

ENERGY MATERIAL IMPULSES IN GAS-LIQUID MEDIA

A. Sokolenko, K. Vasylykivsky, S. Litvynchuk

National University of Food Technologies

Key words:

Gas-liquid medium
Momentum
Quasielasticity
Aeration
Rigidity
Mass
Energy
Thermodynamics

Article history:

Received 10.12.2019
Received in revised form
26.12.2019
Accepted 17.02.2020

Corresponding author:

A. Sokolenko
E-mail:
mif63@i.ua

ABSTRACT

The article deals with the peculiarities of energy-material transformations in gas-liquid media by the example of technologies of aerobic digestion of sugar-containing media. Under these conditions, the system is characterized by the combination of three components of material flows, namely: the nutrient medium, the main liquid medium with microorganisms and the air flow to create modes of aeration. In this case, the nutrient medium in the form of the solution of sugars is a carrier of chemical energy potential, and the incoming air stream is a source of mechanical energy. Determining the relationships between them is the purpose of the study.

Materials and methods. The study presents mathematical formalizations concerning material and energy transformations that are components of general aerobic fermentation technology, determination of the role of gas-holding capacity as a driving factor in the creation of circulating circuits in gas-liquid systems and their energy characteristics, peculiarities of gas formation.

Research results. It is shown that the presence of circulating circuits in systems with manifestations of hydrostatic pressure at the saturation of the liquid fraction of nitrogen is accompanied by the processes of absorption and desorption of the gas phase with influence on the overall level of hydrodynamic state and the intensity of mass transfer processes.

Conclusions. It is proposed to determine the rigidity parameter of a quasielastic medium in the form of the ratio of force to deformation caused by this force. The given mass of the liquid phase as distributed is determined according to the Rayleigh principle in accordance with the equivalence position of kinetic energies. The mathematical model of the elastic system in the form of the D'Alembert-Lagrange motion equation leads to the possibility of determining the relations between the power, kinematic and energy parameters of quasielastic gas-liquid systems.

The presence of proposals to determine the latter allows us to proceed to the evaluation of reactions of gas-liquid systems to external interferences in attempts to intensify mass transfer processes.

ЕНЕРГОМАТЕРІАЛЬНІ ІМПУЛЬСИ В ГАЗОРІДИННИХ СЕРЕДОВИЩАХ

А. І. Соколенко, К. В. Васильківський, С. І. Літвинчук

Національний університет харчових технологій

У статті описано особливості енергоматеріальних трансформацій у газорідних середовищах на прикладі технологій аеробного зброджування цукровмісних середовищ. За таких умов система характеризується сукупністю трьох складових матеріальних потоків: живильного середовища, основного рідинного середовища з мікроорганізмами і повітряного потоку для створення режимів аерації. При цьому живильне середовище у формі розчину цукрів є носієм хімічного енергетичного потенціалу, а вхідний повітряний потік — джерелом механічної енергії, визначення співвідношень між якими складає мету дослідження.

Наведено математичні формалізації, які стосуються матеріальних і енергетичних трансформацій, що є складовими загальної технології аеробного бродіння, визначення ролі газоутримувальної здатності як рушійного фактора у створенні циркуляційних контурів у газорідних системах і їх енергетичних характеристик, особливостей утворення диспергованої газової фракції.

Показано, що наявність циркуляційних контурів у системах з проявами гідростатичного тиску за насиченості рідинної фракції азотом супроводжується процесами абсорбції і десорбції газової фази з впливом на загальний рівень гідродинамічного стану та інтенсивність масообмінних процесів.

Визначено роль диспергованої газової фази як пружної складової газорідного середовища, що дає змогу оцінювати останнє на рівні квазіпружного. Це стимулювало пошуки таких динамічних параметрів пружних систем, як жорсткість, приведені маси, рушійні фактори зовнішніх впливів і фактори опору.

Запропоновано параметр жорсткості квазіпружного середовища визначати у формі відношення силової дії до деформації, яка дією цієї сили викликається. Приведена маса рідинної фази як розподілена визначається за принципом Релея відповідно до положення еквівалентності кінетичних енергій. Математична модель пружної системи у формі рівняння руху Д'Аламбера-Лагранжа приводить до можливості визначення співвідношень між силовими, кінематичними і енергетичними параметрами квазіпружних газорідних систем.

