

УДК 66.074:661

doi:10.20998/2413-4295.2018.26.37

СТРУКТУРА ПІННОГО ШАРУ НА ПРОТИТЕЧІЙНИХ КОНТАКТНИХ ЕЛЕМЕНТАХ ЗІ СТАБІЛІЗАЦІЄЮ

**В. Ф. МОЇСЄЄВ¹, Є. В. МАНОЙЛО², О. О. ЛЯПОЩЕНКО³, О. М. ХУХРЯНСЬКИЙ⁴,
Н. Г. ПОНОМАРЬОВА⁵**

¹⁻² каф. ХТПЕ, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

³ каф. процеси та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв, СДУ, Суми, УКРАЇНА

⁴ ПАТ "УКРХІМПРОЕКТ", Суми, УКРАЇНА

⁵ каф. ІТТіА, 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 виявлено основні закономірності гідродинаміки пінного шару зі стабілізатором на протитечійних контактних елементах. Розглядаються структурні параметри фаз пінного шару як цільного середовища. Враховується взаємний вплив двох фаз. Вивчено закономірності газовмісту та параметри площі контакту фаз. Встановлено функціональні залежності основних параметрів процесу. Проведений аналіз ряду досліджень показав, що перспективним напрямком інтенсифікації процесу масообміну є розробка апаратів з трифазним псевдозрідженим шаром зрошуваної насадки складних форм із пористих матеріалів. Отже, необхідне проведення спеціальних досліджень гідродинамічних режимів роботи апарату з пінним шаром, що стабілізується із визначенням параметрів, що впливають на швидкість переходу контактного елемента 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

FOAM LAYER STRUCTURE ON COUNTERCURRENT CONTACT ELEMENTS WITH STABILIZATION

**V. MOISEEV¹, E. MANOIL², A. LIPOSHCHENKO³, O. KHUKHRYANSKY⁴,
N. PONOMARYOVA⁵**

¹ Department of Chemical techniques and industrial ecology, NTU «KhPI», Kharkiv, UKRAINE

² Department of Chemical techniques and industrial ecology, NTU «KhPI», Kharkiv, UKRAINE

³ Department of Processes and Equipment for Chemical and Petroleum Processing Industries, SDU, Sumy, UKRAINE

⁴ "UKRHIMPROEKT", Sumy, UKRAINE

⁵ 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 foaming devices and opens up new opportunities for intensifying technological processes with the simultaneous for creation of low-waste technologies. The article reveals the basic regularities of the hydrodynamics of the foam layer with the stabilizer on counteracting contact elements. The structural parameters of the phases of the foam layer as a whole medium are considered. Take into account the mutual influence of two phases. The laws of gas content and parameters of the contact area of phases have been studied. The functional dependences of the main parameters of the process are established. The conducted analysis of a number of studies has shown that a promising 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 made of porous materials. Consequently, it is necessary to carry out special investigations of the hydrodynamic modes of the apparatus with a foam layer, which stabilizes with the definition of parameters that affect the transition speed of the contact element from one mode to another.

In today's conditions, a significant human-induced environmental impact on time is the search for the most effective and economical methods for the purification of industrial emissions. Methods of cleaning and equipment being developed should take into account the possibility of work in a wide range of working conditions. In order to reduce energy consumption in systems for catching harmful and toxic substances, it is necessary to provide a reduction of hydraulic resistance while maintaining the high efficiency of gas streams cleaning.

Given the controversial requirements for equipment and despite the large number of existing machines for mass transfer processes, the development of new high-intensity and efficient equipment is of considerable interest for environmental technologies in many industries.

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 компонентом який абсорбується (процес хемосорбції).

У наш час чітко визначилося напрямком, пов'язаний з проведенням дифузійних і подібних до них процесів в інтенсивних режимах розвиненою турбулентності при великих швидкостях потоків газів і рідин. Саме турбулізація газорідної системи призводить до суттєвого збільшення інтенсивності масообмінних апаратів.

