

## MASS TRANSMISSION INTENSIFICATION IN GAS-LIQUID SYSTEMS

A. Sokolenko, O. Shevchenko, V. Kostyuk, S. Litvinchuk

*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

*Intensification  
Mass transfer  
Force of inertia  
Similarity criteria  
Gas-liquid medium*

---

**Article history:**

Received 01.10.2020  
Received in revised form  
13.10.2020  
Accepted 27.10.2020

---

**Corresponding author:**

O. Shevchenko

**E-mail:**

tmipt@ukr.net

---

**ABSTRACT**

The article concerns materials related to solving problems of mass transfer intensification in gas-liquid media on the example of a system with air aeration of liquid phases. The estimates of systems and the ratios of their parameters take into account the peculiarities of transients in accordance with the principles of Le Chatelier and the most probable state.

The set of factors influencing the intensification of mass transmission includes driving forces and resistance forces, which are represented at the levels of macro- and microphysical processes. Macroprocesses include the formation of a discrete gas phase and a set of gas arrays that lead to the concept of gas holding capacity of the medium. Taking into account Archimedes' law, the gas holding capacity is defined as a driving factor in creating the volumetric stress state and energy potential of the circulation circuits. The analysis of combinations of parameters as a part of criteria of hydrodynamic similarity of Reynolds, Froud and Euler has led to the list of forces: gravity, inertia, friction and pressure. The assessment of the possibilities of their use as regulatory factors led to the conclusion that the most probable factor is the force of inertia, because it is a response to variable kinematics parameters in the movement of gas-liquid flows.

The established relations between force indicators and gas holding capacity of the environment show possibilities of generation of forces of inertia. The existing physical connection between hydrostatic pressures and force manifestations at the level of Archimedes' law in conjunction with Newton's third law led to the confirmation of the prospects of using pulsating and other influences in the form of linear or centrifugal forces of inertia.

The given generalizations and formalizations are supplemented by examples of possibilities of their applications in applied developments.

## ІНТЕНСИФІКАЦІЯ МАСОПЕРЕДАЧІ В ГАЗОРІДИННИХ СИСТЕМАХ

А. І. Соколенко, О. Ю. Шевченко, В. С. Костюк, С. І. Літвинчук  
Національний університет харчових технологій

*Стаття стосується матеріалів, пов'язаних з вирішенням задач інтенсифікації масопередачі в газорідних середовищах на прикладі системи з повітряною аерацією рідинних фаз. В оцінках систем і співвідношень їх параметрів ураховані особливості перехідних процесів відповідно до принципів Ле Шательє та найбільш імовірного стану.*

*Набір факторів впливу на інтенсифікацію масопередачі включає рушійні сили та сили опору, які представлені на рівнях макро- і мікрофізичних процесів. До макропроцесів віднесено формування дискретної газової фази і сукупності газових масивів, тобто йдеться про поняття газоутримувальної здатності середовища. Згідно із законом Архімеда газоутримувальна здатність визначена як рушійний фактор у створенні об'ємного напруженого стану й енергетичного потенціалу циркуляційних контурів. Аналіз сполучень параметрів у складі критеріїв гідродинамічної подібності Рейнольдса, Фруда та Ейлера визначив перелік сил тяжіння, інерції, тертя і тиску. Оцінка можливостей їх використання як регулятивних факторів дає змогу стверджувати, що найбільш імовірним фактором є сила інерції, яка є відгуком на змінні кінематичні параметри в русі газорідних потоків.*

*Встановлені співвідношення між силовими показниками і газоутримувальною здатністю середовища показують можливості генерування сил інерції. Існуючий фізичний зв'язок між гідростатичними тисками і силовими проявами на рівні закону Архімеда в сукупності з третім законом Ньютона підтвердив перспективи використання пульсаційних та інших впливів у формі лінійних або відцентрових сил інерції.*

*Наведені узагальнення і формалізації доповнені прикладами можливостей їх застосувань у прикладних розробках.*

**Ключові слова:** інтенсифікація, масопередача, сила інерції, критерії подібності, газорідне середовище.

**Постановка проблеми.** Існування і розвиток харчових, мікробіологічних, хімічних технологій і більшість проявів біологічного світу пов'язані з перебігом енерго- і масообмінних процесів. При цьому використаний термін «перебіг» вказує на певний рівень динаміки, що стосується кінематичних, силових і енергетичних параметрів систем рідинних, газорідних і комбінованих з наявністю твердої фази тощо. Зміни названих параметрів можливо узагальнити назвою перехідних процесів [1—4], а бажані трансформації в них досягаються за рахунок руху, який є невід'ємною властивістю матерії.