Наявність пропозицій щодо визначення останніх дає змогу перейти до оцінки реакції газорідних систем на зовнішні втручання у спробах інтенсифікації масообмінних процесів.

Наведено результати щодо деформації газорідних систем, швидкостей таких деформацій, оцінок частот власних коливань і енергетичних витрат на їх створення.

Теоретичні узагальнення приводять до пропозиції використання ефективного методу інтенсифікації енерго- і масообмінних процесів за рахунок змінних тисків у газових надрідинних об'ємах середовищ.

Ключові слова: газорідне середовище, імпульс, квазіпружність, аерація, жорсткість, маса, енергія, термодинаміка.

Постановка проблеми. Метою створення газорідинних систем у харчових і мікробіологічних середовищах є влаштування масо- і енергообмінних процесів на користь здійснення технологічних завдань різних ступенів складності. Інтенсивність перебігу всієї сукупності процесів залежить від швидкості трансформації матеріальних складових з ймовірністю загального обмеження найменш швидкоплинним процесом. При цьому зовнішнє додаткове втручання в систему бажано мати таким, що сприяє інтенсифікації всіх складових процесів. На прикладі технологій аеробного бродіння кількість складових процесів досягає показників у 8...10 одиниць і з їх переліку на найбільшу увагу заслуговують можливості інтенсифікувати процес розчинення кисню на межі поділу рідинної і газової фракції [1; 2]. Останнє пояснюється тим, що саме кисень має обмежену розчинність у воді та її розчинах, яка до того ж, відповідно до закону Генрі, лімітується тиском і температурою середовища. На користь швидкості розчинення кисню впливають також величина міжфазної поверхні і гідродинамічний режим. Це означає, що принципове значення має не лише показник газоутримувальної здатності системи, а й ступінь дисперсності газової фракції в рідинній. У свою чергу, газоутримувальна здатність є похідною кількісного показника вхідного газового потоку і швидкості спливання газової фази та геометричних параметрів від початку рідинної фракції, а потім всього газорідинного середовища [3; 4]. В значній кількості випадків інтенсивність аерації середовища оцінюється відношенням вхідного газового потоку в $\text{м}^3/\text{с}$ до об'єму рідинної фракції [5] в м^3 , що жодним чином не стосується геометрії середовища і не відповідає запитам оцінки гідродинаміки і рівнів масообмінних процесів. Для виправлення цього недоліку пропонується звертатися до показника приведеної швидкості газового потоку у формі його відношення до площі поперечного перерізу технологічного апарата [6].

Оскільки продуктивність апаратів мікробіологічного синтезу часто обмежується динамікою розчинення кисню, то це є причиною пошуків методів інтенсифікації, коли на заводі стоять значні об'єми середовищ та їх дисипативні властивості. Без сумніву такі задачі потребують нових підходів, в яких можливим має бути ефективне втручання в загальний об'єм середовища. Водночас енергетична «вартість» такого втручання має бути мінімальною.

Мета дослідження: поєднання і розв'язання наведених задач на основі відповідних теоретичних пошуків з огляду на те, що газорідинні середовища розглядаються як квазіпружні системи [2; 7].

Матеріали і методи дослідження ґрунтуються на положеннях феноменологічного аналізу, закономірностях розчинності газів у рідинних фазах середовищ, положеннях, що стосуються гідродинаміки газорідинних систем, законах Архімеда, Паскаля, взаємодій газових і рідинних потоків та положеннях термодинаміки.

Викладення основних результатів дослідження. Газорідинні середовища в харчових, хімічних і мікробіологічних середовищах утворюються за рахунок примусового введення газової фракції в рідинну або за рахунок самогенерування в останній діоксиду вуглецю [8; 9].

У технологіях аеробного зброджування цукровмісних середовищ забезпечення рідинної фракції розчиненим киснем здійснюється за рахунок подавання і диспергування в ній стиснутого повітря. При цьому рівень стискання залежить

від гідростатичного тиску рідинної фракції на координаті введення повітря з незначним запасом енергетичного потенціалу на створення диспергованої газової фракції. За таких умов потужність вхідного потоку газової фракції визначається залежністю:

$$N = k_3 PV, \text{ Вт}, \quad (1)$$

де k_3 — коефіцієнт запасу потужності; P — тиск газової фракції, Па; V — об'ємний потік повітря, м³/с.

