

УДК 663.4 (035)

О.В. Коваль, аспірант,

В.А. Піддубний, д.т.н.

Національний університет харчових технологій

ГІДРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОРІДИННИХ СЕРЕДОВИЩ

Запропоновано результати аналізу щодо оцінки енергетичних потенціалів газорідних середовищ, швидкостей газових потоків в циркуляційних контурах, гідродинамічних показників середовищ. Визначено показники рушійних факторів і факторів опору, на балансі яких запропоновано відповідні математичні формалізації. Запропоновано розрахункові формули по визначенню газотримувальної здатності середовищ.

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

Вступ. Особливістю газорідних середовищ бродильних виробництв є самогенерування в них енергетичного потенціалу у формі диспергованих масивів діоксиду вуглецю. Існування останніх приводить до утворення газорідних циркуляційних контурів з достатньо потужними потенціалами кінетичної енергії. Динаміка утворення масивів диспергової газової фази пов'язана зі швидкістю зброджування цукристих речовин дріжджами, що вказує на можливість досягнення імпульсних енергетичних впливів на середовища [1-4].

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

Методика і результати досліджень. Зупинимося на більш ґрунтовному аналізі явищ енерго- і масообміну, який має місце в подібних випадках. Почат-

ку процесу відповідає заповнення апарата культуральним середовищем з концентрацією цукрів 12...13 % з додаванням дріжджової маси. Розчин сухих речовин в 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].

В досліджуваній системі первинне енергоджерело присутнє 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 і утворенням диспергованої газової фази CO_2 [3, 4].

Виділена тепла 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.

Разом з тим і у зв'язку з існуванням другого фактора інтенсифікації у формі диспергованої газової фази зробимо висновок про можливість посилення на принцип суперпозиції. Спливання газової фази пов'язане з двома показниками швидкості. Так абсолютна швидкість визначається сумою відносної швидкості та швидкості газорідної 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, рівно як і реакція середовища на них, є відносно помітними, однак в масовому диспергованому газорі-

динному потоці ці зміни 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

$$P_{\text{Арх.}} = \rho g V_6, \quad (2)$$

а сили опору записуються у формі:

$$P_{\text{оп.}} = \xi \frac{\pi d_6^2}{4} \cdot \frac{w_{\text{відн.}}^2}{2}, \quad (3)$$

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

Прирівнювання 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 $V_6 = \frac{4}{3} \pi d_6^3$.

Як бачимо, залежність величини відносної швидкості від діаметра буль-

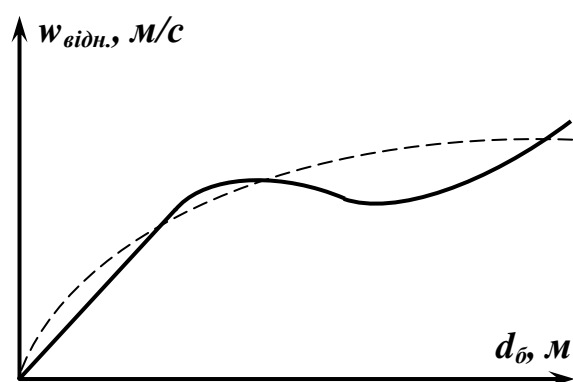


Рис. 1. Порівняльні розрахункові графіки залежності $w_{\text{відн.}} = w_{\text{відн.}}(d_6)$:

- - форма теоретичних залежностей;
- - характер експериментальних залежностей

башки має параболічний характер. Численні експериментальні дослідження по визначенню $w_{\text{відн.}}$ дають певне наближення до параболічного закону, хоча в зонах перехідних режимів мають місце певні особливості. В загальному вигляді такі відмінності відображені на рис. 1.

Утворення газової фази

в умовах зброджування суслу в ЦКА (циліндро-конічних апаратах) здійснюється в повному об'ємі рідинного середовища. Звідси витікає, 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_1 і розширення газової фази повинно супроводжуватися зміною температури, в нашому випадку і з врахуванням розмірів газових бульбашок процес вважаємо ізотермічним. Тоді співвідношення тиску і температури має

вид:

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

За умови швидкоплинного і короткочасного процесу та з врахуванням початкових температур процес можливо вважати адіабатним, для якого маємо

співвідношення:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^k. \quad (7)$$

де k – показник адіабати.