Одним із способів турбулізації системи газ – рідина є перетворення її в дуже рухливу нестабільну піну за рахунок кінетичної енергії газу. Пінний режим обробки газів і рідин став передовою ідеєю в хімічній технології. Пінний режим і пінні апарати «класичного» типу описані в роботах [1, 2]. Інтенсифіковані апарати зі стабілізатором пінного шару знайшли широке застосування для уловлювання пилу з газів і для абсорбції газів в хімічній і суміжних галузях промисловості. Завдяки своїй високій ефективності, великої одиничної потужності, хорошим експлуатаційним якостям, їх застосування дозволяє вдосконалити стадії очищення газу в технологічних і санітарних цілях, збільшити ККД та підвищити надійність газоочисного устаткування

Мета роботи

Метою роботи є вивчення деяких гідродинамічних параметрів таких як газоміст та поверхня контакту фаз при обробці газорідних систем зі стабілізацією пінного шару на протитечійних контактних елементах. 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

Гідродинаміка трубчастих і близьких до них за характеристиками колосникових решіток без стабілізатора піни досить повно досліджена в ряді робіт [3, 4, 5] вітчизняних і зарубіжних дослідників [6-10]. Встановлено, що основний вплив на гідродинаміку зрошуваних решіток надають швидкість газу в повному перерізі апарату, W_z , вільний перетин решіток, S_0 , і щільність зрошення L_0 .

Швидкість гетерогенних процесів масопередачі визначається гідродинамічними параметрами взаємодії і конструкцією робочого апарату. Турбулізація газорідної (Г-Р) системи веде до підвищення інтенсивності масообмінних апаратів. Одним з методів турбулізації системи газ – рідина є перетворення її в рухому нестабільну піну за рахунок кінетичної енергії газу.

Інтенсифіковані апарати зі стабілізатором пінного шару знаходять широке застосування для уловлювання пилу з газів і для абсорбції газів в хімічній і суміжних галузях промисловості. Завдяки своїй високій ефективності, великої одиничної потужності, хорошим експлуатаційними якостями їх застосування дозволяє вдосконалити стадії очищення газу в технологічних і санітарних цілях, збільшити ККД і підвищити надійність газоочисного устаткування.

Промислове застосування методу стабілізації газорідного шару значно розширює область використання пінних апаратів і відкриває нові можливості інтенсифікації технологічних процесів з одночасним створенням маловідходних технологій. Конструктивне оформлення пінних апаратів дозволяє працювати як з перехресним струмом газу і рідини, так і з протитечею.

На підставі дослідження укрупнених моделей пінних апаратів з ґратами, зібраними з трубок різного діаметру, був досліджений зразок пінного абсорбера продуктивністю 12000 м³/год газу. Проведення досліджень було викликано необхідністю встановлення загального характеру гідродинамічних закономірностей.

Пінний шар складається з газової і рідкої фаз, кожна з яких розглядається як суцільне середовище. Взаємний вплив двох фаз враховується введенням в рівняння руху сили міжфазної взаємодії.

При постійному збільшенні швидкості газу у вільному перетині апарату шар піни збільшується за рахунок зменшення барботажного шару і при певній швидкості газу барботажний шар практично зникає, перетворюючись в шар пористої піни. При подальшому збільшенні швидкості газу структура піни змінюється – вона стає рухомою, перетворюється в сильно турбулізовану газорідну систему.

Така піна являє собою зважений шар рідини у

вигляді швидко рухомих плівок і струменів, добре змішаних з бульбашками і струменями газу. При цьому додавання будь-яких спеціальних піноутворювачів не потрібно. З ростом швидкості газу турбулентність піни зростає, структура піни набуває вихровий характер.

Газовміст і поверхня контакту фаз грають важливу роль при вивченні процесів, що відбуваються в системах газ-рідина. Коефіцієнти масопередачі можна визначити, якщо відома питома геометрична поверхня контакту фаз і висота шару піни. Більш докладно зупинимося на визначенні поверхні контакту фаз і газовмісту.

На величину газовмісту впливають швидкість газу в повному перерізі апарату, щільність зрошення і фізичні властивості рідини. Крім того, як показали попередні експерименти, внесення стабілізатора в шар змінює його газовміст. Це видно з графіка, наведеного на рис. 1.