Утворення диспергованої газової фракції здійснюється у результаті взаємодії газових потоків з рідинною фракцією, а результат такої взаємодії визначається рівнем дисперсності. Відомо, що енергія ізотермічного утворення одиниці поверхні на межі з іншою фракцією визначається через величину поверхневого натягу σ [9; 10]. Тоді стосовно поверхні S маємо:

$$E_\phi = \sigma S, \text{ Дж}, \quad (2)$$

а перехід до швидкості утворення поверхні поділу фази S дає змогу оцінити потужність цього процесу:

$$N_\phi = \sigma \dot{S}, \text{ Вт}. \quad (3)$$

У загальній оцінці вхідний енергетичний потік газової фази на додаток до названого потенціалу утворення міжфазної поверхні витрачається на утворення кінетичної енергії перемішування середовища і стосується потенціальної енергії набухлого шару газорідинного середовища та потенціальної енергії розчиненого газу.

Енергетичний потенціал перемішування середовища пропонується визначати з урахуванням того, що швидкість спливання газової фракції w є стабілізованою і це означає рівність рушійній архімедових сил і сил опору середовища. Сумарна архімедова сила визначається через газотримувальну здатність u [9]:

$$P_{\text{руш}} = \rho_{\text{рід}} u g, \text{ Н}, \quad (4)$$

де $\rho_{\text{рід}}$ — питома маса рідинної фракції, кг/м³.

Швидкість точок прикладання розподіленої рушійної сили визначається як швидкість спливання бульбашок диспергованої газової фракції, а тому потужність цього процесу:

$$N_{\text{руш}} = P_{\text{руш}} w = \rho_{\text{рід}} u g w, \text{ Вт}. \quad (5)$$

Наприклад, за значень параметрів $\rho_{\text{рід}} = 1000 \text{ кг/м}^3$, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, $w = 0,3 \text{ м/с}$ та $u = 20 \text{ м}^3$ маємо:

$$N_{\text{руш}} = 1000 \cdot 20 \cdot 9,81 \cdot 0,3 = 58860 \text{ Вт} = 58,86, \text{ кВт}.$$

Насичення рідинної фракції азотом і в меншій мірі киснем залежить від тиску і значення констант Генрі. Перемішування газорідинної суміші у вертикальній площині супроводжується змінним гідростатичним тиском і змінними напрямками абсорбції та десорбції з утворенням і зникненням додаткової диспергованої газової фази.

Граничний енергетичний перехід по розчиненому азоту наближений до кількості розчиненого газу у всьому об'ємі рідинної фракції V_p :

$$E_{N_2} = V_p C_{N_2} P_c, \text{ Дж}, \quad (6)$$

де P_c — тиск рідинної фази на відмітці координати її центра тяжіння; C_{N_2} — стала насичення середовища азотом, кг/м^3 .

Зростання потенціальної енергії набухлого шару пов'язане з газотримувальною здатністю і об'ємом газорідинного шару $V_{г.р.}$:

$$V_{г.р.} = V_p + u, \text{ м}^3. \quad (7)$$

При цьому положення центра тяжіння системи зростає на величину Δh :

$$\Delta h = \frac{V_p + u}{2f}, \text{ м}, \quad (8)$$

де f — площа поперечного перерізу газорідинного середовища, м^2 .

Сукупність наведених показників енергетичних складових відповідає гідродинамічному стану, вирішальна роль у якому належить газотримувальній здатності. Очевидно, що остання залежить від геометрії рідинного шару у вимірах площі поперечного перерізу і висоти, об'ємних витрат газового потоку і швидкості спливання газової фази. З точки зору інтересів інтенсивного масообміну значення мають рівень дисперсності газової фази і її природні властивості, температура середовища, співвідношення між швидкостями розчинення і споживання кисню мікроорганізмами. Динаміка розчинення кисню відображується залежністю [1; 2]:

$$\frac{dM_{O_2}}{d\tau} = k_M F (c_n - c_\tau), \text{ кг/с}, \quad (9)$$

де k_M — коефіцієнт масопередачі, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$; c_n — концентрація кисню за стану насичення; c_τ — плінна концентрація O_2 , кг/м^3 ; F — площа поверхні масопередачі, м^2 .

