

УДК 663.4 (035)

HYDRODYNAMIC DESCRIPTIONS OF GAS-LIQUID ENVIRONMENTS

O. Koval, V. Poddubnyi

National University of Food Technologies

Key words:

*Environment
Hydrodynamics
Process
mass-transfer
Speed
Generating
Geometry*

ABSTRACT

The results of analysis of power potentials of gas-liquid environments, speeds of gas streams in circulation contours and hydrodynamic indexes of environments are presented. The indexes of motive factors and factors of resistance are certain, on balance of which the proper mathematical formalizations are offered. Calculation formulas on determination of gas-retaining ability of environments are offered.

Article history:

Received 30.01.2015
Received in revised form
12.02.2015
Accepted 25.02.2015

Corresponding author:

V. Poddubnyi
E-mail:
npnuht@ukr.net

ГІДРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОРІДИННИХ СЕРЕДОВИЩ

О.В. Коваль, В.А. Піддубний

Національний університет харчових технологій

У статті наведено результати аналізу оцінки енергетичних потенціалів газорідинних середовищ, швидкостей газових потоків у циркуляційних контурах, гідродинамічних показників середовищ. Визначено показники рушійних факторів і факторів опору, на балансі яких здійснено відповідні математичні формалізації. Запропоновано розрахункові формули для визначення газотримувальної здатності середовищ.

Ключові слова: середовище, гідродинаміка, процес, масообмін, швидкість, генерування, геометрія.

Постановка проблеми. Особливістю газорідинних середовищ бродильних виробництв є самогенерування в них енергетичного потенціалу у формі диспергованих масивів діоксиду вуглецю, існування яких призводить до утворення газорідинних циркуляційних контурів з достатньо потужними потенціалами кінетичної енергії. Динаміка утворення масивів диспергованої газової фази пов'язана

зі швидкістю зброджування цукристих речовин дріжджами, що вказує на можливість досягнення імпульсних енергетичних впливів на середовище [1—4].

Метою дослідження є теоретичний аналіз методів і можливостей створення перехідних процесів накопичень і трансформацій вказаних потенціалів, завданням яких є інтенсифікація масообміну і продуктивності технологічного обладнання.

Методика і результати досліджень. Перед початком процесу відбувається заповнення апарата культуральним середовищем з концентрацією цукрів 12...13 % з додаванням дріжджової маси. Розчин сухих речовин у рідинному середовищі після доволі енергонасичених етапів попередньої обробки є структурою з високим рівнем гомогенізації, однак дріжджові клітини здатні до процесів седиментації. Саме це визначає необхідність створення гідродинамічних режимів з підвищеними рівнями енергетичних потенціалів [1, 2].

У досліджуваній системі первинне енергоджерело наявне у формі хімічної енергії вуглеводнів, які мають трансформуватися у спирт і діоксид вуглецю. При цьому утворення спирту і діоксиду вуглецю має подвійний термодинамічний прояв, що супроводжується виділенням теплової енергії й утворенням диспергованої газової фази CO₂ [3, 4].

Виділена теплова енергія у кількості 169 кДж/моль глюкози у сполученні з тепловою енергією холодного джерела реалізується у формі, яку *гіпотетично* можливо вважати системою для перетворення теплової енергії у механічну роботу перемішування середовища.

Існування другого фактора інтенсифікації у формі диспергованої газової фази підтверджує можливість посилення на принцип суперпозиції. Спливання газової фази пов'язане з двома показниками швидкості. Так, абсолютна швидкість визначається сумою відносної швидкості та швидкості газорідинної суміші в циркуляційних контурах [3]:

$$w_{\text{абс.}} = w_{\text{відн.}} + w_{\text{цир.к.}} \quad (1)$$

З точки зору інтересів інтенсивного масообміну на межі поділу фаз важливим є гідродинамічний показник з назвою "швидкість оновлення поверхонь контактування". Очевидно, що вона залежить від фізико-хімічних властивостей середовищ, розчинності газової фази в рідинній і від швидкості спливання газових бульбашок. При цьому значення має та обставина, що спливання бульбашок супроводжується їх деформацією з переходом до форми еліпсоїдів під дією опорів середовищ. Для окремої бульбашки ці зміни, як і реакція середовища на них, є ледь помітними, однак у масовому диспергованому газорідинному потоці вони нівелюються в опосередкованому вигляді. Для режимів усталеного руху швидкість $w_{\text{відн.}}$ характеризується рівністю сил рушійних і сил опору. За рушійні прийнято називати архімедові сили, яким відповідає залежність:

$$P_{\text{Арх.}} = \rho g V_0, \quad (2)$$

а сили опору записуються у формі:

$$P_{\text{оп.}} = \xi \frac{\pi d_0^2}{4} \cdot \frac{w_{\text{відн.}}^2}{2}, \quad (3)$$

де ξ — коефіцієнт опору середовища; ρ — питома маса рідинного середовища; d_6 — діаметр газових бульбашок; V_6 — об'єм бульбашки; g — прискорення вільного падіння.

Порівнювання сил рушійних і сил опору дозволяє записати:

$$\rho g V_6 = \xi \frac{\pi d_6^2}{4} \cdot \frac{w_{\text{відн.}}^2}{2}, \quad (4)$$

звідки

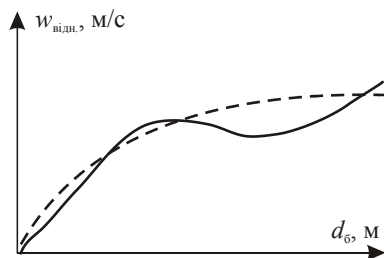
$$w_{\text{відн.}} = \sqrt{\frac{32 \rho g d_6}{3 \xi}}, \quad (5)$$

маючи на увазі, що $V_6 = \frac{4}{3} \pi d_6^3$.

Залежність величини відносної швидкості від діаметра бульбашки має параболічний характер. Численні експериментальні дослідження з визначення $w_{\text{відн.}}$ дають певне наближення до параболічного закону, хоча в зонах перехідних режимів існують певні особливості. В загальному вигляді такі відмінності відображені на рис. 1.

Утворення газової фази в умовах зброджування суслу в ЦКА (циліндроконічних апаратах) здійснюється в повному об'ємі рідинного середовища. Звідси випливає, що зміни тиску, яким підлягають бульбашки, генеровані на різній висоті, будуть суттєво різними. Очевидно, що від моменту їх зародження продовжується масообмін між ними і рідинною фазою по CO_2 і це відповідає умові, що рідинна фаза перенасичена. За умов такої взаємодії заслуговує на увагу наступний процес зниження гідростатичного тиску в бульбашках під час їх спливання. Хоча зниження фізичного тиску P_i і розширення газової фази повинно супроводжуватися зміною температури, в нашому випадку і з урахуванням розмірів газових бульбашок процес вважаємо ізотермічним. Тоді співвідношення тиску і температури має вигляд:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}. \quad (6)$$



--- форма теоретичних залежностей
 — характер експериментальних залежностей

Рис. 1. Порівняльні розрахункові графіки залежності $w_{\text{відн.}} = w_{\text{відн.}}(d_6)$

За умови швидкоплинного і короткочасного процесу та з урахуванням початкових температур процес можна вважати адіабатним, що описується співвідношенням:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^k, \quad (7)$$

де k — показник адіабати.