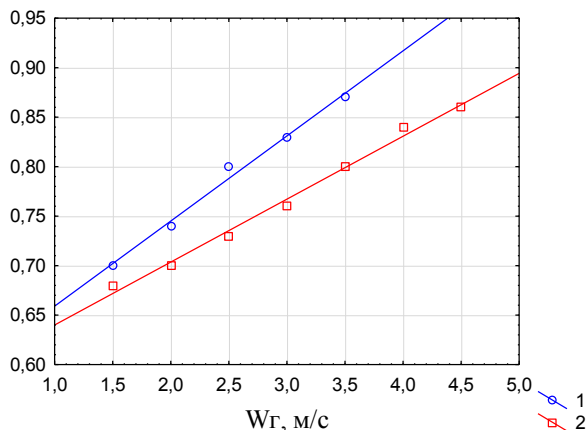


Рис. 1 – Залежність газовмісту пінного шару від швидкості газу при наявності стабілізатора (2) і без нього (1). $S_0 = 0,166 \text{ м}^2/\text{м}^2$, $d_0 = 5 \text{ мм}$, $L_0 = 5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год}$

Зміна газовмісту виявляється істотним при збільшенні і швидкості газу до 2,5 м/с. Якщо при малій швидкості газу різниця φ_2 для апарату зі стабілізатором і без нього була близько 5-6%, то при $W_2 = 2,5 \text{ м/с}$ ця різниця досягає майже 10%, що має велике значення, якщо врахувати, що величина φ_2 при цій швидкості досягає значень 0,75. Існує думка, що збільшення газовмісту призводить до збільшення ПКФ і до очевидного звідси корисного ефекту.

У певних межах це так, але було відзначено, що геометрична питома об'ємна ВКФ зростає до швидкостей газу $W_2 = 2,0 - 2,2 \text{ м/с}$, а потім зменшується. Тому в даному випадку стабілізатор пінного шару, стримуючи зростання газовмісту, дозволяє зрушити точку екстремуму на кривій $a_z = f(W_2)$ збільшуючи геометричну ВКФ і граючи позитивну роль. Це твердження справедливе для великих наведених швидкостей W_2 , але може виявитися невірним при $W_2 \leq 1,5 \text{ м/с}$.

Крім самого факту наявності стабілізатора, деякий вплив на розподіл газовмісту надає його

розташування в шарі по висоті. Та частина піного шару, де знаходиться стабілізатор, ущільнюється. Це особливо помітно при великих витратах рідини. У верхній частині шару значення газовмісту практично залишається незалежним від відстані h_{cm} , хоча і намічаються деякі тенденції зростання середнього значення φ_2 в залежності від h_{cm} . В осередках стабілізатора цей вплив помітніше, що можна пояснити умовою «налипання» прикордонного шару на поверхню пластин стабілізатора. Величина цієї плівки, по нашим вимірам, змінюється в межах 1,5 – 2,5 мм і протягом її, мабуть, направлено на зустріч потоку, що і веде до зміни структури шару, в тому числі і газовмісту в пристінній області.

На підтвердження вищесказаного наводимо профілі газовмісту (рис. 2) від приведеної швидкості газу. Профілі концентрації φ_2 можуть бути описані подібно до профілів швидкостей для круглих апаратів. Профілі газовмісту в даному випадку задаються показником ступеня n і можуть бути знайдені з експерименту.

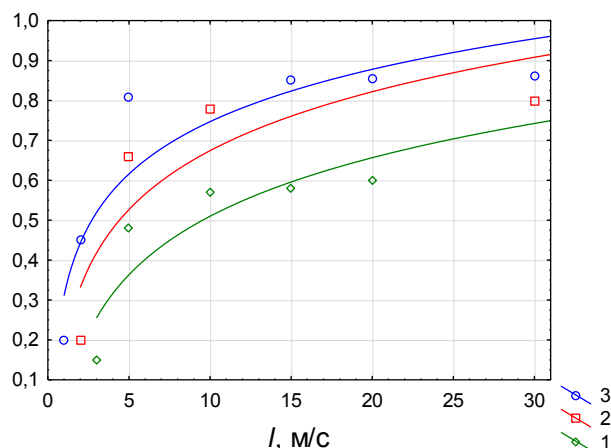


Рис. 2 – Профілі газовмісту при різних швидкостях газу: 1 – $W_2 = 1,5 \text{ м/с}$; 2 – $W_2 = 3,5 \text{ м/с}$; 3 – $W_2 = 4,5 \text{ м/с}$