Пошуки можливостей інтенсифікації масообмінних процесів звичайно пов'язують з додатковим введенням у середовище енергії у формі механічного перемішування. Однак дисипативні властивості газорідинних систем приводять до обмеженої ефективності локальних зон енерговведення. Збільшення кількості таких зон ситуацію покращує. З цієї точки зору для об'ємних реакторів найвищий рівень ефективності пов'язується з використанням імпульсних змін тиску в газовій надрідинній фазі. Такий підхід можливо вважати певним відгалуженням технологій дискретно-імпульсних впливів. Однак в останньому випадку використовується поступове накопичення енергетичних потенціалів з наступним їх швидкоплинним спрацюванням, що відповідає енергетичним потенціалам високої потужності. Частіше це стосується теплотехнічних систем.

Перевагою технологій змінних тисків у надрідинних об'ємах є те, що такі впливи мають відповідні реакції у всьому об'ємі та кожна бульбашка змінює об'єм і площу міжфазної поверхні. Перехід до статусу квазіпружного середовища означає можливість оцінок впливів амплітуд і частот на зміну тиску з пошуком наближень до режимів резонансів.

Наявність газової складової, що реагує на зміни тисків у системі, приводить до деформацій всього середовища. Останнє відображується змінами його загального об'єму під силовою дією, що дає змогу визначити відповідне співвідношення у формі поняття жорсткості в механічних системах.

Поглиблене вивчення гідродинаміки взаємодії газорідинних систем з зовнішніми впливами і збуреннями надає можливість оцінити перспективи інтенсифікації масообміну і разом з тим впливи на мікрофлору, задіяну в процесі.

Останнє може мати подвійний наслідок. Для випадків накопичення біомаси мікроорганізмів в інтересах технологій є їх активація, підвищення якісних показників, збільшення виходу. Аналогічні результати очікуються і у випадках мікробіологічних технологій, за різних видів бродіння тощо. Подібні багатопланові перспективи досить часто зорієнтовані на однакові методи обробки середовищ.

Аналіз результатів досліджень приводить до висновку про доцільність цілеспрямованого введення додаткових енергетичних потоків у зону утворення міжфазної поверхні у формі пульсацій, створення додаткових силових потенціальних полів, організованої гідродинаміки тощо.

Розглянемо фіксований об'єм газорідинного середовища, що знаходиться в режимі безперервної аерації. Хоча таке середовище є безумовно динамічним, однак його показники, що стосуються газоутримувальної здатності, гідродинаміки тощо залишаються на рівні, який можна вважати умовно стабільним. Це припущення дає змогу вважати газорідинне середовище умовно пружним, відносно якого можливо застосувати методи опору матеріалів і динаміки матеріальних систем.

Розглянемо перебіг процесів у такій системі за умови зростання зовнішнього тиску (рис. 1). Очевидно, що за наявності газової фази в початковому об'ємі u_1 за зростання зовнішнього тиску від початкового значення P_1 до P_2 диспергована газова фаза зменшується в об'ємі до u_2 з проявом певних пружних властивостей.

За аналогією з механічними системами розглянемо масив газорідинної системи як середовище, що підлягає одновісному стисканню під дією зовнішньої сили PF , де F — площа перерізу масиву. В результаті такого процесу висота шару зменшиться від величини h_1 до h_2 , а абсолютна деформація складе:

$$\Delta h = h_1 - h_2, \text{ м.} \quad (10)$$

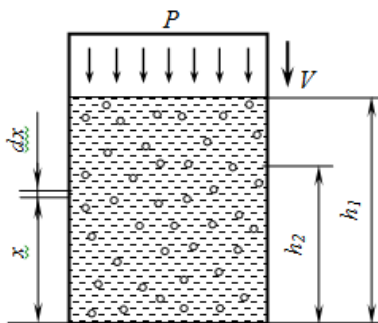


Рис. 1. Розрахункова схема до випадку впливів змін зовнішнього тиску на динаміку газорідинної системи

Відношення силової дії до величини лінійної деформації середовища назовемо жорсткістю системи c :

$$c = \frac{PF}{\Delta h} = \frac{PF}{h_1 - h_2}, \text{ Н/м.} \quad (11)$$

Значення h_1 та h_2 визначимо за формулами:

$$h_1 = \frac{V_{\text{рід}} + u_1}{F}; \quad h_2 = \frac{V_{\text{рід}} + u_2}{F}, \text{ м.} \quad (12)$$