У масообмінних системах взаємодія між їх складовими на рівні енерго- і масообміну здійснюється двома складовими або способами. Перший спосіб відпові-

дає передачі потоків у формі маси, а другий — стосується передачі у формі роботи, яка здійснюється в силовому полі або досягаються зміни об'ємів середовищ за рахунок зовнішніх тисків [5; 6]. У теоретичному узагальненні робота визначається макрофізичною формою передачі потоків, а енерго- і масообмін є сукупністю мікрофізичних процесів. Закономірності спрямування перебігу природних процесів за Клаузіусом характеризуються їх самопливністю, тому їх інколи називають «некомпенсованими». Такі самопливні процеси представлені теплопровідністю, дифузією, перетворенням роботи в теплоту, а виконання незворотних процесів потребує термодинамічних компенсацій. У круговому несамопливному процесі перетворення в роботу компенсується одночасним самопливним процесом передачі частини підведеної маси від передавача до приймача.

В організації перехідних процесів мають бути враховані дві особливості. Перша з них стосується принципу Ле Шательє: «Якщо на систему, що знаходиться в стані рівноваги, здійснити якийсь вплив, то в результаті перебігу в ній процесів *рівновага* зміститься в напрямку, який вказаний вплив обмежить». Одним із наслідків принципу Ле Шательє стосовно механічних систем є висновок про те, що найбільш стійкій умові рівноваги відповідає мінімум її потенціальної енергії. Подібний висновок повноправно слід зробити і стосовно хімічних самопливних процесів у бік зменшення внутрішньої енергії, що відповідає позитивному тепловому ефекту реакції [7].

Однак орієнтація системи лише на мінімізацію енергетичного потенціалу не єдина закономірність у зв'язку з природною особливістю систем, відображеною у принципі спрямованості процесів до найбільш імовірного стану системи, якому відповідає максимальна невпорядкованість розташування частинок. У зв'язку з наведеною інформацією відмітимо, що напрямки перетворень у хімічних, теплових, біохімічних процесах керуються двома факторами: тенденцією до переходу системи до стану з найменшою внутрішньою енергією і тенденцією до найбільш імовірного стану [8].

Самопливні процеси в загальній сукупності організованих технологій наявні в меншій кількості, тоді як перебіг інших перехідних та усталених процесів забезпечує необхідні рівні енерго- і масопередачі та, очевидно, кінцевий результат у цілому. Виконання авторами робіт на замовлення промисловості та феноменологічний аналіз теоретичних положень щодо особливостей перебігу перехідних процесів у газорідних середовищах підтверджує можливість і доцільність їх подальшого розвитку [9; 10].

**Мета дослідження:** вибір заходів інтенсифікації масопередачі на основі аналізу існуючих положень, які характеризують відомі закономірності перебігу процесів у газорідних середовищах з розробкою аналітичних формалізацій.

**Викладення основних результатів дослідження.** Загальновідомо, що перебіг будь-якого процесу передбачає наявність рушійного фактора, фактора опору, поверхні взаємодії, дисипативних властивостей середовищ і систем тощо. Перелік цих параметрів дає змогу зробити перший крок у виборі напрямків впливів на систему.

У публікації [9] показано, що досягнення інтенсифікації масообмінних процесів у газорідних середовищах потребує силових втручань, які змінюють гідродинамічні характеристики системи. Такій точці зору відповідають критерії гідродинамічної подібності в переліку Рейнольдса, Фруда, Ейлера. Так, набір параметрів у критерії  $Re$  відображується відомою залежністю:

$$Re = \frac{wd\rho}{\mu}, \quad (1)$$

де  $w$  — швидкість потоку, м/с;  $d$  — геометричний розмір газових бульбашок, м;  $\rho$  — густина рідинної фракції, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  — динамічна в'язкість рідинної фракції, Па·с.

