

УДК 66.074:661

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.25

## МЕТОДОЛОГІЯ РОЗРАХУНКУ РЕЖИМНО-КОНСТРУКТИВНИХ І ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІННИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ПРОЦЕСІВ МАСООБМІНУ

**В. Ф. МОЇСЄВ<sup>1</sup>, Є. В. МАНОЙЛО<sup>1\*</sup>, Н. Г. ПОНОМАРЬОВА<sup>2</sup>, К. Ю. РЕПКО<sup>1</sup>,  
Д. В. ДАВИДОВ<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>каф. ХТПЕ, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

<sup>2</sup>каф. ІТПіА, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

\*email: bublikova1@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Промислова реалізація методу стабілізації газорідного шару дозволяє значно розширити галузь застосування пінних апаратів і відкриває нові можливості інтенсифікації технологічних процесів з одночасним створенням маловідходних технологій. У статті встановлені основні параметри, що впливають на гідродинаміку пінних апаратів, розглянуті основні конструкції та режими роботи пінних апаратів. Виявлено зв'язок гідродинамічних параметрів. Розглянуто гідродинамічні закономірності пінного шару. Вказані фактори, що впливають на процес масообміну, як в газовій, так і в рідкій фазах. Проведений аналіз ряду досліджень показав, що перспективним напрямком інтенсифікації процесу масообміну є розробка апаратів з трифазним псевдозрідженим шаром зрошуваної насадки складних форм із сітчастих матеріалів. Отже, необхідне проведення спеціальних досліджень гідродинамічних режимів роботи апарату з сітчастою насадкою і визначенням параметрів, що впливають на швидкість переходу насадки з одного режиму в інший.

**Ключові слова:** промислові газові викиди; процес уловлювання; гідродинаміка, масообмін; пінний апарат; пінний шар, дослідження процесів очищення; стабілізація пінного шару; інтенсивний апарат

## METHODOLOGY OF CALCULATION OF CONSTRUCTION AND HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF A FOAM LAYER APPARATUS FOR MASS-TRANSFER PROCESSES

**V. MOISEEV<sup>1</sup>, E. MANOULO<sup>1</sup>, N. PONOMARYOVA<sup>2</sup>, K. REPKO<sup>1</sup>, D. DAVYDOV<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Department of Chemical techniques and industrial ecology, NTU «KhPI», Kharkiv, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of Integrating technology, processes and apparatus, NTU «KhPI», Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** Industrial implementation of the stabilization method of the gas-liquid layer can significantly expand the field of use of foaming apparatus and opens up new opportunities for intensifying technological processes with the simultaneous creation of low-waste technologies. The article establishes the basic parameters influencing the hydrodynamics of foam apparatus, considers the basic constructions and operating modes of foam apparatus. The connection of hydrodynamic parameters is revealed. The hydrodynamic laws of the foam layer are considered. The indicated factors affecting the process of mass transfer, both in the gas and in the liquid phases. The conducted analysis of a number of studies showed that the perspective direction of intensification of the mass transfer process is the development of apparatuses with a three-phase fluidized bed of an irrigated nozzle of complex forms with mesh materials.

It is indicated that the mechanism of transition of the nozzle to the mode of advanced fluidization will be significantly different from conventional ballistic nozzles. The study of mass transfer in an absorber with a fluidized bed of an irrigated nozzle is complicated by the fact that the contact surface between phases can vary considerably depending on the hydrodynamic conditions, in particular, on the speed of gas and irrigation density. At the same time it is difficult to determine the influence of these factors in itself on the contact surface and on the coefficient of mass transfer. Consequently, it is necessary to carry out special investigations of the hydrodynamic modes of the apparatus with a mesh nozzle and the determination of the parameters that influence the speed of the transfer of the nozzle from one mode to another. For gas cleaning systems from gaseous components, it is necessary to provide small loads on the liquid while maintaining a high degree of purification. This can be achieved by using a drip tray with a small free section and a newly designed nozzle.

**Key words:** industrial gas emissions; cleaning process; hydrodynamics, mass transfer; foam apparatus; foam layer, research of purification processes; stabilization of foam layer; intensive apparatus

### Вступ

В сучасних умовах значного антропогенного впливу на навколишнє середовище на часі пошук найбільш ефективних і економічних методів очищення промислових викидів. Методи очищення і апаратура, що розробляються повинні враховувати можливість роботи в широкому діапазоні робочих умов. Для зниження енерговитрат в системах уловлювання шкідливих і токсичних речовин необхідно забезпечувати зниження гідравлічного

опору при збереженні високої ефективності очищення газових потоків.

З огляду на суперечливі вимоги до обладнання і незважаючи на велику кількість вже наявних апаратів для проведення масообмінних процесів, розробка нового високоінтенсивного та ефективного обладнання становить значний інтерес для природоохоронних технологій в багатьох галузях промисловості.

Поширеним методом очищення газових потоків

є абсорбційні методи поглинання шкідливих компонентів з відведених промислових газів. При цьому або відбувається процес фізичної абсорбції, або абсорбент вступає в хімічну взаємодію з абсорбуємим компонентом (процес хемосорбції).

Одним з перспективних напрямків інтенсифікації процесу масообміну є розробка апаратів з використанням принципу взаємодії газорідних потоків в шарі рухомих тіл, так званих пінних апаратів з трифазним псевдозрідженим шаром зрошуваної насадки. У порівнянні з традиційними тарілчастими і насадочними колонами пінні апарати з трифазним псевдозрідженим шаром мають ряд переваг:

- можливість роботи в широкому діапазоні швидкостей газу без значного збільшення гідравлічного опору, що особливо важливо для процесів очищення газів в умовах з часто змінними швидкостями потоків як в сторону зменшення, так і в бік збільшення;

- практично рівномірний розподіл рідкої фази по всьому перерізу апарату і повне омивання рідиною поверхні насадки, що призводить до збільшення поверхні масообміну;

- висока турбулізація потоків газу і рідини, що забезпечує високі коефіцієнти тепло- і масообміну;

- можливість інтенсифікації роботи існуючих абсорбційних колон, оснащених провальними тарілками, шляхом використання псевдозріджених насадок.

Починаючи з 1959 р з'явилися повідомлення про можливість інтенсифікації масо- і теплообмінних процесів шляхом застосування цієї конструкції апаратів.

Вперше абсорбери з псевдозрідженою насадкою були застосовані в алюмінієвій промисловості для очищення газів, що відходять від електролізних ванн від фтористих сполук, сірчистого газу, пилу і смолистих речовин, потім набули поширення в основній хімічній промисловості при виробництві мінеральних добрив, в целюлозно-паперовій промисловості, для виробництва ряду органічних речовин.

У якості насадкових тіл в абсорбері з трифазним псевдозрідженим шаром, як правило, використовували порожні кулі з діаметром 20 – 50 мм і щільністю 100 – 900 кг/м<sup>3</sup>, виконані з поліетилену, поліпропілену, гуми та інших порівняно легких матеріалів.

На досліджених раніше насадках апарати з псевдозрідженим шаром використовувалися переважно в технологічних циклах при значних питомих навантаженнях по газу і рідині, що призводило до високих енерговитрат. У той же час в системах очищення промислових газів від шкідливих компонентів, присутніх, як правило, в низьких концентраціях, необхідно забезпечити високий ступінь очищення газу при мінімальних витратах по рідині.

### Мета роботи

Метою роботи є аналіз розрахункових закономірностей ряду гідродинамічних параметрів при обробці газорідних систем у пінному шарі. Проблема обробки промислових газових потоків вирішується за допомогою проведення процесу у інтенсивному режимі. Промислова реалізація абсорбційних процесів у пінному шарі та використання методу стабілізації газорідного шару значно розширює сферу застосування пінних апаратів і відкриває нові можливості інтенсифікації технологічних процесів з одночасним створенням маловідходних технологій. А використання сучасних конструкцій зважених насадок дозволяє модернізувати діючі абсорбційні апарати.

### Викладення основного матеріалу

Для зазначених цілей була розроблена принципово нова об'ємна порожниста насадка. Перевагою цієї насадки є перехід в псевдозріджений стан при порівняно низьких швидкостях газу, а також розвинена поверхня контакту фаз. Чарункова структура, з якої виготовлена насадка, дозволяє досягти підвищених значень коефіцієнтів масопередачі за рахунок ефекту утворення плівки в осередках малого розміру. Насадка має високу порозність і низький гідравлічний опір. Залежно від підбору матеріалу насадка може мати різну змочуваність.