Тоді отримано:

$$\Delta h = \frac{V_{\text{рід}} + u_1}{F} - \frac{V_{\text{рід}} + u_2}{F}, \text{ м.} \quad (13)$$

З умови ізотермічного процесу випливає:

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{P_1}{P_2}; \quad u_2 = u_1 \frac{P_1}{P_2}, \text{ м}^3. \quad (14)$$

Підстановкою (14) у рівняння (13) одержуємо:

$$\Delta h = \frac{V_{\text{рід}} + u_1}{F} - \frac{V_{\text{рід}} + u_1 \frac{P_1}{P_2}}{F} = \frac{u_1 (P_2 - P_1)}{P_2 F}, \text{ м.} \quad (15)$$

Тоді з урахуванням рівняння (11) жорсткість системи складає:

$$c = \frac{P_2^2 F^2}{u_1 (P_2 - P_1)}, \text{ Н/м.} \quad (16)$$

З теорії коливань відомо, що жорсткість системи є однією із складових, що визначає її власну частоту коливань, а іншою впливовою складовою виступає маса. В нашому випадку остання має розподілений по висоті шару характер. В такому випадку здійснюється перехід до приведеної маси.

Очевидно, що для випадку газорідинної системи можливо знехтувати масою газової фази і в приведеній врахувати тільки масу рідинної фази.

Визначення приведених мас здійснюється на принципі еквівалентності кінетичних енергій. В нашому випадку скористаємося способом Релея для системи сталого перерізу F , що підлягає стисканню для представлення її у вигляді зібраної маси, а квазіпружні властивості відобразимо невагомим пружним зв'язком (рис. 1).

На висоті x виділимо елементарну ділянку висотою dx .

Кінетична енергія виділеного елемента:

$$dE_k = \frac{F \rho v_x^2}{2} dx, \quad (17)$$

де ρ — густина газорідинної суміші; v_x — швидкість руху елементарного об'єму.

Якщо швидкість руху шару на висоті h_1 позначимо через v , то при $F = \text{const}$ можливо прийняти:

$$v_x = \frac{vx}{h_1}.$$

Тоді одержуємо:

$$dE_k = \frac{F \rho v^2}{2 h_1^2} x^2 dx, \quad (18)$$

а повна кінетична енергія системи —

$$E_k = \int_0^{h_1} \frac{F \rho v^2}{2 h_1^2} x^2 dx = \frac{F \rho v^2 h_1}{6} = \frac{m v^2}{6}, \quad (19)$$

де m — маса газорідинної системи.

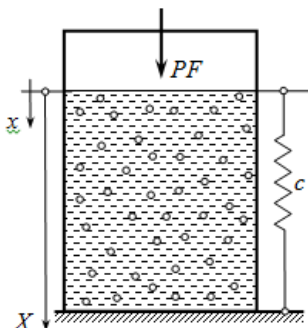


Рис. 2. Розрахункова система квазіпружної моделі газорідинного середовища

Кінетична енергія приведеної до перерізу з висотою h_1 маси записується у формі:

$$E_{k.пр} = \frac{m_{пр} v^2}{2}. \quad (20)$$

За умовою приведення мас $E_k = E_{k.пр}$ записуємо:

$$\frac{m_{пр} v^2}{2} = \frac{m v^2}{6}. \quad (21)$$

Звідси визначаємо приведену масу рідинної фази:

$$m_{пр} = \frac{m}{3}. \quad (22)$$

За наявності математичних формалізацій, якими відображуються приведені жорсткість газорідинної суміші і маса рідинної фракції модель перехідного процесу деформації системи під дією тиску $P = \text{const}$ при $t_{(к)} \rightarrow 0$ за початкового тиску P_0 записується у формі, що відповідає розрахунковій системі по рис. 2:

$$m_{пр} \ddot{x} = PF + m_{пр} g - cx. \quad (23)$$

Перехід до форми, придатної до інтегрування, дає змогу записати:

$$\ddot{x} + \frac{c}{m_{пр}} x = \frac{PF}{m_{пр}} + g. \quad (24)$$

Звідси отримаємо:

$$x = A \sin \sqrt{\frac{c}{m_{пр}}} t + B \cos \sqrt{\frac{c}{m_{пр}}} t + \frac{PF}{c} + \frac{g m_{пр}}{c}, \text{ м.} \quad (25)$$