Об'єми і діаметри газових бульбашок взаємопов'язані і у відповідності до зазначених умов маємо для ізотермічного процесу:

$$d_2 = d_1 \sqrt[3]{\frac{P_1}{P_2}}. \quad (8)$$

і для адіабатного процесу:

$$d_2 = d_1 \sqrt[3]{\frac{P_1}{P_2}}. \quad (9)$$

Одночасно з діаметрами бульбашок зростають їх площі поверхні і такі зростання відображуються залежностями в ізотермічному і адіабатному проце-

сах відповідно:

$$\frac{S_{6.2}}{S_{6.1}} = \left(\sqrt[3]{\frac{P_1}{P_2}} \right)^2; \quad (10)$$

$$\frac{S_{6.2}}{S_{6.1}} = \sqrt[3]{\frac{P_1}{P_2}}; \quad (11)$$

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

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

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

У результаті даних щодо залежності (12) по кожній з координат H можливо визначитися зі значенням діаметра d_2 . Це означає 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 переміщенню $P_{оп.}$. 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 при цьому розвивається Архімедовою силою, дорівнює:

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

Підстановка величин в останню умову дозволяє записати:

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

Архімедові сила має прояв дії на середовище від кожної газової бульбашки, а загальний результат оцінюємо на основі принципу суперпозиції. Кількісну оцінку таких дій здійснимо з врахуванням 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 ви-

сновку про те, що енергетичний вплив на зброджуване середовище і який має вважатися важливим чинником гомогенізації середовища, стосується саме величини утримувальної здатності.

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

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

Присутність 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 присутність диспергованої газової фази по висоті апарата буде помітно відрізнятися. Найменшою утримувальна здатність буде в нижніх шарах середовища, а найбільша – 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 наступним.

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 привела 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, приводять до підвищеного 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 у молекулярній формі передається в рідинне середовище на межі поділу фаз, то вірогідність флотаційних явищ зростає, що сприяє інтенсивному масообміну між дріжджами і середовищем.

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

Генерування газової фази в локальних зонах з підвищеними гідростатичними тисками є додатковим енергетичним джерелом, яке виникає в процесах бродіння. При цьому енергетичні витрати на організацію і здійснення технології залишаються незмінними за виключенням подовження часу в перехідному

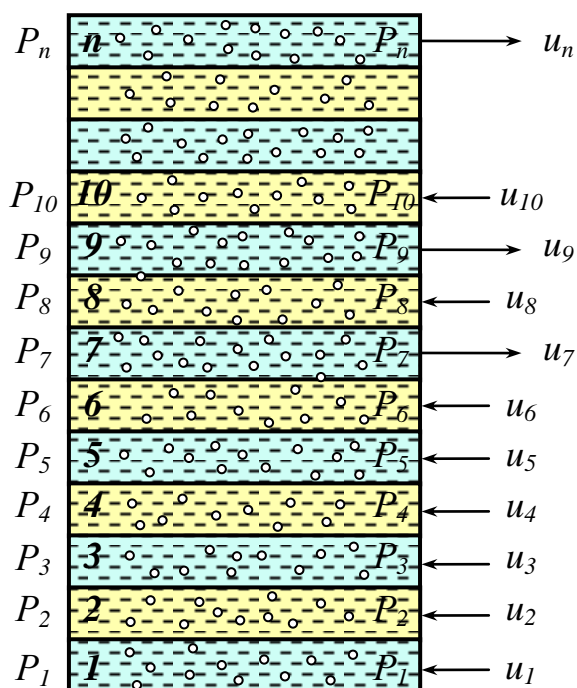


Рис. 2. Розрахункова схема до визначення утримувальної здатності газорідних середовищ

Кожному з виділених об'ємів відповідають величини гідростатичних тисків $P_{r,i}$, 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 можливо рахувати, що вказані тиски відображують їх середні значення. Генерування CO_2 відбувається в кожному прошарку, але перехід газової фази з кожного нижнього 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 .

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 розіб'ємо на n ділянок однакової висоти.

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:

$$u_3 = u + \frac{P_2}{P_3} \left(u + \frac{P_1}{P_2} u \right). \quad (20)$$

Аналогічно для четвертого прошарку записуємо:

$$u_4 = u + \frac{P_3}{P_4} \left(u + \frac{P_2}{P_3} \left(u + \frac{P_1}{P_2} u \right) \right). \quad (21)$$

Записані умови (19)–(21) трансформуємо до виду:

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

Очевидно, що загальна утримувальна здатність повинна визначатися умовою

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

Висновки. Одержані залежності слід оцінювати першим наближенням, оскільки, як було показано, саме утримувальна здатність по газовій фазі визначає миттєву потужність, присутню у 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 головний висновок залишається в силі: утримувальна здатність зброджуваних середовищ однозначно пов'язана з геометрією апаратів і збільшення в них співвідношення висоти до діаметра за їх однакових об'ємів приводить до зростання утримувальної здатності та 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- масообмінних процесів в 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.

О.В. Коваль, В.А. Поддубный

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СРЕД

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

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

O. Koval, V. Poddubnyi

HYDRODYNAMIC DESCRIPTIONS of GAS-LIQUID ENVIRONMENTS

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

***Keywords:** environment, hydrodynamics, process, mass-transfer, speed, generuting, geometry.*