Нові насадки прості за конструкцією і мають порівняно низьку вартість, що дозволяє їх ефективно застосовувати в процесах очищення газів, що відходять у різних виробництвах, в градирнях систем оборотного водопостачання, в ряді інших процесах тепло- та масообміну.

Перші повідомлення про промислове використання апаратів з трифазним шаром зрошуваної насадки з'явилися в 1950-і роки. Повідомлялося, що при очищенні газів, що відходять від алюмінієвого виробництва на пілотній установці забезпечувалася ступінь очищення газу содовим розчином від HF 95% і ступінь знепилення 99%. Також повідомлялося про високу масообмінну здатність подібного апарату. Так, в процесі абсорбції SO<sub>2</sub> розчином NaOH в одноступеневому апараті досягалася ступінь вилучення в залежності від навантажень по газу і рідині від 50,6 до 92,9%.

Приблизно в той же час з'явилися повідомлення про промислове впровадження апаратів з псевдозрідженою насадкою. Відзначається висока продуктивність і ефективність апарату при абсорбції і десорбції, що проводяться в системах «бромний розчин – повітря». Однак застосування в бромній промисловості апарати не знайшли зважаючи на значний їх гідравлічний опір в порівнянні з іншими конструкціями абсорберів.

Також з'являються повідомлення про лабораторні дослідження апаратів з псевдозрідженим

шаром зрошуваної насадки. У літературі є дані про дослідження насадок різної конфігурації (кулясті насадки, насадки у вигляді кілець, насадки складної форми). У наступні роки проводилися дослідження кульової насадки, як найбільш простої за конструкцією і способу виготовлення. Такі дослідження описані в роботах [1-2]. У зарубіжній літературі [3-4] також наводиться опис експериментальних досліджень апаратів з трифазним псевдозрідженим шаром зрошуваних кульових насадок.

### Конструктивні схеми апаратів з трифазним псевдозрідженим шаром

Відомі різні конструкції апаратів з трифазним шаром зрошуваної насадки, які відрізняються за типом насадки і характеру її руху, по конструкції опорно-розподільчої решітки, що утримує сітки, вузлів подачі газу, рідини та ін.

Апарати з трифазним шаром по організації руху потоків газу і рідини на тарілці поділяються на апарати з перехресним, протитечійним і висхідним прямооточним рухом фаз.

В роботі Сабирханова [5] в основу класифікації протитечійних апаратів з псевдозрідженим шаром зрошуваної насадки покладений характер руху насадкових тіл в робочому обсязі; згідно з яким розрізняють апарати зі зваженою насадкою, з фонтануючою насадкою, з обертаємою насадкою і циркулюючою насадкою, з регулярною рухомою насадкою і комбіновані апарати з рухомою насадкою (рис. 1.1).

Апарати зі **зваженою** насадкою [2] відрізняються від інших хаотичним і пульсаційним характером руху елементів насадки в підвищеному стані (рис. 1 а). Апарати зі зваженою насадкою можуть бути секціонованими, тобто в них використовуються різні перегородки, вставки, стабілізатори або сітки великого вільного перетину, які поділяють перетин апарату і його робочу зону на окремі секції. У таких апаратах успішно вирішується питання масштабного переходу від лабораторних моделей до промислових колон без особливої зміни ефективності масо-і теплообміну.

В апаратах з **фонтануючою** насадкою [6] застосовуються зигзагоподібні або конічні тарілки (рис. 1 б). В апаратах з фонтануючою насадкою з зигзагоподібними тарілками фонтанування насадки відбувається в центральній частині кожного зигзагу. Для запобігання скупченню насадки в западинах зигзагів перфорована частина тарілки може виконуватися у вигляді дірчастої або щільної горизонтальної пластини.

У конічних тарілках апаратів з фонтануючою насадкою перфорована тільки частина поверхні. Через звуження перетину тарілки швидкість витікання газу через неї багато вище, ніж у випадку звичайних решіток, тому насадка здійснює в центрі апарату висхідний фонтануючий рух, а під стінками –

спадний.

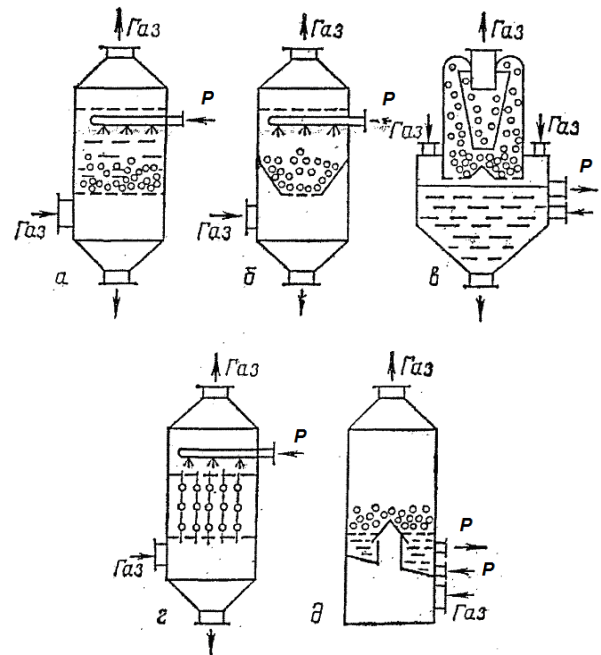


Рис. 1 – Апарати з трифазним шаром зрошуваної насадки: а – зі зваженою насадкою; б – з фонтануючою насадкою; в – з циркулюючою насадкою; г – з регулярною рухомою насадкою; д – комбінований тип

В основі апаратів з **циркулюючою** насадкою і з **обертальною** насадкою [7] лежить циркулюючий або обертальний рух насадки, який організовано за допомогою додаткових трактів, різних способів і спеціальних пристосувань (рис. 1. в).

У робочій зоні апаратів з циркулюючою насадкою спостерігається висхідний рух насадки, яка повертається на решітку через зовнішні транспортні тракти або внутрішні зони в корпусі апарату. Обертання насадки здійснюється різними способами в робочій зоні апарату. Одним з них є потік газу, попередньо закручений за допомогою спрямованих сопел решітки.

В інших випадках застосовуються верхні обмежувальні решітки або відбивачі у вигляді півсфер, перфорованих похилих пластин і ін., які надають насадці обертальний рух.

Апарати з фонтануючими і циркулюючими насадками працюють при підвищених швидкостях газу і мають високий гідравлічний опір.

В апаратах з **регулярною** рухомою насадкою [8] насадков тіла можуть бути вільно насаджені на жорстких струнах або, навпаки, жорстко закріплені на гнучких струнах (рис. 1 г). У першому випадку струни натягнуті між стінками корпусу або між ґратами, рух насадки відбувається тільки по струні; при цьому пробіг кожного елемента насадки по струні обмежений. Гнучкі струни з жорстко закріпленою регулярною рухомою насадкою консольно кріпляться до стінки апарату або до ґрат.

Поширена конструкція насадки, в якій один кінець струни з насадкою фіксується зверху до кріпильної решітки, а інший кінець вільно пропускається через отвір розподільчих грат. Пружність або гнучкість струн дозволяють елементам насадки здійснювати під дією потоків поперечні і поздовжні коливальні рухи.

Регулярні рухливі насадки складні в експлуатації і працюють при підвищених навантаженнях по газу.

**Комбіновані апарати** з рухомою насадкою є ще більш складними конструкціями, що поєднують в собі елементи апаратів з псевдозрідженим шаром і барботажних.

Найбільш поширеними в промисловості є апарати зі зваженою (псевдозрідженою) насадкою, які конструктивно більш прості і можуть бути вдосконалені в напрямку зниження енерговитрат, що важливо для процесів очищення газів.

#### Характеристика насадочних тіл, що застосовуються в абсорбційних апаратах

Насадки нерухомі і рухомі для заповнення абсорберів, повинні володіти великою питомою поверхнею і великим вільним об'ємом, хорошою змочуваністю, що дозволяє мати велику поверхню контакту фаз, низький опір газовому потоку, добре розподіляти рідину по перетину апарату і мати корозійну стійкість у відповідних середовищах.