Сталі інтегрування A та B визначаємо за початкових умов:

$$t_{(n)} = 0; \quad x_{(n)} = \frac{P_0 F + g m_{пр}}{c}; \quad \dot{x}_{(n)} = 0. \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \text{Тоді } \frac{P_0 F}{c} + \frac{g m_{\text{пр}}}{c} &= B + \frac{g m_{\text{пр}}}{c} + \frac{P F}{c}; \\ B &= \frac{P_0 F}{c} - \frac{P F}{c} = \frac{F}{c} (P_0 - P). \end{aligned} \quad (27)$$

Диференціювання умови (25) надає можливість записати:

$$\dot{x} = A \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} \cos \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t - B \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} \sin \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t, \text{ м/с} \quad (28)$$

і звідси $A = 0$.

Підстановкою сталих інтегрування в умову (25) одержуємо:

$$x = \frac{P F + g m_{\text{пр}}}{c} + \frac{F}{c} (P_0 - P) \cos \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t, \text{ м.} \quad (29)$$

З урахуванням рівняння (16) отримаємо:

$$x = \frac{u_1 (P - P_0)}{P^2 F^2} \left(P F + g m_{\text{пр}} + F (P_0 - P) \cos \sqrt{\frac{P^2 F^2}{u_1 m_{\text{пр}} (P - P_0)}} t \right), \text{ м.} \quad (30)$$

Швидкість деформації газорідинного шару визначається залежністю:

$$\dot{x} = \frac{u_1 (P - P_0) (P_0 - P)}{P^2 F} \sqrt{\frac{P^2 F^2}{u_1 m_{\text{пр}} (P - P_0)}} \sin \sqrt{\frac{P^2 F^2}{u_1 m_{\text{пр}} (P - P_0)}} t, \text{ м/с.} \quad (31)$$

Значенню $\dot{x}_{(\kappa)} = 0$ відповідає умова:

$$\sqrt{\frac{P^2 F^2}{u_1 m_{\text{пр}} (P - P_0)}} t_{\text{екс}} = \pi, \quad (32)$$

де $t_{\text{екс}}$ — екстремальний час завершення деформації середовища.

$$t_{\text{екс}} = \pi / \sqrt{\frac{P^2 F^2}{u_1 m_{\text{пр}} (P - P_0)}}, \text{ с.} \quad (33)$$

Знайденому значенню $t_{\text{екс}}$ відповідає умова:

$$\cos \sqrt{\frac{P^2 F^2}{u_1 m_{\text{пр}} (P - P_0)}} t_{\text{екс}} = -1$$

і екстремальне значення деформації середовища:

$$x_{\text{екс}} = \frac{u_1 (P - P_0)}{P^2 F} (P F + g m_{\text{пр}} + F (P - P_0)), \text{ м.} \quad (34)$$

Тоді приріст деформації в результаті перехідного процесу під дією тиску P складе:

$$\Delta x = x_{\text{екс}} - x_{(\text{н})}, \text{ м,} \quad (35)$$

а зміна об'єму ΔV газорідинного середовища становитиме:

$$\Delta V = \Delta x F = (x_{\text{екс}} - x_{(\text{н})}) F, \text{ м}^3. \quad (36)$$

Визначені параметри надають можливість оцінити енергетичні витрати, пов'язані зі стабілізацією тиску в системі:

$$E_{\text{ст}} = \Delta V (P - P_0) = (x_{\text{екс}} - x_{\text{п}}) F (P - P_0), \text{ Дж.} \quad (37)$$

Запропонована математична модель у частині, що стосується приведеної жорсткості і приведеної маси, означає можливість визначити частоту власних коливань газорідинної системи:

$$\omega = \sqrt{\frac{P^2 F^2}{u_1 m_{\text{пр}} (P - P_0)}}, \text{ с}^{-1}. \quad (38)$$

Очевидно, що останнє забезпечує узгодження останніх з частотою зовнішніх впливів з метою наближення до резонансних зон та інтенсифікації таким чином масообмінних і енергообмінних процесів.