Об'єми і діаметри газових бульбашок взаємопов'язані. Відповідно до зазначених умов, ізотермічний процес описується формулою:

$$d_2 = d_1 \sqrt[3]{\frac{p_1}{p_2}}. \quad (8)$$

Адіабатний процес описується такою формулою:

$$d_2 = d_1 \sqrt[3]{\frac{p_1}{p_2}}^k. \quad (9)$$

Одночасно з діаметрами бульбашок зростають їхні площі поверхні і такі зростання відображуються залежностями в ізотермічному й адіабатному процесах відповідно:

$$\frac{S_{6.2}}{S_{6.1}} = \left(\sqrt[3]{\frac{p_1}{p_2}} \right)^2; \quad (10)$$

$$\frac{S_{6.2}}{S_{6.1}} = \sqrt[3]{\frac{p_1}{p_2}}^k. \quad (11)$$

Якщо в ізотермічному процесі врахувати координати газової бульбашки, то умову (9) запишемо у такому вигляді:

$$d_2 = d_1 \sqrt[3]{\frac{H_{(n)}}{H}}, \quad (12)$$

де $H_{(n)}$ і H — початкова і кінцева координати відліку переміщень бульбашок.

У результаті даних про залежність (12) по кожній з координат H можливо визначитися зі значенням діаметра d_2 . Це надає можливість перейти до оцінки енергетичних проявів у взаємодії бульбашок з рідинним середовищем.

У зв'язку з цим звернемося до умови (3), яка теоретично визначає опір переміщення $P_{оп.}$. Очевидно, що умови взаємодії газової бульбашки і рідинної фази підлягають закону рівності дії і протидії. Це означає, що рідинна фаза сприймає вказану силову дію $P_{оп.}$ у певній локальній зоні. Але, окрім визначеної величини $P_{оп.}$, маємо в кожній локальній зоні швидкість точки прикладання вказаної сили. Тоді миттєва потужність, що розвивається архімедовою силою, дорівнює:

$$N_{л.} = P_{оп.} \cdot w_{відн.}. \quad (13)$$

Підстановка величин в останню умову дозволяє записати:

$$N_{л.} = \xi \frac{\pi d_6^2}{8} w_{відн.}^3 = \xi \frac{\pi d_6^2}{8} \left(\sqrt{\frac{32 \rho g d_6}{3 \xi}} \right)^3. \quad (14)$$

Архімедова сила має прояв дії на середовище від кожної газової бульбашки, а загальний результат оцінюємо на основі принципу суперпозиції. Кількісну оцінку таких дій здійснимо з урахуванням утримувальної здатності. Якщо погодитися на можливість використання такого поняття, як середній діаметр газових бульбашок $d_{6,c}$, то тоді кількість z їх у загальному масиві складає:

$$z = \frac{3u}{4\pi d_6^3}. \quad (15)$$

У загальному випадку величину утримувальної здатності визначають миттєвим об'ємом газової фази, яка утримується в рідинній, а фізичний вимір цієї величини здійснюється різницею висоти газорідинної суміші і рідинної фази.

Подальший аналіз одержаних залежностей приводить до логічного висновку про те, що енергетичний вплив на зброджуване середовище, який має вважатися важливим чинником гомогенізації середовища, стосується саме величини утримувальної здатності.

Такий висновок відображується сукупністю формул (14) і (15), які дозволяють записати значення миттєвої потужності для всієї системи у формі:

$$\begin{aligned} N &= \xi z \frac{\pi d_6^2}{8} \left(\sqrt{\frac{32\rho g d_6}{3\xi}} \right)^3 = \xi \frac{3u}{4\pi d_6^3} \cdot \frac{\pi d_6^2}{8} \left(\sqrt{\frac{32\rho g d_6}{3\xi}} \right)^3 = \\ &= 0,09375 \frac{\xi u}{d_6} \left(\sqrt{\frac{32\rho g d_6}{3\xi}} \right)^3. \end{aligned} \quad (16)$$

Наявність у правій частині фізичних величин відображує властивості середовища: коефіцієнт опору ξ , питома маса ρ , прискорення вільного падіння g , які впливають на утримувальну здатність цього середовища.

Для оцінки можливостей енергетичного впливу на систему звернемося до залежності (16). Очевидно, що фізико-хімічні параметри середовища є наближено стабільними, а тому параметри ξ , ρ , g практично неваріативні. Оскільки діаметри бульбашок також відображують впливи попередньо зазначених чинників, то залишається зробити висновок про те, що лише утримувальна здатність u залишається варіативним фактором впливу.