Насадки можна поділити на два основних типи: нерухомі і псевдозріджені насадки. Нерухомі насадки в свою чергу поділяються на регулярні (структуровані) і насипні.

##### Регулярні стаціонарні насадки

Розвиток регулярних насадок йде в напрямку створення структурованих насадок зі складними каналами для проходу газу і гофрованою листовою поверхнею, що дозволяє рівномірно розподілити рідину і створити умови для ефективного контакту фаз і здійснення процесу масообміну.

До структурованих насадок можна віднести наступні відомі конструкції:

- насадка, що складається з гофрованих газопроникних листів, зібраних в пакет;
- насадка, що складається з плоских і гофрованих листів, які чергуються;
- для збільшення поверхні масообміну листи іноді виконуються зі щілинами або отворами;
- насадки, виконані з дротяних спіралей, всередині яких встановлені додаткові контактні пристрої у вигляді зубчастих пластин;
- до центральної труби прикріплені спіральні стрічки з перфорованого листа, між витками спіральної стрічки розташовані переплетені між собою і утворюючі сітку дровотів спіралі;
- блок волокнистих листів, що в перерізі утворює круглі стільники;
- гвинтові тіла лівого і правого обертання, між ними розташовані гофровані листи.

- насадка виконана з рулонної листової сталі.
- насадки, з горизонтальних рядів похилих поздовжніх прямокутних пластин.

##### Насипні нерухомі насадки

До насипних відносяться насадки, що широко відомі у вигляді кілець Рашига, Палля, сідлоподібні (Інталлокс), так і нові насадки складної форми, представлені в патентах.

Кільцева насадка з метою збільшення контакту фаз може бути забезпечена зовнішнім кільцем з поздовжніми вирізами, приєднаними до перфорованого кільця. Крім того, кільцеві насадки можуть мати отвори будь-якої форми або мати виступи, а іноді обидва ці прийоми поєднуються в одному насадочному елементі.

В роботі Кагана А.М. зі співробітниками [9] описана промислова металева насадка типу ДІАП-3, виконана у вигляді двох перфорованих півкілець, повернених один щодо одного на 90° і з'єднаних перегородкою.

Відомі також насадки складних форм у вигляді різних спіралей, смуг, що утворюють різні замкнуті поверхні. Ці смуги можуть бути як металевими, так і виконані з полімерних матеріалів.

Насадки складної форми можуть також бути виготовлені з тканих матеріалів. Експерименти по гідравлічному опору для кілець Рашига і насадок з ткани полімерної сітки показали, що гідравлічний опір кілець Рашига в 1,7-3,2 рази більше, ніж у подібної насадки. Це пояснюється, в першу чергу, наявністю застійних зон в шарі кілець Рашига, що веде до нових додаткових опорів, а також більш рівномірним розподілом вільного об'єму в шарі насадки, чому сприяє їх форма, матеріал і проникність сіток насадки, як з боку газу, так і з боку рідини.

##### Псевдозріджені насадки

В якості насадки для апаратів з псевдозрідженим шаром можуть бути застосовані насадкові тіла різної форми, виготовлені з матеріалів, стійких у відповідних середовищах.

З точки зору енерговитрат апарати повинні володіти низьким гідравлічним опором. Одним з факторів, що впливають на зниження гідравлічного опору газу, є зменшення щільності насадкових тіл, при якій, перш за все, забезпечується їх інтенсивний рух у всьому обсязі шару. Застосування насадкових тіл з високою щільністю призводить до зменшення рухливості елементів насадки в шарі, в граничному випадку більшість елементів можуть виявитися нерухомими на тарілці. З іншого боку, занадто легкі насадкові тіла скупчуються у поверхні пінного шару. Утворюється так званий трифазний псевдозріджений плаваючий шар. В обох випадках гідродинамічна структура пінного шару істотно неоднорідна.

Псевдозріджену насадку можна поділити на *сферичну, циліндричну* і *насадку складної форми*.

Найбільш вивчені насадкові тіла у вигляді порожніх куль з діаметром 20 – 50 мм і щільністю 100

– 900 кг/м<sup>3</sup>, виконані з поліетилену, поліпропілену, пентапласту або гуми.

Як показали дослідження ефективною є робота абсорбера з псевдозрідженим шаром зрошуваної кульової насадки при використанні елементів насадки, розмір якої задовольняє співвідношенням:

$$\frac{D_{an}}{d_n} > 10, \quad \frac{H_0}{D_{an}} < 1, \quad H_0 = (5 \div 8)d_n$$

де  $D_{an}$  – діаметр апарату,  $d_n$  – ефективний діаметр насадки,  $H_0$  – висота сухої засипаної насадки.

У разі, коли на тарілці знаходиться насадка, що складається з елементів з великим діаметром, ніж передбачається даним відношенням, спостерігається нерівномірне переміщення елементів насадки в шарі. Динамічна висота шару в цьому випадку змінюється стрибкоподібно, а гідродинамічна структура шару стає неоднорідною.

З метою збільшення поверхні контакту фаз порожнисті сферичні тіла виконуються з наскрізними отворами, забезпечуються лопатями краплеподібної або тороїдальної форми, а суцільна кульова насадка – у вигляді з'єднаних пружною половинок, з наскрізними каналами, а також з гофрами на поверхні, шипами і голками.

Використовуються також кільцеві насадки з гладкою і перфорованою поверхнею, кубики, конуси, тори і піраміди.

Виготовлення невеликої кількості насадки будь-якого типу не представляє особливої складності. Однак для промислових апаратів з псевдозрідженим шаром зрошуваної насадки, коли тільки для одного апарату потрібні десятки або навіть сотні тисяч штук насадок тіл, виникають певні труднощі в організації їх масового виробництва.

В даний час з метою зменшення енергетичних витрат на проведення процесу масообміну доцільно застосування насадкові тіла зі спінених і сітчастих матеріалів, так як дані матеріали дозволяють досить просто виготовляти насадкові тіла з високорозвиненою поверхнею контакту фаз, що мають в той же час низьку насипну щільність, що підтверджено дослідженнями, представленими в роботі Вітківської Р.Ф. і Зибіної Н.Ф. [10].

### Особливості трифазного псевдозрідженого шару

Класичним прикладом псевдооживлення є псевдозріджений шар у двофазній системі «тверде – газ» або «тверде – рідина». При низьких швидкостях потік просто фільтрується через порожнечі між частками, які становлять *нерухомий шар*. Зі збільшенням швидкості потоку частинки будуть рухатися одна відносно одної, і здійснювати невеликі коливальні рухи з утворенням *розширеного шару*. При більш високій швидкості потоку досягається стан, коли майже всі частинки складають щось на зразок суспензії з рухаючися вгору потоком газу або

рідини – *мінімальне псевдозрідження*. У системах «рідина – тверде» збільшення швидкості потоку вище необхідної для мінімального псевдозрідження зазвичай призводить до спокійного, поступовому розширення шару. Такий шар називають шаром, *псевдозрідженим рідиною*. В системі «газ – тверде» спостерігаються великі неоднорідності у вигляді каналуотворення. При більш високих швидкостях газового потоку перемішування посилюється, а рух частинок стає більш енергійним. Такий шар називається *псевдозрідженим газом*.

Перепад тиску в потоці через шар твердих частинок має наступні закономірності: при відносно низьких швидкостях потоку в щільному шарі падіння тиску приблизно пропорційно швидкості потоку. У міру подальшого збільшення швидкості потоку щільний шар раптово «розпушується». Іншими словами, порозність зростає, а це призводить до зниження перепаду тиску. При швидкостях потоку, що перевищують швидкість мінімального псевдозрідження, шар розширюється. Незважаючи на більшу швидкість потоку, падіння тиску залишається практично незмінним. Така картина класичного двофазного псевдозрідження.

Для систем абсорбційного поглинання окремих компонентів газової фази рідиною значні переваги в порівнянні з апаратами, де контакт газу з рідиною здійснюється на поверхні стаціонарного шару насадки чи інших стаціонарно розташованих контактних пристроїв (тарілок різних конструкцій) мають апарати з трифазним псевдозрідженим шаром.

При цьому необхідно мати на увазі, що розглядаються в даній роботі трифазні системи «газ – рідина – тверде», що мають суттєві відмінності від класичних двофазних систем, в яких відбувається псевдозрідження.