Здійснити оцінку переходу від безрозмірного критерію до співвідношення силових параметрів можливо за рахунок доповнення чисельника і знаменника параметрами  $w$  і  $d$ :

$$Re = \frac{wd\rho}{\mu} \cdot \frac{d}{d} \cdot \frac{w}{w} = \frac{\text{сила інерції}}{\text{сила тертя}}. \quad (2)$$

Тож відповідальний за режим течії середовища критерій  $Re$  характеризує співвідношення між силами інерції та силами тертя. У пошуках відповіді на питання про те, як таким висновком скористатися, нагадаємо, що коефіцієнт динамічної в'язкості  $\mu$  відображує собою роботу, яку необхідно здійснити за течії шарів рідини для одиничних об'ємних витрат, м<sup>3</sup>/с, що видно з наступного запису:

$$[\mu] = \text{Па} \cdot \text{с} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{с} \cdot \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = \text{Дж}. \quad (3)$$

Перехід до кінематичної в'язкості дає аналогічний результат:

$$[\nu] = \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{с}} = \text{Дж}, \quad (4)$$

який одержали на тій основі, що кінематична в'язкість відображує роботу, що необхідно виконати для відносного переміщення шарів рідини або газу для одиниці масового потоку, кг/с.

Число Фруда  $Fr = w^2 / (g\ell)$  характеризує співвідношення між силами інерції і силами тертя в потоці рідини, оскільки в газових потоках цей критерій важливого значення не має через обмежену масу газової фази. Підтвердження вказаному співвідношенню сил одержуємо у трансформованій формі числа Фруда:

$$Fr = \frac{w^2}{gd} \cdot \frac{m}{m} \cdot \frac{d}{d} = \frac{mw^2}{d^2} \cdot \frac{d}{mg} = \frac{\text{сила інерції}}{\text{сила тяжіння}}. \quad (5)$$

Силовому співвідношенню відповідає і критерій Ейлера:

$$Eu = \frac{P}{\rho w^2} = \frac{\text{сила тиску}}{\text{сила інерції}}, \quad (6)$$

де  $P$  — тиск у системі, Па.

З наведених характеристик гідродинамічних режимів впливає роль співвідношень силових параметрів у перебігу фізичних, хімічних, мікробіологічних процесів, що стосуються як одного за природою потоку, так і певної їх сукупності.

Оцінка наявності вказаних силових співвідношень приводить до припущення про те, що вони відображують рушійні фактори і фактори опору в процесах енерго- і масопередачі. І таке припущення підтверджується тим, що вони трансформуються у співвідношення у формі джоуля. На підтвердження цієї особливості повернемося до числа Fr:

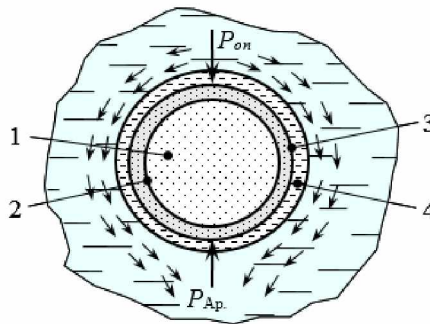
$$Fr = \frac{w^2}{gd} = \frac{w^2}{gd} \cdot \frac{m}{m}, \frac{\text{Дж}}{\text{Дж}}. \quad (7)$$

Перехід в оцінках стану систем від силових показників до енергетичних є логічним, оскільки і рушійні сили, і сили опору проявляють себе на певних макро- або мікропереміщеннях. Оскільки існування інформації щодо критеріїв подібності є вказівною для численних спроб відтворення інтенсивних технологічних процесів [10; 11; 13], то додаткове звертання до ролі сил інерції з можливістю їх генерування в технічних системах в цьому дослідженні оцінюється перспективним.

Відомо, що генерування сил інерції з механічної точки зору досягається за рахунок зміни значень між рушійними факторами і факторами опору або за зміни рухомої маси системи за інших рівних умов, або за їх комбінацій. При цьому прояв сили інерції в системі означає наявність прискорення і одночасно перехідного процесу.

Подальший аналіз особливостей перебігу таких процесів доцільно вести на прикладі газорідинних систем, наявність у яких диспергованої газової фази дає змогу здійснювати насичення рідинної фракції розчиненим киснем у режимі аерації. Такі технології відповідають аеробним процесам, у яких вхідний потік повітря вводиться в середовище примусово з подальшим диспергуванням. Технічне оформлення систем може бути різним, наприклад, у формі реактора з барботажною системою, механічними диспергаторами, ежекційними апаратами тощо або у формі трубчастих систем різної конфігурації. Проте незалежно від технічного виконання всі технології мають спільну особливість, за якою наявність диспергованої газової фази в рідинній приводить до порушення умови суцільності середовища. Така спільність означає наявність масообмінних процесів на межі поділу фаз. У разі споживання розчиненого кисню з рідинної фази створюються умови дифузійного переходу газової фази з бульбашок в рідинну з розчиненням в останній. Особливістю повітряної фази у складі 78% мас. азоту і 21% мас. кисню є те, що кисень відноситься до числа газів обмеженої розчинності [11], тому в пошуках методів інтенсифікації масопередачі доцільно звернутися до висновків, які узагальнюють теоретичні та експериментальні дослідження [12—15]. У спрощеному вигляді сформульовано твердження про те, що основний опір масопередачі чиниться в рідинній плівці (рис. 1). У зв'язку з цим існує поняття «швидкість оновлення поверхні контактування фаз». При цьому заслуговує на увагу те, що швидкість оновлення є кінематичним параметром і вона пов'язана зі швидкістю спливання в усталеному режимі під дією рівнодіючих у