Така особливість утримувальної здатності за стабільної динаміки генерування CO_2 пов'язується з геометрією апарата. Схоже на те, що сучасні розміри ЦКА є втіленням багаторічних пошуків і помилок у співвідношеннях об'ємів, діаметрів і висоти апаратів. Проте, як показує дане дослідження, пошуки геометричних параметрів технологічних апаратів продовжуються. Важливою особливістю бродильних апаратів є те, що генерування газової фази в них здійснюється у повному об'ємі рідинної фази. Це означає, що наявність диспергованої газової фази по висоті апарата буде помітно відрізнятись. Найменшою утримувальна здатність буде в нижніх шарах середовища, а найбільшою — у верхніх. Це пов'язано з тим, що газова фаза, синтезована в нижній і середній частинах об'ємів, доповнить газову фазу верхньої частини.

Впливи геометричних параметрів апаратів на величину утримувальної здатності пов'язані з тим, що швидкість генерування газової фази визначена технологією процесу і в кожному поперечному перерізі апарата можливо виявити ознаки диспергованої газової фази. Якби джерелом такої фази був би, наприклад, барботажний аераційний пристрій, то кількість поданого через нього газу, віднесена до площі поперечного перерізу, визначалася б показником приведеної швидкості, яка уособлює в собі інтенсивність аерації. Очевидно, що для рівновеликих за об'ємами апаратів і за однакових режимів введення газової фази приведена швидкість і щільність розташування газової фази буде більшою в апаратах менших діаметрів.

У бродильних апаратах з особливостями генерування CO_2 ситуація дещо відмінна, але приведена швидкість газової фази у цьому випадку також однозначно визначає інтенсивність енергообміну і масообміну. Неврахування цих особливостей свого часу призвела до невдалих рішень на рівні використання апаратів з діаметрами до 5 м і більше. На сьогодні ще залишаються в експлуатації апарати зі співвідношенням висоти середовища до діаметра від 1 : 1 до 5 : 1. Стосовно таких співвідношень можливо чітко прогнозувати переваги апаратів зі співвідношенням 5 : 1.

Формування таких переваг пов'язується з підвищеною величиною утримувальної здатності, що, як було показано раніше, спричиняють підвищення енергетичного потенціалу механічного перемішування. Окрім того, збільшена утримувальна здатність підвищує рівень очищення середовищ від проміжних газових компонентів бродіння. Оскільки CO_2 генерується дріжджовими клітинами і в молекулярній формі передається в рідинне середовище на межі поділу фаз, то ймовірність флотаційних явищ зростає, що сприяє інтенсивному масообміну між дріжджами і середовищем.

При цьому явище зародження газових бульбашок правомірно стосується будь-якої локальної зони, що насправді має місце, але повна рівномірність з точки зору їх появи порушується наявністю циркуляційних контурів.

Генерування газової фази в локальних зонах з підвищеними гідростатичними тисками є додатковим енергетичним джерелом, яке виникає в процесах

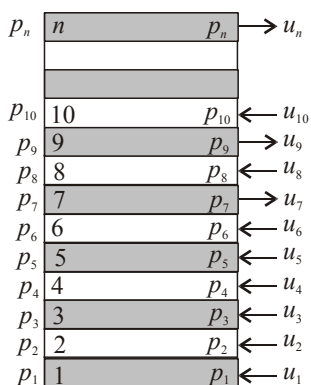


Рис. 2. Розрахункова схема для визначення утримувальної здатності газорідинних середовищ

бродіння. При цьому енергетичні витрати на організацію і здійснення технології залишаються незмінними, за винятком подовження часу в перехідному процесі в період лаг-фази і, відповідно, в режимах насичення середовищ на CO_2 .

Виконаємо перехід до оцінки величини утримувальної здатності в середовищі з безперервним генеруванням CO_2 . Розрахункова схема

цього випадку наведена на рис. 2. В умовному позначенні висоту газорідного середовища розподілимо на n ділянок однакової висоти.