У різних літературних джерелах апарати з трифазним шаром називаються по-різному: турбулентний контактний абсорбер, скруббер з плаваючою насадкою, апарати з псевдозрідженим шаром зрошуваної насадки, з рухомою зрошуваною (кульовою насадкою), зі зрошуваною зваженою насадкою, пінний апарат зі зваженою насадкою.

Візуальні спостереження при проведенні процесу показують існування декількох гідродинамічних режимів роботи апаратів з рухомою насадкою. Ці режими називаються - початкове проміжне, розвинене (повне) псевдозрідження, захлинання апарату; або - початок фонтанування (зважування), перехідний режим, режим розвиненої турбулентності і режим захлинання.

В апаратах малого діаметра при постійному значенні масової швидкості рідини в залежності від швидкості газу можна виділити чотири гідродинамічних режими.

У режимі початкового псевдозрідження спостерігається "фонтанування": переходять в псевдозріджений стан насадкові тіла тільки в центральній частині апарату, залишаючись

нерухомими під стінками. Рідина стікає по поверхні у вигляді плівки.

У режимі проміжного псевдозрідження насадкові тіла, розташовані поблизу стінок, починають рухатися вниз і переходять в центральну частину апарату.

У режимі розвиненого (повного) псевдозрідження всі насадкові тіла знаходяться в псевдозрідженому стані, циркулюючи всередині апарату: в центральній частині рух направлено вгору, а під стінками – вниз. Кількість рідини, що утримується в апараті, зростає і вона присутня в основному у вигляді крапель або у складі газоріднинної структури, близької до барботажного шару.

Разом з подальшим зростанням швидкості газу збільшується обсяг утримуваної рідини в шарі, що, в підсумку, веде до захливання апарату.

В апаратах діаметром більше 0,4 – 0,5 м режим проміжного псевдозрідження не спостерігається. Це можна пояснити тим, що при великому діаметрі роль пристінних насадкових елементів, що ускладнюють псевдозрідження всієї насадки, невелика.

Характер залежності гідравлічного опору трифазного псевдозрідженого шару зрошуваної насадки від швидкості газу суттєво відрізняється від двофазної системи.

А саме: в режимі розвиненого псевдозрідження трифазного шару не відбувається виходу на пряму  $\Delta p = const$ . Це пов'язано з тим, що зі збільшенням швидкості газу насадкові тіла утримують більшу кількість рідини, що в свою чергу призводить до зростання гідравлічного опору апарату.

Крім того, на гідравлічний опір апарату з трифазним шаром істотний вплив має опір опорно-розподільної тарілки: чим менше вільний перетин тарілки, тим більше відхилення на графіку залежності гідравлічного опору від швидкості газу в апараті від горизонтальної прямої в режимі розвиненого псевдозрідження.

У **пінних апаратах** питоме зрошення при очищенні газів (без необхідності охолодження) становить від 0,4 до 0,6 л/м<sup>3</sup> газу.

Щільність зрошення, кг/(м<sup>2</sup> с):

$$L = mw_2\rho_p \quad (1)$$

де  $m$  – питоме зрошення, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газу;  $\rho_p$  – щільність рідини, кг/м<sup>3</sup>;  $w_2$  – швидкість газу в апараті, м/с

Мінімальна лінійна швидкість газів, при якій утворюється пінний режим в зазначених межах щільності зрошення, може бути прийнята рівною від 1,0 до 1,2 м/с. Максимальна швидкість газів при пінному режимі  $w_{кр}$ , м/с, розраховується методом послідовних наближень за емпіричною залежністю [11]:

$$\lg w_{кр} = 1350 \frac{s_0^2 d_e}{A} + 0,154 \quad (2)$$

де  $d_e$  – еквівалентний діаметр отворів тарілки, м: для дірчастих тарілок  $d_e = d_0$ , для щілинних  $d_e = 2b$ ;  $A$  – коефіцієнт, який визначається з виразу

$$A = 38,8(W_p / W_{cm})^{-0,57} m^{0,57} (\rho_p / \rho_g)^{0,35}, \quad (3)$$

де  $W_{cm}$  – стандартна щільність зрошення, рівна 1 кг/(м<sup>2</sup>с).

При розрахунку попередньо задаються лінійною швидкістю газів в апараті, приймаючи її рівною 2 – 2,3 м/с, і за рівнянням (1) визначають  $W_p$ .

Робоча швидкість газів  $w_2$  в апараті (на вході в шар піни) повинна становити від 0,9 в апараті (на вході в шар піни) повинна становити від 0,9 до 0,95  $w_{кр}$ . Якщо  $w_{кр}$  виявиться за розрахунком менше прийнятої  $w_2$  або більше, ніж  $1,1w_2$ , то розрахунок повторюють, уточнюючи прийняте раніше значення  $w_2$ .

Діаметр апарату:

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi w_2}}, \quad (4)$$

де  $Q$  – витрати газу, що подається в апарат, м<sup>3</sup>

Якщо  $D > 2,5$  м, то слід встановлювати декілька паралельних апаратів. У цьому випадку велику увагу необхідно приділяти рівномірності розподілу газів по всій площі перетину апаратів. Тому в апаратах великого діаметру іноді замість однієї встановлюють дві тарілки, вважаючи, що перша з них (по ходу газів) забезпечує рівномірний газорозподіл.

Повний гідравлічний опір апарату, Па, визначається за рівнянням:

$$\Delta P = \Delta P_{ex} + \Delta P_T + \Delta P_{вих} + \Delta P_{кан}, \quad (5)$$

де  $\Delta P_{ex}$  – гідравлічні втрати при вході газів в апарат, Па;  $\Delta P_{вих}$  – гідравлічні втрати при виході газів з апарату, Па;  $\Delta P_T$  – повний гідравлічний опір однієї або декількох тарілок (в разі багатополічного апарату) з шаром піни, Па;  $\Delta P_{кан}$  – гідравлічний опір краплевловлювача, вбудованого в апарат, Па.

Значення  $\Delta P_{ex}$ ,  $\Delta P_{вих}$  невеликі і становлять 50 – 100 Па, більш точно можуть бути розраховані за рекомендаціями [12].

Повний гідравлічний опір тарілки, Па, визначають за формулою

$$\Delta P_T = A^2 \frac{w_2^2 \rho_g}{2s_0^2} + \Delta P_\sigma \quad (6)$$

де  $\Delta P_\sigma$  – гідравлічний опір, що створюється силами поверхневого натягу, Па.

При пінному режимі коефіцієнт  $A$  розраховується з виразу (3).

Для щільних тарілок

$$\Delta P_{\sigma} = 2s / b, \quad (7)$$

де  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу за умов на межі поділу фаз газ – рідина, Н/м.

Для дірчастих тарілок

$$\Delta P_{\sigma} = \frac{4\sigma}{1,3d_0 + 0,08d_0^2} \quad (8)$$

Гідродинамічний розрахунок пінних апаратів з провальними тарілками може бути проведений по номограмі, наведеної в роботі [13]. За її допомогою визначають один з чотирьох параметрів ( $w_2, m, d_0, S_0$ ) при трьох інших заданих, гідравлічний опір тарілки  $\Delta P_T$ , а також висоту шару піни на тарілці а також висоту шару піни на тарілці  $H_{II}$ . Номограма застосовна в межах параметрів, відповідних пінному режиму, тобто при швидкостях газів від 0,8 до 2,0 м/с.

Для зменшення вносу бризок відстань від верхньої тарілки до місця відведення газів з апарату повинно бути не менше 1,0 м.

Якщо апарат з провальними тарілками використовується для охолодження, зволоження і попереднього очищення (кондиціонування) газів або встановлюється перед іншим мокрим пиловловлювачем, він може працювати при  $w_2 > w_{кр}$ , але нижче швидкості точки захлинання, м/с

$$w_{захл} = 0,416 \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} \cdot S_0 \varphi}, \quad (9)$$

Частка вільного перетину тарілки, зайнятого газом:

$$\varphi = 1 - \frac{1,37 \cdot \sqrt[3]{m^2 \rho_p / (\rho_g \xi_{сух})}}{1 + 1,37 \cdot \sqrt[3]{m^2 \rho_p / (\rho_g \xi_{сух})}} \quad (10)$$

де  $\xi_{сух}$  – коефіцієнт гідравлічного опору сухої тарілки, зазвичай застосовуються в пінних пиловловлювачах дірчастих і щільних тарілок товщиною 4 – 6 мм  $\xi_{сух} = 1,6 - 1,7$ . Значення  $\xi_{сух}$  для різних типів тарілок наведені в [12].