формі, що відповідає закону Архімеда й опору середовища. Спливання кожної бульбашки супроводжується обтіканням рідиною фазою за участі впливів сусідніх бульбашок у масиві. Ця взаємодія визначає загальний рівень гідродинамічного стану середовища і результат по масопередачі, який також залежить від в'язкості рідинної фази, площі поверхні контактування фаз, фізико-хімічних параметрів середовища, властивостей газової фази тощо. Проте стосовно інтересів загальної технології можливо визначити такий набір параметрів, якому відповідає ситуація у формі інших рівних умов. Саме перехід до їх підтримання дає підстави підтверджувати важливість звертання до силових впливів у газорідних системах. Сукупність таких силових впливів, як показано вище, відображена в критеріях гідродинамічного стану. Це сили тяжіння, рушійні, опору, інерції й тиск. Сили тяжіння в системі можуть бути представлені як стаціонарні або циклічної дії в режимах створення циркуляційних контурів. Важливо, що робота сил тяжіння і сил інерції в теоретичних оцінках за цикл дорівнюють нулю, однак у режимах їх перебігу ця умова не виконується, що означає наявність додаткових силових впливів. Організація циркуляційних контурів з наявністю в них змінних швидкостей на окремих ділянках означає щодо середовища подвійний вплив. На тих із них, де рух потоків прискорений, результуючі сил інерції відображують і доповнюють сили опору, а на ділянках зі сповільненим рухом — роль рушійних факторів.



**Рис. 1.** Схема структури системи «бульбашка — рідинна фаза»: 1 — газовий об'єм бульбашки; 2 — газова шлівка, що прилягає до міжфазної поверхні; 3 — міжфазна поверхня; 4 — рідинна шлівка

Процес масопередачі в газорідній системі має дві складові. Перша з них може оцінюватися на рівні макровпливів і стосуватися фізичної взаємодії між диспергованою газовою і рідинною фазами. Другу складову, що відноситься безпосередньо до масопередачі на поверхні поділу фаз, віднесемо до мікровпливів. Такий поділ доцільно ввести, оскільки ці дві складові мають різні основи щодо рушійних факторів. Так, гідродинамічний стан є відображенням впливу газотримувальної здатності і по диспергованій газовій фазі у формі залежності:

$$P_{\text{руш}} = P_{\text{Ар}} = \nu \rho g, \text{ Н} \quad (8)$$

тоді як складова щодо масопередачі відображується відомою формулою:

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

де  $\frac{dm_{O_2}}{d\tau}$  — масовий потік кисню в процесі масопередачі;  $\beta$  — коефіцієнт масопередачі, м/с;  $F$  — площа міжфазної поверхні, м<sup>2</sup>;  $c_n$  — стала насичення рідинної фази киснем, кг/м<sup>3</sup>;  $c_\tau$  — плинна концентрація розчиненого кисню, кг/м<sup>3</sup>.

Параметрами, що об'єднують умови (8) і (9), є газотримувальна здатність і поверхня масопередачі. Якщо ввести опосередковане значення діаметра  $d$  бульбашок диспергованої газової фази, то одержимо такі співвідношення, які стосуються їх числа  $n$  в масиві:

$$u = V_6 n; \quad n = \frac{u}{V_6}; \quad V_6 = \frac{1}{6} \pi d^3; \quad S_6 = \pi d^2; \quad F = n \pi d^2 = \frac{u}{V_6} \pi d^2 = \frac{6u}{d}. \quad (10)$$

Тоді 
$$\frac{dm_{O_2}}{d\tau} = \frac{6u}{d} \beta (c_n - c_\tau). \quad (11)$$

Існуюча інформація щодо взаємозв'язків між параметрами дає змогу відмітити у формалізованій формі таке:

- газотримувальна здатність є функцією приведеної швидкості  $w_{пр}$ , що розраховується за значенням вхідного потоку газової фази, віднесеної до площі перерізу реактора  $w_{пр} = M_{газ} / f_{ан}$  та швидкості спливання газової фази  $w_{сп}$  в рідинній. Тоді маємо можливість запису:

$$u = u(w_{пр}, w_{сп}); \quad (12)$$

- діаметр газових бульбашок залежить від фізико-хімічних властивостей рідинної фази, зокрема від динамічної в'язкості  $\mu$ , коефіцієнта поверхневого натягу  $\sigma$  і температури  $t$ , що відповідає запису:

$$d = d(\mu, \sigma, t) \approx \text{const}; \quad (13)$$

- коефіцієнт масопередачі відображується залежністю від параметрів,  $\beta = \beta(\mu, \sigma, t, u)$  і тому за умови (13) отримаємо:

$$\beta = \beta(u). \quad (14)$$

З переліку умов (12)—(14) випливає, що за таких рівних умов можливості інтенсифікації масопередачі ґрунтуються на силових взаємних впливах між фазами. Це означає доцільність їх додаткового генерування на рівні сил інерції і стосується складової макровпливів. Одночасно з цим заслуговують на увагу і можливості складової мікровпливів, які відображуються законом Генрі:

$$c_n = kP, \text{ кг / м}^3, \quad (15)$$

де  $k$  — константа Генрі, кг/(м<sup>3</sup>·Па);  $P$  — парціальний тиск кисню в газовій фазі, Па.

Значення константи Генрі також відображує залежність від фізико-хімічних параметрів рідинної і газової фаз, зокрема від температури. Однак за стабілізації останніх наближаємося до умови:

$$k = k(t) \approx \text{const}. \quad (16)$$

Проте фактор тиску  $P$  однозначно вказує на можливість позитивної ролі у нарощуванні результату по масопередачі. Останнє підтверджується наявністю цього параметра в критерії Ейлера.

Перспективи використання сил інерції пов'язані зі змінами прискорень, за рахунок яких можливо впливати на гідростатичні тиски. Так, за переміщення системи по вертикалі донизу з прискоренням  $a = g$  (вільне падіння) отримаємо значення гідростатичного тиску  $P_{г.с.}$ :

$$P_{г.с.} = \rho(g - a)h = 0.$$

Це означатиме відсутність  $P_{Ар}$  і відсутність відносного переміщення газової фази.

Якщо системі надати прискорення  $a > g$ , то газова бульбашка змінить напрямок свого переміщення. Реалізація таких умов масообміну або наближених до них можлива за накладання на систему вібраційних коливань. Однак викладена ідея може більше стосуватися окремих аераційних систем. Можливим виконанням такого аератора може бути вертикальна труба з газорідною сумішшю, якій задається, наприклад, гармонійний коливальний рух за законом:

$$y = A \sin \omega t.$$

Тоді швидкість і прискорення системи визначимо рівняннями:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= A\omega \cos \omega t; \\ \ddot{y} &= -A\omega^2 \sin \omega t, \end{aligned} \quad (17)$$

де  $y$  — вертикальна координата переміщення системи;  $\dot{y}$  та  $\ddot{y}$  — похідні перша та друга, відповідно, від координати переміщення;  $A$  — амплітуда коливань;  $\omega$  — власна кругова частота коливань системи:

$$\omega = 2\pi/T,$$

де  $T$  — період коливань.

Графічна залежність, що ілюструє закономірності в переміщенні газової фази залежно від прискорень коливань, наведена на рис. 2. Залежно від співвідношень амплітуди  $A\omega^2$  і прискорення вільного падіння  $g$  зона зворотного переміщення може досягатися або не досягатися.

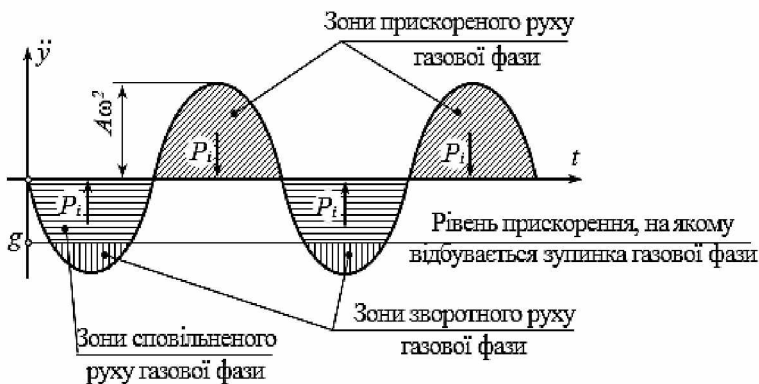


Рис. 2. Графічна залежність щодо характеристики руху газової фази

Із залежності (17) видно, що амплітуда прискорення значною мірою залежить від частоти  $\omega$  і з точки зору технічних можливостей є цілком досяжною до рівня



прискорення вільного падіння. Проте останнє є не єдиним позитивом наведеної теорії взаємодії фаз у режимах створення потенціальних полів сил інерції.