Для подання розподілу газовмісту по всьому об'єму, ми провели вимірювання локальних значень φ_2 в місці розташування отворів і по висоті шару. Результати вимірювання наведено на рис. 3 та 4, вони підтверджують наявність певних зон. Перша зона (ділянка 0-1) характеризується складною структурою і різко відрізняється значеннями газовмісту в площині решітки. На цій ділянці відбувається руйнування струменів, що виходять з отворів, і протяжність зони визначається силою динамічного напору $W_{дин}$.

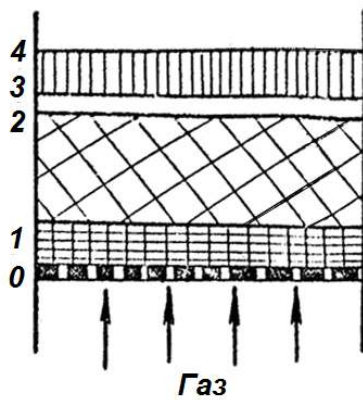


Рис. 3 – Зони газорідного шару на решітці.
0 - 1 зона пінно-струменевої; 1 - 2 зона пінного шару; 2 - 3 зона піни підвищеної щільності; 3 - 4 зона бризок

Причому, збільшення W_z призводить до збільшення цієї зони. При швидкості $W_z = 2$ м/с протяжність цієї зони дорівнює в середньому 5 - 20 мм. Струминне витікання газу передбачає на кордоні струменевої зони виникнення циркуляційної течії (кільцевих вихорів), що створює високу турбулізацію шару і кілька знижує значення φ_z в цих точках при вимірюванні методом «кинутих» точок. Ділянки (а) і (б) залежності на (рис. 4) показують відмінність профілів в зоні (0-1) при вимірі над центром отвору (ділянка а) і над точкою, максимально віддаленою від довколишніх отворів (ділянка б). При вимірі поблизу отвору періодично відбувалася різка зміна газомісту, що можна пояснити протіканням рідини через отвори, а частота коливань при цьому змінюється в межах 1,5-2 Гц.

Для цієї зони характерна також підвищена щільність. Пінний шар (ділянка 1-2) - найбільш протяжний, структура статистично однорідна, за винятком пристінних областей. Спостерігається незначне зростання газомісту з ростом відстані від решітки. Ділянка (2-3) знаходиться на (10-15 мм) нижче верхнього рівня і володіє підвищеною щільністю, в порівнянні з пінним шаром на 15-20%. Протяжність цієї ділянки незначна (10-15 мм) і простежити його дуже важко, так як верхній рівень шару знаходиться постійно в русі.

Існування цієї ділянки можна спостерігати тільки при великій щільності зрошення і швидкості $W_z = 2-3$ м/с. Цей діапазон характеризується сильним коливанням у верхній частині шару і при цьому виникають великі краплі, які зриваються і повертаються в шар разом із зрошуючою рідиною, ущільнюючи його верхню частину. Ущільнення верхньої частини шару сприяє також і зрошувальна рідина, яка надходить в пінний шар зверху. Збільшення швидкості газу призводить до значного виносу рідини і верхня частина газорідного шару при цьому сильно «розтягується», утворюючи зону

бризок (ділянка 3-4). При малих приведених швидкостях газу $W_z < 2$ м/с перехід від зони 1-2 до зони 3-4 відбувається стрибком і ущільнення у верхній частині спостерігається тільки при великій щільності зрошення.