Гідравлічний опір провальних тарілок з вільним перетином  $S_0 = 0,25 \text{ м}^2/\text{м}^2$  при  $w_2 > w_{кр}$ , а також провальних тарілок з великим вільним перетином розраховується також за формулою (6).

Гідравлічний опір пінного газопромивача зі стабілізатором пінного шару розраховується за формулою (5), причому

$$\Delta P_T = \frac{\xi_{сух} \rho_g w_2^2}{2S_0^2 \varphi^2} + \Delta P_{II} + \Delta P_{\sigma} \quad (11)$$

### Швидкісні газопромивачі (скрубери Вентурі)

об'єднують велику групу апаратів, загальним для яких є наявність труби-розпилювача (труби Вентурі), в якій здійснюється інтенсивне дроблення рідини газовим потоком, що рухається з високою швидкістю (близько 40 – 150 м / с), і встановленого за нею крапле вловлювача. Гідравлічний опір скрубєрів Вентурі складається з гідравлічних опорів труби-розпилювача і краплєвловлювача, причому основна частина втрат енергії припадає на трубу Вентурі [13].

Гідравлічний опір труби-розпилювача,  $\Delta P$ , при подачі в неї зрошувальної рідини зручно розглядати як суму доданків

$$\Delta P = \Delta P_z + \Delta P_p, \quad (12)$$

де  $\Delta P$  – гідравлічний опір труби-розпилювача, Па;  $\Delta P_z$  – гідравлічний опір труби-розпилювача, обумовлений рухом газів (без зрошення), Па;  $\Delta P_p$  – гідравлічний опір труби-розпилювача, обумовлений введенням зрошувальної рідини, Па.

$$\Delta P_z = \xi_{сух} \rho_g w_2^2 / 2 \quad (13)$$

де  $\xi_{сух}$  – коефіцієнт гідравлічного опору сухої труби-розпилювача;  $w_2$  – швидкість газів в горловині при умовах по температурі і тиску на виході з труби-розпилювача, м/с;  $\rho_g$  – щільність газів при тих же умовах, кг/м<sup>3</sup>.

Коефіцієнт гідравлічного опору сухої труби-розпилювача з круглою і прямокутною горловиною довжиною  $0,15 d_{ек}$  ( $d_{ек}$  – еквівалентний діаметр горловини, м) приймається в межах від 0,12 до 0,15. Для труб-розпилювачів прямокутного і круглого перетину з довжиною горловини  $10 d_{ек} > l_T > 0,15 d_{ек}$

$$\xi_{сух} = 0,165 + 0,034 \frac{l_z}{d_{ек}} \left( 0,06 + \frac{l_z}{d_{ек}} \right) M, \quad (14)$$

де  $M = w_2 / w_{36}$  – число Маха;  $w_{36}$  – швидкість звуку, м/с.

Вираз (14) справедливий при швидкості газів в горловині до 150 м/с, причому обидві швидкості ( $w_2$  та  $w_{36}$ ) приймаються за умов по температурі і тиску на виході з труби-розпилювача.

$$\Delta P_p = \xi_p \frac{\rho_p w_2^2}{2} m, \quad (15)$$

де  $\xi_p$  – коефіцієнт гідравлічного опору, що враховує введення в трубу-розпилювач зрошувальної рідини,  $m$  – питома витрата зрошувальної рідини, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газів;  $\rho_p$  – щільність зрошувальної рідини, кг/м<sup>3</sup>.

Коефіцієнт гідравлічного опору визначається за формулою:

$$\xi_p = A \xi_{cx} m^{1+B}, \quad (16)$$

де  $A, B$  – емпіричні коефіцієнти.

При розрахунках швидкість газів щодо краплі  $w_{o,z}$  приймається рівною швидкості газів в горловині труби-розпилювача, діаметр краплі розраховується за формулою Таназави - Нукіями, що характеризує середній діаметр крапель, що утворюються при розпорощенні рідини пневматичною форсункою [13]:

$$d_k = \frac{585 \div 10^{-3} \sqrt{\sigma}}{w_{o,z} \sqrt{\rho_p}} + 53,4 \left( \frac{\mu_p}{\sqrt{\rho_p \sigma}} \right)^{0,45} \left( \frac{Q_p}{Q_z} \right)^{1,5}, \quad (17)$$

Так як співвідношення  $Q_p/Q_z$  зазвичай мало, величина  $d_k$  практично визначається першою частиною рівняння, а саме, діаметр крапель майже не залежить від в'язкості рідини.

**Апарати з рухомою насадкою.** До гідравлічних характеристик колонних масообмінних апаратів з рухомою насадкою відносяться гідравлічний опір, динамічна висота і газовміст газорідного шару, кількість утримуваної рідини на решітці  $h_0$ , динамічний рівень рідини  $d_o$  (для апаратів з циркулюючою насадкою) та інші [14, 15].

**Кількість утримуваної рідини,** віднесена до площі перетину апарату  $h_0$  та динамічний рівень рідини  $d_o$ :

1. Для апаратів зі зваженою насадкою

$$Fr = \frac{\rho_z w_z^2}{\rho_p g h_p} = x \left( \frac{w_z}{w_p} \right)^z \cdot \left( \frac{H_{cm}}{d_n} \right)^{-0,25} \left( \frac{\rho_n}{\rho_p} \right)^{0,1} \cdot S_0^{0,2}, \quad (18)$$

при  $w_z < 3$  м/с,  $x = 0,0075$ ,  $z = 0,33$ ;

при  $w_z > 3,0$  м/с,  $x = 0,017$ ,  $z = 0,29$

2. Для апаратів з фонтануючою насадкою

$$Fr = x \left( \frac{w_z}{w_p} \right)^z \cdot \left( \frac{H_{cm}}{d_n} \right)^{-0,25} \left( \frac{\rho_n}{\rho_p} \right)^{0,1} \cdot \left( \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)^{0,15} \cdot S_0^{0,25}, \quad (19)$$

при  $w_z < 3$  м/с,  $x = 0,007$ ,  $z = 0,33$ ;

при  $w_z > 3,0$  м/с,  $x = 0,017$ ,  $z = 0,43$

3. Для апарату з циркулюючою насадкою

$$\zeta = \frac{307}{\operatorname{Re}_z^{0,85}}, \quad (20)$$

при  $w_z = 4,0 \div 8,0$  м/с;  $h_0 = -0,04 \div 0,03$  м;

**Динамічна висота газорідного шару  $H_o$**  для апаратів зі зваженою насадкою, зваженою насадкою зі стабілізатором шару і для апаратів з фонтануючою насадкою знаходиться за формулою:

$$H_o = \left[ H_{cm}(1-\varepsilon_0) + h_0 \left( \frac{1}{K} \sqrt{\frac{\rho_z w_z^2}{\rho_p g h_p + (1-\varepsilon_0) \rho_n g H_{cm}}} + 1 \right) \right], \quad (21)$$

де  $\varepsilon_0$  – порозність насадочного шару в статичному стані; коефіцієнт для апаратів зі зваженою насадкою 0,043; для апаратів зі зваженою насадкою зі стабілізатором шару  $K = 0,08$ ; для апаратів з фонтануючою насадкою  $K = 0,065$

Для апарату з циркулюючою насадкою в режимі повної циркуляції, (тобто в робочому режимі), динамічна висота газорідного шару дорівнює висоті зони циркуляції.

**Газовміст газорідного шару  $\varphi$**  для апаратів зі зваженою насадкою, зваженою насадкою зі стабілізатором шару і для апаратів з фонтануючою насадкою розраховується за формулою [14]

$$H_o = \frac{w_z}{K \sqrt{\frac{g}{\rho_z} (\rho_p g h_p + (1-\varepsilon_0) \rho_n g H_{cm})} + w_z}, \quad (22)$$

для апаратів зі зваженою насадкою  $K = 0,043$ ; для апаратів зі зваженою насадкою зі стабілізатором шару  $K = 0,08$ ; для апаратів з фонтануючою насадкою  $K = 0,065$ .