Кожному з виділених об'ємів відповідають величини гідростатичних тисків $p_{г.і}$, до яких додаються тиски над газорідним середовищем, тому надалі вважаємо, що кожному прошарку відповідають середні тиски $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$. На рис. 2 прошарки пронумеровані від 1 до n з відповідно вказаними тисками $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$.

За обмежених висот прошарків можна вважати, що вказані тиски відображують їхні середні значення. Генерування CO_2 відбувається в кожному прошарку, але перехід газової фази з кожного нижнього прошарку у вищерозташований за об'ємом зростає. Так, при ізотермічному процесі перехід CO_2 з величиною u_1 з першого прошарку в другий характеризується співвідношенням:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{u'_2}{u_1}. \quad (17)$$

Звідси

$$u'_2 = \frac{p_1 u_1}{p_2}, \quad (18)$$

де u'_2 — утримувальна здатність по газовій фазі, одержана за рахунок трансформації u_1 .

Разом з тим, в кожному прошарку генерується CO_2 у кількостях, які відображаються наближеними значеннями u . Це означає можливість записати для другого прошарку:

$$u_2 = u + \frac{p_1 u_1}{p_2} = u + \frac{p_1}{p_2} u. \quad (19)$$

Тоді для третього прошарку отримуємо:

$$u_3 = u + \frac{p_2}{p_3} \left(u + \frac{p_1 u}{p_2} \right). \quad (20)$$

Аналогічно для четвертого прошарку записуємо:

$$u_4 = u + \frac{p_3}{p_4} \left(u + \frac{p_2}{p_3} \left(u + \frac{p_1 u}{p_2} \right) \right). \quad (21)$$

Записані умови (19)—(21) трансформуємо до такого вигляду:

$$u_n = u + \frac{p_{n-1}}{p_n} u_{n-1}. \quad (22)$$

Очевидно, що загальна утримувальна здатність повинна визначатися такою умовою:

$$u_{\text{зар.}} = u_1 + u_2 + u_3 + \dots + u_n. \quad (23)$$

Висновки

Одержані залежності слід оцінювати першим наближенням, оскільки, як було показано, саме утримувальна здатність по газовій фазі визначає миттєву потужність, наявну в середовищі. Це однозначно визначає інтенсивність циркуляційних контурів, збільшуючи в них швидкості рідинної фази і, одночасно, зменшуючи величини утримувальної здатності. Проте, незважаючи на цю особливість взаємовпливів параметрів, варто підкреслити, що утримувальна здатність зброджуваних середовищ однозначно пов'язана з геометрією апаратів і збільшення в них співвідношення висоти до діаметра за їх однакових об'ємів призводить до зростання утримувальної здатності й енергетичного потенціалу перемішування.

Література

1. Кунце В. Технология солода и пива / В. Кунце, Г. Мит: пер. с нем. — СПб., изд-во «Профессия», 2001. — 912 с.
2. Домарецький В.А. Технологія солоду і пива / В.А. Домарецький: підруч. для студентів вищ. закл. освіти. — К.: Урожай, 1999. — 544 с.
3. *Інтенсифікація* тепло- і 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. Соколенко А.І. Фізико-хімічні методи обробки сировини і харчових продуктів / А.І. Соколенко, В.А. Піддубний, В.А. Гіджеліцький та ін.: підруч. для студентів ВНЗ. — К.: Кондор-Видавництво, 2015. — 324 с.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СРЕД

О.В. Коваль, В.А. Поддубный

Национальный университет пищевых технологий

В статье приведены результаты анализа оценки энергетических потенциалов газожидкостных сред, скоростей газовых потоков в циркуляционных контурах, гидродинамических показателей сред. Определены показатели движущих факторов и факторов сопротивления, на балансе которых разработаны соответствующие математические формализации. Предложены расчетные формулы по определению газоудерживающей способности сред.

Ключевые слова: *среда, гидродинамика, процесс, массообмен, скорость, генерирование, геометрия.*