Створення різних сполук гравітаційного поля і полів сил інерції досягається за організації різних криволінійних потоків. Так, на одиничну масу  $m$ , що рухається криволінійною траєкторією з радіусом кривини  $r$  (рис. 3), діють сила тяжіння  $mg$  і сила інерції

$$F_i = m \frac{w^2}{r},$$

де  $w$  — швидкість потоку.

При цьому результуюча двох сил

$$\bar{P}_{\text{рез}} = \bar{m}g + \bar{F}_i$$

є змінною за величиною та орієнтацією в просторі.

Повна сукупність силових факторів потребує врахування сил рушійних і сил опору:

$$\bar{P}_{\text{пов}} = \bar{P}_{\text{руш}} + \bar{m}g + \bar{F}_i + \bar{F}_{\text{тер}}. \quad (18)$$

Змінні значення  $P_{\text{рез}}$  визначають впливи на газову фазу як на рівні змінних тисків, так і на рівні змінних значень архімедових сил.

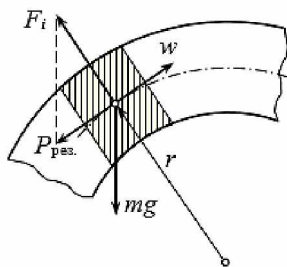


Рис. 3. Схема до оцінки сукупності потенціальних полів сил тяжіння і сил інерції

Співвідношення силових факторів щодо схеми на рис. 3 стосуються орієнтації траєкторії у вертикальній площині. Зміна такої орієнтації дасть інші залежності.

Розглянемо випадок аерації середовища у випадку обертального руху системи в горизонтальній площині. У першому наближенні будемо вважати, що середовище обертається як одне ціле і його кутова швидкість є величиною сталою. Виконаємо оцінку, яка стосується величин архімедових сил для цього випадку. Його розрахункову схему наведено на рис. 4.

Виділимо на радіусі  $r$  циліндричну поверхню  $I-I$  і встановимо відносно неї сукупність потенціальних полів сил тяжіння і сил інерції. Вибраним координатам положення бульбашки відповідає глибина занурення  $h$ , а її об'єму  $V_6$  відповідає архімедова сила, що представлена двома складовими відповідно до принципу суперпозиції:

$$\bar{P}_{\text{Ар.рез}} = \bar{P}_{\text{Ар.г}} + \bar{P}_{\text{Ар.}P_i}. \quad (19)$$

При цьому

$$P_{\text{Ар.г}} = V_6 \rho g; \quad (20)$$

$$P_{\text{Ар.}P_i} = V_6 \rho a^n, \quad (21)$$

де  $a^n$  Ч нормальне прискорення середовища, що відповідає циліндричній поверхні  $I-I$ .

$$a^n = \omega^2 r, \quad (22)$$

де  $\omega$  — кутова швидкість середовища.

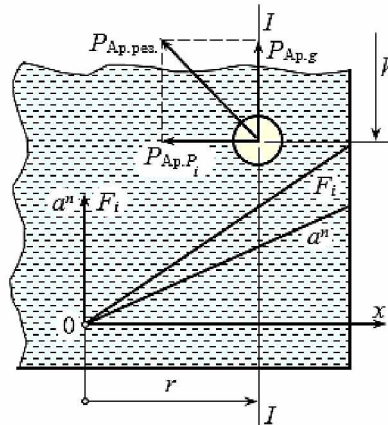


Рис. 4. Розрахункова схема до випадку аерації середовища, що знаходиться в обертовому русі

Нормальне прискорення пропорційне радіусу, а тому на графіку  $a^n = a^n(r)$  (рис. 4) маємо лінійну залежність. Це означає, що сила інерції, яка діє на кожен одиничну масу, розташовану в середовищі, також пропорційна радіусу її розташування. Сукупність цих силових дій утворює потенціальне поле сил інерції, величина якого також характеризується лінійною залежністю  $F_i = F_i(r)$ .