Для апарату з циркулюючою насадкою в практичних розрахунках газовміст газорідного шару можна приймати рівним  $\varphi = 0,7 \div 0,8$ .

**Гідравлічний опір  $\Delta P$**  для апаратів зі зваженою насадкою, зваженою насадкою зі стабілізатором пінного шару і для апаратів з фонтануючою насадкою розраховується за формулою [14].

$$\Delta P = \Delta P_{c,p} + \Delta P_{c,n} + \Delta P_{cp}, \quad (23)$$

Тут гідравлічний опір сухої решітки:

$$\Delta P_{c,p} = \zeta_{c,p} \frac{\rho_z w_z^2}{2 \cdot S_0^2}, \quad (24)$$

для апаратів зі зваженою насадкою  $\zeta_{c,p} = 1,5$ ; для апаратів зі зваженою насадкою зі стабілізатором шару  $\zeta_{c,p} = 1,5$ ; для апаратів з фонтануючою насадкою  $\zeta_{c,p} = 1,9$ .

Гідравлічний опір сухої насадки для зазначених типів апаратів

$$\Delta P_{c,n} = (1-\varepsilon_0) \rho_n g H_{cm}, \quad (25)$$

при  $w_z > 3,0$  м/с

Гідравлічний опір газорідного шару [14]:

$$\Delta P_{cp} = \left( \varepsilon - \varphi - 4 \left( \frac{d_n}{D_a} \right)^2 \frac{\delta_n}{H_o} \cdot n_e \right) \rho_p g H_o, \quad (26)$$

При цьому:



$$\delta_n = 0,8 \frac{v_p^{1/2} U_p^{1/3} d_n^{1/3}}{g^{1/2}}, \quad (27)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{(1 - \varepsilon_0) H_{cm}}{H_\delta} \quad (28)$$

$$n_e = \frac{3(1 - \varepsilon_0) H_{cm} D_a^2}{2d_n^2}, \quad (29)$$

**Гідралічний опір**  $\Delta P$  для апарату з циркулюючою насадкою [14].

$$\Delta P = \Delta P_{cyx} \left[ 1 + K_1 (Fr)^{-K_2} \right], \quad (30)$$

де  $K_1 = 0,365$ ,  $K_2 = 1,0$

**Гідралічний опір** сухого апарату з циркулюючою насадкою

$$\Delta P_{cyx} = \zeta_{ex} \frac{\rho_z w_{nam}^2}{2} + H_{cm} (1 - \varepsilon_0) \rho_n g \frac{d_n}{d_k}, \quad (31)$$

де  $\zeta_{ex} = 7,5$ ,  $w_z > 3,0$  м/с.

Критерій Фруда

$$Fr = \frac{\rho_z w_{nam}^2}{\rho_p g \Delta h}, \quad (32)$$

де

$$\Delta h = h_\delta + h_0, \quad (33)$$

**Розрахунок ефективності масообміну**

Гідродинамічні режими руху крапель і плівок в газорідному шарі пінних апаратів різко відрізняється. Тому закономірності масовіддачі в краплі і плівці рідини різні [14, 15].

Рівняння для розрахунку коефіцієнта масовіддачі в краплі має такий вигляд.

$$\beta_p^k = K_k \frac{\rho_z^{0,25} U_p^{0,22} D_M^{0,5}}{\rho_p^{0,25} v_p^{0,12} d_k^{0,26} \sigma^{0,1}}, \quad (34)$$

або у вигляді співвідношень безрозмірних критеріїв:

$$Sh_p^k = K_k Re_k^{0,63} We^{0,1} K_p^{0,25} Sc^{0,5}, \quad (35)$$

Середній розмір крапель в шарі визначається за рівнянням

$$d_k = 9,7 \frac{\sigma^{0,6} \delta_n^{0,4}}{\rho_z^{0,4} \rho_p^{0,2} U_p^{1,2}}, \quad (36)$$

Для розрахунку  $\beta_p^k$  з урахуванням діаметра крапель можна скористатися наступним рівнянням:

$$\beta_p^k = K_k \frac{\sigma^{0,6} \delta_n^{0,4}}{\rho_p^{0,2} v_p^{0,12} \sigma^{0,3} d_n^{0,02}}, \quad (37)$$

або

$$Sh_p^k = K_k Re_k^{0,62} We^{0,3} K_p^{0,2} Sc^{0,5}, \quad (38)$$

Коефіцієнт масовіддачі в плівці визначається

наступним рівнянням

$$\beta_p^{nl} = K_{nl} \frac{U_p^{2/3} g^{1/12} D_M^{1/2}}{v_p^{1/2} d_n^{1/12}}, \quad (39)$$

або

$$Sh_p^{nl} = K_{nl} Re_p^{2/3} Ga^{1/12} Sc^{1/2}, \quad (40)$$

Коефіцієнт масовіддачі в рідкій фазі визначається підсумовуванням коефіцієнтів масовіддачі в краплі і плівці.

$$\beta_p = \beta_p^k + \beta_p^{nl} = K_k \frac{\rho_z^{0,6} U_p^{1/2} D_M^{0,5}}{\rho_p^{0,2} v_p^{0,12} \sigma^{0,3} d_n^{0,08}} + K_{nl} \frac{U_p^{2/3} g^{0,08} D_M^{0,5}}{v_p^{0,5} d_n^{0,08}}, \quad (41)$$

Коефіцієнти пропорційності  $K_k$  і  $K_{nl}$  рівняння (41) визначаються з наступної таблиці.

Таблиця 1 – Визначення коефіцієнтів пропорційності

Апарати	Зі зваженою насадкою	З фонтануючою насадкою
$K_k$	2,84	4,12
$K_{nl}$	81,2	43,1

Для розрахунку **коефіцієнта масовіддачі в газовій фазі** в апараті зі зваженою насадкою у випадках абсорбції фтористих газів різними поглиначами пропонується наступне загальне рівняння [14]:

$$\beta_z = A \cdot w_z^{1,1} L^{0,13} H_{cm}^{0,43} d_n^{-0,3} \rho_n \cdot e^{1,8S_0}, \quad (42)$$

В якому постійна  $A$  визначається експериментально для кожної системи газу і поглинач

Для апаратів з фонтануючою насадкою

$$\beta_z = A \cdot w_z^{1,0} L^{0,1} H_{cm}^{0,3} d_n^{-0,1} \rho_n^{0,15} \cdot \left( \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) e^{2S_0}, \quad (43)$$

Ефективність або ступінь абсорбції визначається з рівняння [14]:

$$\beta_z = w_z \ln \frac{c_n}{c_k}, \quad (44)$$

Визначається кінцева концентрація  $c_k$  при відомій початковій концентрації  $c_n$  газу, що абсорбується.

Ефективність або ступінь абсорбції дорівнює

$$\eta = \frac{c_n - c_k}{c_n} \cdot 100\%, \quad (45)$$

### Обговорення результатів

Помітна різниця форми рівнянь, справедливості їх тільки для порівняно вузьких діапазонів робочих умов, не дозволяє рекомендувати застосування цих залежностей для розрахунку промислових або пілотних установок, що працюють в інших гідродинамічних режимах, або на інших взаємодіючих системах [16, 17].

Визначення гідравлічних опорів газорідного шару з псевдозрідженою насадкою, також як і визначення повних гідравлічних опорів, проводиться за допомогу рівнянь різного виду.

В основному підходи до визначення швидкості початку псевдозрідження зрошуваного шару є емпіричними. При наявності зрошення дослідники, як правило, базуються на характері кривої псевдозрідження, трактуючи її перегини, як кордони різних режимів псевдозрідження. При цьому часто роблять недостатньо аргументовані висновки.

Так як раніше було висловлено припущення про перспективність використання сітчастих матеріалів для виготовлення насадкових тіл, то слід підкреслити особливість роботи апаратів з подібними насадками [18]. В апаратах з кульовими насадками газ проходить між каналами, утвореними насадочними тілами, а рідина у вигляді плівок і крапель стікає по поверхні куль. У випадку з сітчастою насадкою взаємодія газу з рідиною відбувається не тільки на поверхні насадки, але і всередині її обсягу. Тому механізм переходу насадки в режим розвиненого псевдозрідження буде істотно відрізнятися від звичайних кульових насадок. Отже, необхідне проведення спеціальних досліджень гідродинамічних режимів роботи апарату з сітчастою насадкою і визначенням параметрів, що впливають на швидкість переходу насадки з одного режиму в інший.

