища призводить до поступового зростання тиску в технологічному апараті, накопичення розчиненого діоксиду вуглецю і до повторного формування диспергованої газової фази. Очевидно, що описаний енергетичний імпульс після свого завершення порушує динаміку відтворення утримувальної здатності і супроводжується втратою певної частини енергетичного потенціалу перемішування середовища. З цієї точки зору виглядає доцільним обмеження імпульсу зі зниження тиску, що є цілком досяжним, хоча можливими є заходи щодо компенсації втрат за рахунок штучного підвищення утримувальної здатності.

Права частина рівняння (9) містить у собі силові показники. Раніше було показано, що рушійний фактор визначається величиною утримувальної здатності і тому  $P_{руш..} = P_{руш.}(u)$ . Оскільки утримувальна здатність за інших рівних умов є функцією часу, то і рушійна сила також відслідковує зміни утримувальної здатності і є функцією часу.

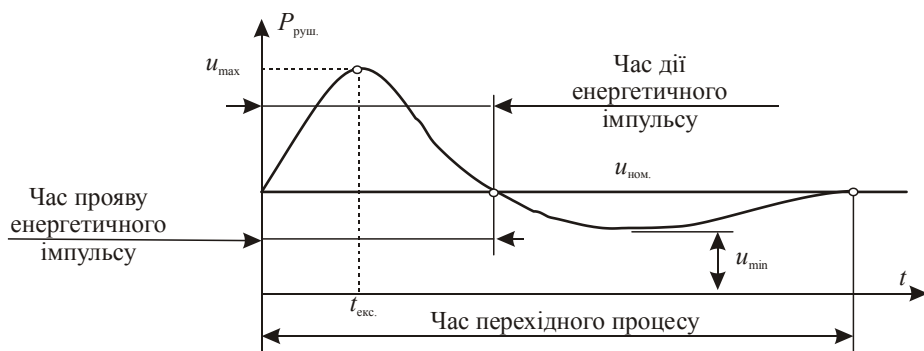


Рис. 2. Графічна інтерпретація перехідного процесу, пов'язаного з енергетичним імпульсом

Процес додаткового нарощування утримувальної здатності є швидкоплинним з досягненням екстремуму за час  $t_{екс.}$  (рис. 2). Сила опору при переміщенні приведеної маси залишається величиною сталою, однак для математичної формалізації правої частини умови (9) необхідним є одержання експериментальних доповнень.

Важливо, що енергетичний імпульс може бути програмованим за величиною і в часі за рахунок регульованої динаміки зниження тиску в газовому об'ємі. Очевидно, що остання може бути представлена різними законами, в тому числі лінійними з різними проміжками досягнення екстремального значення  $P_{руш.ек.}$ . У такому випадку на першому етапі маємо:

$$P_{руш.} = P_{руш.(n)} + k_y t ; \quad (10)$$

$$m\ddot{y} = P_{руш.(n)} + k_y t - P_{оп.} , \quad (11)$$

де  $k_y$  — коефіцієнт пропорційності, Н/с.

Виконавши заміну  $\ddot{y} = d\dot{y}/dt$ , запишемо:

$$d\dot{y} = \frac{P_{\text{руш.}(n)}}{m} dt + \frac{k_y t}{m} dt - \frac{P_{\text{оп.}}}{m} dt. \quad (12)$$

$P_{\text{руш.}(n)}$  відповідає початковій величині рушійної сили (і початковій величині утримувальної здатності). Інтегрування умови (11) дозволяє записати:

$$\dot{y} = \frac{P_{\text{руш.}(n)}}{m} t + \frac{k_y t^2}{2m} - \frac{P_{\text{оп.}}}{m} t + C, \quad (13)$$

де  $C$  — стала інтегрування.