Нагадаємо, що гідростатичний тиск середовища також змінюється за лінійним законом. Очевидно, що такий збіг не випадковий і наслідки дії на бульбашку будуть подібними.

Наслідком наявності змінного гідростатичного тиску є складова  $P_{Ap.g}$  і, відповідно, результатом градієнта по силах інерції — складова  $P_{Ap.P_i}$ . Напрямки векторів  $\bar{P}_{Ap.g}$  і  $\bar{P}_{Ap.P_i}$  є цілком визначені. Перший з них розташовується по вертикалі, а другий — у радіальному напрямку.

З наведених залежностей видно співвідношення силових факторів, що діють на газову бульбашку:

$$\frac{P_{Ap.g}}{P_{Ap.P_i}} = \frac{V_6 \rho g}{V_6 \rho a^n} = \frac{g}{a^n}. \quad (23)$$

Наявність обертового руху середовища, як бачимо, приводить до генерування додаткової силової дії на газову фазу, результатом якої буде зміщення газового потоку до центра обертання. Ця особливість добре відома, як результат, який знаходить застосування в центрифугах, сепараторах, кларифікаторах. Однак запропонована нова модель у своєму фізичному підґрунті більш глибоко розкриває сутність явища, що надає можливість на цій основі прогнозувати заходи щодо інтенсифікації масообміну.

Проведений аналіз підтверджує доцільність генерування імпульсних впливів у режимах перехідних процесів у формі сил інерції. Останнє можливе наданням прискорень у системах як з лінійними переміщеннями газорідних, рідинних або інших потоків, так і в разі таких переміщень криволінійними траєкторіями.

У патенті України 37914 пропонується генерування сил інерції різних величин здійснювати за рахунок зміни швидкості потоку в циркуляційному контурі. Реалізація цієї ідеї досягається застосуванням дифузора, гофрованого у радіальному напрямку в складі масообмінного апарата. У зв'язку зі змінним поперечним перерізом дифузора висхідний потік має змінну швидкість, що означає наявність додаткових силових навантажень інерційного потенціального поля сил у формі сил інерції в пульсаційних проявах та інтенсифікацією масообмінних процесів одночасно на макро- і мікрорівнях.

Інтенсивні можливості аераційних систем мають перспективи широкого застосування в різних напрямках технологій, зокрема для очищення стічних вод підприємств, риборозвідних господарств, автозаправних станцій, станцій для мийки автотранспорту тощо. Патент України 37915 стосується пристрою для очищення стічних вод, що складається з аеротенка з дифузorzом, насоса і гідравлічної системи зв'язку, який відрізняється тим, що напірна ділянка гідравлічної системи устаткована масообмінним ежектором з гідрозатвором-забірником повітря та криволінійним трубопроводом зі змінними радіусами й точками перегину кривизни. До числа переваг цієї системи відноситься наявність замкнутого циркуляційного контуру з чотирма ділянками інтенсивних масообмінних процесів: масообмінний ежектор, висхідна і криволінійна ділянки трубопроводу, опускна ділянка трубопроводу з реалізацією режиму, близького до вільного падіння, і внутрішній об'єм дифузора.

Використання аераційного криволінійного трубопроводу зі змінними радіусами і точками перегину кривизни пропонується у патенті України 41918. Важливим аспектом наявності останніх є створення в наближенні до них сил інерції, поперечних до напрямку потоку спрямувань. Таке доповнення потужно впливає на процеси перемішування і масопередачі (рис. 5). Максимальні сили інерції генеруються в точках *B* і *K* з найбільшою кривизною, а в точках *A*, *C*, *E* і *F* у зв'язку зі змінами напрямків  $P'_i$  генеруються м'які динамічні удари.

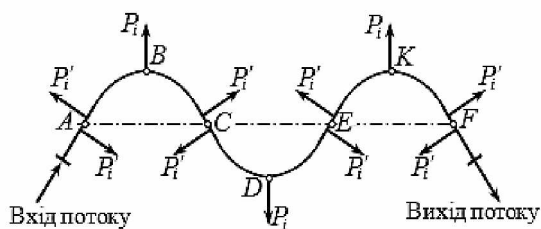


Рис. 5. Схема-ілюстрація наявності і напрямку сил інерції в локальних точках траєкторії потоку

## Висновки

Дослідження взаємозв'язків між кінематичними, динамічними й енергетичними параметрами в газорідних середовищах з примусовим введенням потоків газової фази і подальшим її диспергуванням дають змогу стверджувати, що:

1. Метою взаємодії між газовою і рідинною фазами є масопередача, яка досягається за наявності рушійних факторів, створення відповідних енергетичних потенціалів і міжфазної поверхні. В цих процесах можливі дві складові взаємодій. Перша з них стосується створення в системах диспергованої газової фази і узагальнюється макрофізичною формою взаємодій, а друга — у формі мікрофізичних процесів відображує процес масопередачі.