Вивчення масопередачі в абсорбері з псевдозрідженим шаром зрошуваної насадки ускладнене тим, що поверхня контакту між фазами може значно змінюватися в залежності від гідродинамічних умов, зокрема, від швидкості газу і щільності зрошення. При цьому важко встановити вплив зазначених факторів сам по собі на поверхню контакту і на коефіцієнт масопередачі.

При оцінці ефективності абсорберів з трифазним шаром використовують коефіцієнти масопередачі (об'ємні і поверхневі) або число одиниць перенесення. Об'ємний коефіцієнт масопередачі відносять до одиниці статичного обсягу насадки (коефіцієнт  $K_v$ ) або до одиниці динамічного обсягу шару (коефіцієнт  $K_d$ ).

Розглянуті рівняння показують, що визначення інтенсивності перенесення речовини в шарі з псевдозрідженою зрошуваною насадкою не має твердо встановлених закономірностей. Всі наведені рівняння мають емпіричний характер, що визначає можливість їх застосування тільки для умов дослідів, на прикладі яких вони виведені. Це показує, що вивчення інтенсивності перенесення речовини в шарі

псевдозрідженої насадки вимагає подальших досліджень.

Таким чином, розрахунок і проектування апаратів з псевдозрідженою насадкою проводиться поки тільки на основі експериментальних даних [19, 20], отриманих на обмеженій кількості взаємодіючих систем. Теоретичні положення розроблені недостатньо, тому, на практиці основне застосування в апаратах з рухомою насадкою знаходить лише кульова насадка як найбільш досліджена, а інші конструкції залишаються незатребуваними.

### Висновки

З наведених вище положень можна зробити висновок, що на процес масообміну, як в газовій, так і в рідкій фазах, істотний вплив роблять гідродинамічні параметри – швидкість газу в апараті і питома навантаження по рідині, які опосередковано впливають, на висоту шару рідини на тарілці і газовміст шару, а також не досліджені фізико-хімічні властивості взаємодіючих систем.

Аналіз ряду досліджень показує, що перспективним напрямком інтенсифікації процесу масообміну є розробка апаратів з трифазним псевдозрідженим шаром зрошуваної насадки складних форм із сітчастих матеріалів. Для систем очищення газів від газоподібних компонентів необхідно забезпечити малі навантаження по рідині при збереженні високого ступеня очищення. Цього можна досягти шляхом використання провальної тарілки з невеликим вільним перетином і нової розробленої насадки.

Промислова реалізація методу стабілізації газорідного шару дозволяє значно розширити сферу застосування пінних апаратів і відкриває нові можливості інтенсифікації технологічних процесів з одночасним створенням маловідходних технологій.

### Список літератури

1. Балабеков, О. С. Гидродинамика, массообмен и пилеулавливание при противоточных и прямоточных двухфазных капельных и пленочных течениях в слое подвижной насадки: дис. д-ра техн. наук: 05.17.08 / Балабеков Оразалы Сатимбекович. - М., 1985. – 295с.
2. Ляшук, А. Гидродинамические характеристики абсорбера с подвижной насадкой / А. Ляшук, М. Г. Беренгартен // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. – 2001. – 13. – С. 3–7.
3. Nikov, J. Solid – liquid mass transfer in three – phase fixed and fluidized beds / J. Nikov, H. Delmas // *Chem. Eng. Sci.* – 1987. – V.42. – J5. – P. 1089-1093.
4. Palaty, Z. Koefficienty pfestupe hmoty v plynu v absorberu s pohyblivon naplni / Z. Palaty // *Sb.Ved.pr.VSCHT, Pardubice*. – 1991. – 55. – P.283-301.
5. Сабырханов, Д. Классификация аппаратов с подвижной насадкой / Д. Сабырханов, О. С. Балабеков, С. С. Серманизов. – Чимкент, 1983. – С. 17. Деп. В НИИТЭХИМ. №266 X11-Д83.
6. Новиков, А. И. Конические скрубберы с псевдооживленной шаровой насадкой / А. И. Новиков, А. П. Скворцов, В. А. Кишкарев // *Хим.пром.* – 1974. –

№ 11. – С. 846-849.

7. **Ковалев, О. С.** Абсорбция и пылеулавливание в производстве минеральных удобрений / **О. С. Ковалев, И. Л. Мухленов.** – М.: Химия, 1987. – 208 с.
8. **Балтабаев, Л. Ш.** Исследование процессов очистки отходящих газов фосфорного производства в аппаратах с подвижной насадкой: дис. канд. техн. наук: 05.17.08 / **Балтабаев Леонид Шакирович.** – М., 1973. – 190с.
9. **Каган, А. М.** Высокоэффективное контактное устройство для процессов абсорбции и ректификации – нерегулярная металлическая насадка ГИАП-НЗ / **А. М. Каган, Н. И. Гельперин, В. В. Дильман, Л. А. Юдина, А. А. Палимов, А. С. Пушнов** // *Хим. пром.* – 1992. – №8. – С. 28 – 34.
10. **Витковская, Р. Ф.** Полимерные контактные устройства из объемных структур для тепло- массообменных аппаратов / **Р. Ф. Витковская, Н. Ф. Зыбина** // *Вестник С.-Петербургского гос. ун-та технологии и дизайна.* – 1998. – №2. – С. 120-127.
11. **Вальдберг, А. Ю.** К вопросу о предельных параметрах пенного режима в аппаратах с полным протеканием жидкости через отверстия решеток. / **А. Ю. Вальдберг, Э. Я. Тарат** // *Журнал прикладной химии.* – 1970. – 43, №8. – С. 1712-1715.
12. **Идельчик, И. Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Изд. 2-е, перераб. и доп. / **И. Е. Идельчик.** – М.: Машиностроение, 1975. – 560 с.
13. **Биргер, М. И.** Справочник по пыли — и золоулавливаю. / **М. И. Биргер, А. Ю. Вальдберг, Б. И. Мягков и др.** // Под общ. ред. А. А. Русанова. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
14. **Балабеков, О. С.** Расчет и конструирование тепломассообменных и пылеулавливающих аппаратов с подвижной и регулярной насадкой / **О. С. Балабеков, А. А. Волненко.** — Шымкент, 2015- 184 с.
15. **Балабеков, О. С.** Расчет и конструирование аппаратов с подвижной насадкой. / **О. С. Балабеков.** — Алма-Ата. 1984. – 34 с.
16. **Perry, D. C.** Gas absorption and reaction in a wet pneumatic foam / **D. C. Perry, P. Stevenson** // *Chemical Engineering Science.* – 2015. – V. 126. – P. 177-185. – doi:10.1016/j.ces.2014.11.037.
17. **Marias, F.** Effects of Freeboard Volatile Release During Fluidized Bed Incineration of a Model Waste // **F. Marias, J. R. Puiggali, G. Flamant** // *Process Safety and Environmental Protection.* – 2001. – V. 79, Issue 4, – P. 244-252. – doi:10.1205/095758201750362280.
18. **Моисеев, В. Ф.** Обработка газожидкостных систем на трубчатых решетках со стабилизатором пенного слоя / **В. Ф. Моисеев, Е. В. Манойло, М. И. Васильев, К. Ю. Репко, Д. В. Давыдов** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* - Харьков: НТУ «ХПИ». - 2017. – № 53 (1274). – С. 114-123. – doi:10.20998/2413-4295.2017.53.17.
19. **Yin, F. H.** CFD Simulation and Experimental Study of Liquid Dispersion in Randomly Packed Metal Pall Rings / **F. H. Yin, A. Afacan, K. Nandakumar, K. T. Chuang** // *Chemical Engineering Research and Design.* – 2002. – V. 80, Issue 2. – P. 135-144. – doi:10.1205/026387602753501852.
20. **Jungkee, Jang.** CFD simulation of a pharmaceutical bubbling bed drying process at three different scales / **Jungkee Jang, Hamid Arastooour** // *Powder Technology.* – 2014. – V. 263. – P. 14-25. – doi:10.1016/j.powtec.2014.04.054.