Розглянутий етап стискання газорідинного середовища завершується максимальною деформацією $x_{(\kappa)} = x_{\text{max}}$ і кінцевою швидкістю $\dot{x}_{(\kappa)} = 0$. Якщо на цей момент припинити дію збурюючої сили PF і перевести в рамки значення $P_0 F$, то розпочнеться зворотний процес зростання об'єму системи під дією потенціалу стиснутої газової фази. Розширення останньої на рівні газових бульбашок означає потужний силовий вплив, який визначається через приріст Δu газотримувальної здатності, приріст міжфазної поверхні і створення нової за рахунок часткової дегазации. Важливо, що і перший, і другий етапи можуть бути цілком контрольованими за рахунок забезпечення обраних законів змін тисків, а швидкоплинність другого етапу забезпечує гарантовану наявність енергетичного імпульсу високого рівня. Перехід до режимів імпульсних впливів на газорідинні середовища забезпечить підвищення продуктивності, зниження питомих енергетичних витрат і відповідну економічну ефективність.

Висновки

Будь-яку газорідинну систему з наявністю в ній розчиненої та диспергованої газової фракції можливо розглядати як квазіпружну і таку, що відгукується на зміни тисків у газовому надрідинному об'ємі. Пружні властивості такої системи визначаються величиною газотримувальної здатності, яка залежить від фізико-хімічних властивостей рідинної і газової фаз, геометрії середовища вхідного або самогенерованого потоку газової фази, особливостей циркуляційних контурів тощо.

Запропоновано пружні властивості газорідинних середовищ визначати параметром жорсткості у формі відношення силової дії до деформації, яка дією цієї сили викликається. Приведену масу рідинної фракції доцільно визначати за принципом Релея.

Математична модель пружної системи у формі рівняння Д'Аламбера-Лагранжа надає можливість знайти співвідношення між силовими і кінематичними параметрами, деформаціями та енергетичними характеристиками зовнішніх впливів.

Запропонована технологія інтенсифікації масообмінних процесів у сукупності з математичним обґрунтуванням відкриває перспективи їх наукового і прикладного використання.

Література

1. Палаш А. А. Підвищення ефективності і удосконалення обладнання для культивування мікроорганізмів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 «Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв» / Палаш Анатолій Анатолійович; НУХТ. Київ, 2011. 20 с.
2. Піддубний В. А. Наукові основи і апаратурне оформлення перехідних процесів харчових і мікробіологічних виробництв: дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.12 «Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв» / Піддубний Володимир Антонович; НУХТ. Київ, 2007. 299 с.
3. Sokolenko A., Koval O. Process parameters of aerobic synthesis of microorganisms: scientific development and achievements. London: *SCIEMCEE*, 2018. Volume 5. P. 319—333.
4. Інтенсифікація тепло- масообмінних процесів в харчових технологіях: монографія / Соколенко А.І., Мазаракі А.А., Шевченко О.Ю. та ін. Київ: Фенікс, 2001. 536 с.
5. Технологія спирту: підруч. / Маринченко В. О., Домарецький В. А., Шиян П. Л. та ін. Київ, 2003. 496 с.
6. Енергоматеріальні потоки харчових і мікробіологічних виробництв: монографія / Соколенко А. І., Піддубний В. А., Васильківський К. В. та ін. Київ: Кондор, 2016. 326 с.
7. Шевченко О. Ю. та ін. Особливості трансформацій матеріальних і енергетичних потоків у бродильних середовищах. *Наукові праці НУХТ*. 2017. Т. 23, № 3. С. 107—115.
8. Інтенсифікація енерго- і масообмінних процесів у культуральних середовищах бродильних і мікробіологічних виробництв: монографія / Соколенко А. І., Шевченко О. Ю., Васильківський К.В. та ін. Київ: Видавничий дім «Кондор», 2018. 212 с.
9. Intensification of energy and mass exchange processes in fermentation technologies: monograph / Sokolenko A., Shevchenko O., Vasylykivskyi K. and other. Pleven: Mediateh, 2018. 145 p.
10. Соколенко А. І., Піддубний В. А., Чагайда А. О. Енергоматеріальні трансформації в харчових технологіях на основі замкнутих контурів: монографія. Київ: Кондор, 2015. 300 с.