2. Перебіг макро- і мікрофізичних процесів узгоджується з принципами Ле Шательє і підтверджує спрямованість процесів до найбільш імовірних станів.

3. Фактором енергетичного забезпечення газорідних систем є диспергована газова фаза, кількісний показник якої відповідає газотримувальній здатності.

4. Гідродинамічний стан газорідного середовища відображують критеріями гідродинамічної подібності Рейнольдса, Фруда і Ейлера з вказівками на наявність і роль сил тяжіння, тертя та сил інерції. Остання свідчить про наявність перехідних процесів.

5. Взаємозв'язки між газотримувальною здатністю, параметрами диспергованої газової фази, рушійними факторами та інтенсивністю процесів масопередачі вказують на можливість їх інтенсифікації за рахунок генерування сил інерції.

6. Наведені узагальнення і формалізації доповнені прикладами їх застосування в прикладних розробках.

7. Генерування сил інерції на ділянках потоків з прискореним рухом означає зростання енергетичного потенціалу системи за рахунок рушійного фактора, а ділянки зі сповільненим рухом супроводжуються поверненням енергетичного потенціалу, оскільки тут сили інерції виконують роль рушійних. Роль регулятора в режимах генерування сил інерції може належати газотримувальній здатності.

## **Література**

1. Шевченко О. Ю. та ін. Особливості трансформацій матеріальних і енергетичних потоків у бродильних середовищах. *Наукові праці НУХТ*. 2017. Том 23, № 3. С. 107—115.
2. Шевченко О. Ю., Соколенко А. І., Костюк В. С. Генерування енергетичних імпульсів у середовищах бродильних апаратів. *Наукові праці НУХТ*. 2017. Том 23, № 5. Ч. 1. С. 65—71.
3. Степанець О. І. та ін. Гідродинаміка і масообмін у процесах аеробного бродіння. *Харчова промисловість*. 2017. № 22. С. 92—101.
4. Білик О. А. та ін. Енергетичні потенціали газорідних середовищ. *Наукові праці НУХТ*. 2018. Том 24, № 1. С. 107—118.
5. Соколенко А. І. та ін. Динамічні параметри процесів анаеробного бродіння. *Наукові праці НУХТ*. 2018. Том 24, № 2. С. 130—138.
6. Stepanets O. and other Hydrodynamic and energy parameters of gas-liquid media. *Food Science and Technology*. 2018. Volume 12, Issue 3. P. 117—123.
7. Костюк В. С. та ін. Інновації в обладнанні для аеробного синтезу мікроорганізмів. *Харчова промисловість*. № 24. 2018. С. 106—117.
8. Соколенко А. І. та ін. Енергетичні потенціали газорідних середовищ. *Наукові праці НУХТ*. 2018. Т. 24, № 1. 108—118.
9. Koval O. Process parameters of aerobic synthesis of microorganisms: scientific development and achievements. Volume 5. London: SCIEEMCEE, 2018. P. 319—333.
10. Палаш А. А. та ін. Енергетичні імпульси в харчових технологіях. *Наукові праці НУХТ*. 2012. № 47. С. 73—78.
11. Шевченко О. Ю. Наукові основи і апаратурне оформлення процесів довгострокового зберігання харчових продуктів: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Київ: НУХТ, 2006. 43 с.

12. Коваль О. В. Удосконалення процесів і модернізація обладнання бродильних виробництв: дис. ... канд. техн. наук. Київ: НУХТ, 2016. 174 с.
13. Піддубний В. А. Наукові основи і апаратурне оформлення перехідних процесів харчових і мікробіологічних виробництв: дис. ... докт. техн. наук. Київ: НУХТ, 2007. 421 с.
14. Faridkhou A., Larachi F. (2012). Hydrodynamics of Gas-Liquid Cocurrent Flows in Micropacked Beds-Wall Visualization Study. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51 (50), 16495Ч16504.
15. Mandal A. (2010). Characterization of gas-liquid parameters in a down-flow jet loop bubble column/ *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 27 (2).