#### Bibliography (transliterated)

1. **Balabekov, O. S.** Gidrodinamika, massoobmen i pyleulavlivaniye pri protivotochnykh i pryamotochnykh dvukhfaznykh kapel'nykh i plenochnykh techeniyakh v sloye podvizhnoy nasadki: dis. d-ra tekhn. nauk: 05.17.08 / **Balabekov Orazaly Satimbekovich.** M., 1985, 295.
2. **Lyashuk, A., Berengarten, M. G.** Gidrodinamicheskiye kharakteristiki absorbera s podvizhnoy nasadkoy. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye*, 2001, **J3**, 3–7.
3. **Nikov, J., Delmas, H.** Solid – liquid mass transfer in three – phase fixed and fluidized beds. *Chem. Eng. Sci*, 1987, **42**, J5, 1089-1093.
4. **Palaty, Z.** Koefficienty pfestupe hmoty v plynu v absorberu s pohyblivon naplni. *Sb.Ved.pr./VSCHT, Pardubice*, 1991, **55**, 283-301.
5. **Sabyrkhanov, D., Balabekov, O. S., Sermanizov, S. S.** Klassifikatsiya apparatov s podvizhnoy nasadkoy. *Chimkent*, 1983, 17. Dep. V NIITEKHIM. №266 KH11-D83.
6. **Novikov, A. I., Skvortsov, A. P., Kishkarev, V. A.** Konicheskiye skrubbery s psevdoozhizhennoy sharovoy nasadkoy. *Khim.prom*, 1974, **11**, 846-849.
7. **Kovalev, O. S., Mukhlenov, I. L.** Absorbtsiya i pyleulavlivaniye v proizvodstve mineral'nykh udobreniy. M.: Khimiya, 1987, 208.
8. **Baltabayev, L. Sh.** Issledovaniye protsessov oчитki otkhodyashchikh gazov fosfornogo proizvodstva v apparatakh s podvizhnoy nasadkoy: dis. kand. tekhn. nauk: 05.17.08 / **Baltabayev Leonid Shakirovich.** M., 1973, 190.
9. **Kagan, A. M., Gel'perin, N. I., Dil'man, V. V., Yudina, L. A., Palimov, A. A., Pushnov, A. S.** Vysokoeffektivnoye kontaktnoye ustroystvo dlya protsessov absorbtsii i rektifikatsii – neregulyarnaya metallicheskaya nasadka GIAP-NZ. *Khim. prom*, 1992, **8**, 28 – 34.
10. **Vitkovskaya, R. F., Zyбина, N. F.** Polimernyye kontaktnyye ustroystva iz ob'yemnykh struktur dlya teplo-masoobmenykh apparatov. *Vestnik S.-Peterburgskogo gos. un-ta tekhnologii i dizayna*, 1998, **2**, 120-127.
11. **Val'dberg, A. Yu., Tarat, E. Ya.** K voprosu o predel'nykh parametrah pennogo rezhima v apparatakh s polnym protokaniyem zhidkosti cherez otverstyia reshetok. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 1970, **43**, 8, 1712-1715.
12. **Idel'chik, I. Ye.** Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam. Izd. 2-ye, pererab. i dop. M.: Mashinostroyeniye, 1975, 560.
13. **Birger, M. I., Val'dberg, A. Yu., Myagkov, B. I., i dr.** Spravochnik po pyle — i zoloulavlivaniyu. Pod obshch. red. A. A. Rusanova, M.: Energoatomizdat, 1983, 312.
14. **Balabekov, O. S., Volnenko, A. A.** Raschet i konstruirovaniye teplomassoobmennykh i pyleulavlivayushchikh apparatov s podvizhnoy i regul'yarnoy nasadkoy. Shymkent, 2015, 184.
15. **Balabekov, O. S.** Raschet i konstruirovaniye apparatov s podvizhnoy nasadkoy. Alma-Ata, 1984, 34.
16. **Perry, D. C., Stevenson, P.** Gas absorption and reaction in a wet pneumatic foam. *Chemical Engineering Science*, 2015, **126**, 177-185, doi:10.1016/j.ces.2014.11.037.
17. **Marias, F., Puiggali, J. R., Flamant, G.** Effects of Freeboard Volatile Release During Fluidized Bed Incineration of a Model Waste. *Process Safety and Environmental Protection*, 2001, **79**, 4, 244-252, doi:10.1205/095758201750362280.
18. **Moiseev, V. F., Manoilo, E. V., Vasyliiev, M. I., Repko, K. Yu., Davydov, D. V.** Processing of gas-liquid systems on

- tubular gratings with stabilizer of a foam layer. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **53** (1274), 114–123, doi:10.20998/2413-4295.2017.53.17.
19. **Yin, F. H., Afacan, A., Nandakumar, K., Chuang, K. T.** CFD Simulation and Experimental Study of Liquid Dispersion in Randomly Packed Metal Pall Rings. *Chemical Engineering Research and Design*, 2002, **80**, 2, 135-144, doi:10.1205/026387602753501852.
20. **Jungkee, Jang, Hamid, Arastoopour.** CFD simulation of a pharmaceutical bubbling bed drying process at three different scales. *Powder Technology*, 2014, **263**, 14-25, doi:10.1016/j.powtec.2014.04.054.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Моїсєєв Віктор Федорович** – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; e-mail: vmoiseev1209@gmail.com.

**Victor Moiseev** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D), Associate Professor of Department of "Chemical Technics and Industrial Ecology", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine: e-mail: vmoiseev1209@gmail.com.

**Манойло Євгенія Володимирівна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; e-mail: bublikova1@gmail.com.

**Eugenia Manoilo** - Candidate of Technical Sciences, Docent of Department of "Chemical Technics and Industrial Ecology", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine: e-mail: bublikova1@gmail.com.

**Пономарьова Наталія Георгіївна** - кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, м. Харків, Україна.

**Natalia Ponomarova** - Candidate of Technical Sciences, Docent of Department of "Industrial technologies, processing and equipment", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine.

**Репко Каліф Юрійович** – магістр, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна.

**Kalif Repko** – magister of science, aspirant of Department of "Chemical Technics and Industrial Ecology", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine.

**Давидов Денис Валерійович** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна.

**Denys Davydov** - student of Department of "Chemical Technics and Industrial Ecology", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Моїсєєв, В. Ф.** Методологія розрахунку режимно-конструктивних і гідродинамічних параметрів пінних апаратів для процесів масообміну / **В. Ф. Моїсєєв, Є. В. Манойло, Н. Г. Пономарьова, К. Ю. Репко, Д. В. Давидов** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 165-176. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.25.

*Please cite this article as:*

**Moiseev, V., Manoilo, E., Ponomaryova, N., Repko, K., Davydov, D.** Methodology of calculation of construction and hydrodynamic parameters of a foam layer apparatus for mass-transfer processes. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 165-176, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.25.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Моїсєєв, В. Ф.** Методология расчета режимно-конструктивных и гидродинамических параметров пенных аппаратов для процессов массообмена / **В. Ф. Моїсєєв, Е. В. Манойло, Н. Г. Пономарьова, К. Ю. Репко, Д. В. Давидов** // *Вестник НТУ «ХПІ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 16(1292). – С. 165-176. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.25.

**АННОТАЦІЯ** Промышленная реализация метода стабилизации газожидкостного слоя позволяет значительно расширить область применения пенных аппаратов и открывает новые возможности интенсификации технологических процессов с одновременным созданием малоотходных технологий. В статье установлены основные параметры, влияющие на гидродинамику пенных аппаратов, рассмотрены основные конструкции и режимы работы пенных аппаратов. Выявлена связь гидродинамических параметров. Рассмотрены гидродинамические закономерности пенного слоя. Указанные факторы, влияющие на процесс массообмена в газовой и в жидкой фазах. Проведенный анализ ряда исследований показал, что перспективным направлением интенсификации процесса массообмена является разработка аппаратов с трехфазным псевдооживленным слоем орошаемой насадки сложных форм из сетчатых материалов. Следовательно, необходимо проведение специальных исследований гидродинамических режимов работы аппарата с сетчатой насадкой и определением параметров, влияющих на скорость перехода насадки из одного режима в другой.

**Ключевые слова:** промышленные газовые выбросы; процесс улавливания; гидродинамика, массообмен; пенный аппарат; пенный слой, исследования процессов очистки; стабилизация пенного слоя; интенсивный аппарат

Поступила (received) 04.05.2018