Останню знайдемо за початкових умов:

$$t_{(n)} = 0; \quad y_{(n)} = P_{\text{руш.}(n)}; \quad \dot{y}_{(n)} = 0. \quad (14)$$

Тоді остаточно отримаємо:

$$\dot{y} = \frac{P_{\text{руш.}(n)} - P_{\text{оп.}}}{m} t + \frac{k_y t^2}{2m}. \quad (15)$$

Повторне інтегрування останньої умови дозволяє записати:

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt}. \quad (16)$$

Здійснивши підстановку (16) і розділивши змінні, отримаємо:

$$dy = \frac{P_{\text{руш.}(n)} - P_{\text{оп.}}}{m} t dt + \frac{k_y t^2}{2m} dt.$$

У результаті нтегрування останнього виразу отримаємо рівняння:

$$y = \frac{P_{\text{руш.}(n)} - P_{\text{оп.}}}{m} \cdot \frac{t^2}{2} + \frac{k_y t^3}{6m} + C'. \quad (17)$$

За початкових умов (14) маємо:

$$C' = P_{\text{руш.}(n)}. \quad (18)$$

Остаточно координата газорідинного середовища визначається залежністю:

$$y = P_{\text{руш.}} + \frac{P_{\text{руш.}(n)} - P_{\text{оп.}}}{m} \cdot \frac{t^2}{2} + \frac{k_y t^3}{6m}. \quad (19)$$

За умовою (19) досягається можливість визначення  $y_{\text{max}}$  і максимальної утримувальної здатності по  $\text{CO}_2$ .

### **Висновки**

Наведені міркування з аналітичними залежностями вказують на можливий значний перерозподіл енергетичних потенціалів. Проте створений енергетичний імпульс завершується втратою енергетичного потенціалу на другій частині перехідного процесу. Слід очікувати, що зміни в гідродинаміці

середовища несуттєво відобразяться на швидкості генерування газової фази. Іншими словами, загальний енергетичний вплив за час перехідного процесу залишиться незмінним. Проте якби дослідження підтвердили негативні впливи імпульсів, слід було б звернутись до стабілізації силових дій, адже сили інерції в масивах рухомих середовищ впливають на газову фазу, додатково деформують її, змінюють умови масообміну і газоутримувальну здатність.

### **Література**

1. Кунце В. Технология солода и пива / В. Кунце. — С.-Пб.: Профессия, 2001. — 912 с.
2. Транспортно-технологічні системи пивзаводів / А.І. Соколенко, А.І. Українець, В.А. Піддубний / За ред. А.І. Соколенка. — К.: АртЕк, 2002. — 304 с.
3. Інтенсифікація тепло-масообмінних процесів у харчових технологіях: Монографія / А.І. Соколенко, А.А. Мазаракі, О.Ю. Шевченко та ін.; під ред. д-ра техн. наук, проф. А.І. Соколенка. — К.: 2011. — 536 с.
4. Фізико-хімічні методи обробки сировини і стабілізація харчових продуктів / А.І. Соколенко, О.Ю. Шевченко, В.А. Піддубний та ін. — К.: ПП. Люксар, 2009. — 454 с.
5. Благовещенская М.М., Злобин Л.А. Информационные технологии систем управления технологическими процессами. — М.: Высшая школа, 2010. — 768с.

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ИМПУЛЬСЫ В СРЕДАХ БРОДИЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**А.О. Коваль, О.В. Чагайда**

*Национальный университет пищевых технологий*

*В статье приведена информация, касающаяся особенностей образования диоксида углерода с последующим синтезом диспергированной газовой фазы. Частично в энергетических трансформациях химическая энергия сахаров превращается в энергию синтеза биомассы микроорганизмов и энергию формирования межфазной поверхности в форме диспергированной газовой фазы. Обобщением последней является газодерживающая способность растворенного газа в форме уже диспергированной газовой фазы. Воздействие на эти две составляющие проявляется за счет изменения давления, которое нарушает условия термодинамического равновесия, создавая энергетические импульсы. Результатом последних является интенсификация массообмена, изменения в структуре газодерживающей способности по газовой фазе и в режимах синтеза целевых веществ.*

**Ключевые слова:** *гидродинамика, бродильные среды, энергетические импульсы, газодерживающая способность.*