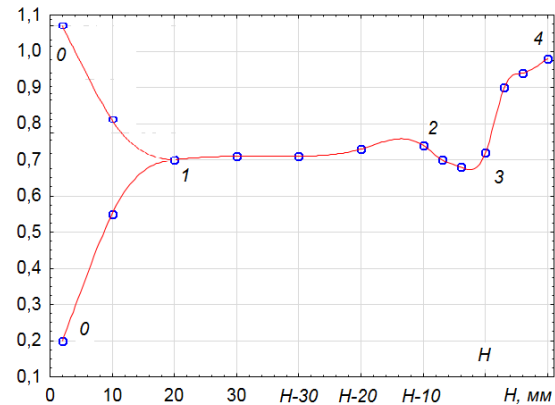


Рис. 4 – Профіль газомісту по висоті пінного шару:
а - над центром отвору; б - над точкою, максимально віддаленою від довколишніх отворів; 0 - 1 - перехідна ділянка; 1 - 2 - пінний шар; 2 - 3 - верхня межа шару; 4 - зона бризок

Найбільший практичний інтерес представляє пінний шар, який займає більшу частину обсягу і є статистично рівномірним. Тому для знаходження середнього значення газомісту досить виміряти його локальні значення в декількох точках і провести осереднення.

Збільшення лінійної швидкості газу супроводжується зростанням газомісту. Причому, залежність ця майже лінійна. Вільний перетин в межах зміни 16-20% на величину не впливає для дірчастих решіток. Практично залежності газомісту від швидкості для дірчастих і двох поточних решіток збігається і лише певна різниця форм кривої спостерігається при швидкості $W_z = 4-5$ м/с.

Збільшення газомісту пов'язано з ростом середнього розміру бульбашок, який визначається дотичними напруженнями на поверхні бульбашок і пропорційний дисипації механічної потужності, наведеної до одиниці об'єму. Зміна швидкості газової фази або рідини веде до зміни дисипації енергії, що, в свою чергу, викликає зміну функції розподілу бульбашок за розмірами, тобто газомісту.

Щільність зрошення L_0 на газоміст впливає в меншій мірі, ніж швидкість газу. Зміна щільності зрошення на дірчастій решітці в двадцять разів (від 1 до 20 м³/м²-год) викликає зменшення газомісту лише приблизно на 5-7%. Збільшення щільності зрошення викликає зменшення газомісту в пристінній області, в той час, в деяких точках пінного шару можливе збільшення φ_z .

Так, на відстані 5 мм від стінки стабілізатора

зміна L_0 від 1 до 8 м³/м²·год практично не викликає зміни φ_z , а в точці, розташованій поблизу стінки, помітне деяке зниження φ_z , в той час як в точці, максимально віддаленій від стінок стабілізатора, спостерігається навіть деяке зростання газовмісту.

Для вивчення впливу таких фізичних параметрів, як в'язкість і поверхневий натяг рідини на величину φ_z , були проведені досліді з водними розчинами мила і гліцерину. Якщо поверхневий натяг змінювався в порівняно широких межах від 0,073 н/м до 0,043 н/м, то в'язкість - тільки в межах 1 - 2,6 сп. Збільшення одного з цих параметрів призводить до зниження величини газовмісту, і, як слід було очікувати, при високій турбулентності газорідного шару, тобто, при швидкостях газу вище 2,5 м/с, вплив поверхневого натягу і в'язкості зводиться до мінімуму. Однак, при швидкостях газу менших 2 м/с необхідно враховувати вплив фізичних властивостей рідини для правильної оцінки гідродинамічної обстановки в апараті.

Вплив в'язкості рідини на газовміст шару визначається співвідношенням між силами тертя всередині шару і об стінки апарату. Збільшення в'язкості призводить до великого збільшення сил тертя на стінці апарату і до малого збільшення всередині шару. Тому наявність стабілізатора збільшує ефект в'язкості.

Загальний вираз для визначення середнього газовмісту при двофазному рідинному потоці має вигляд:

$$\varphi_z = \frac{\bar{\beta}}{C_0 + \frac{\varphi_z W_{zj}}{\varphi_z j}} \quad (1)$$

де $\bar{\beta}$ – об'ємна концентрація газу в потоці, що визначається виразом

$$\bar{\beta} = \frac{Q_z}{Q_z + Q_p} \quad (2)$$

де $Q_z(Q_p)$ – загальна витрата газової (рідкої) фази, C_0 – безрозмірний параметр розподілу. W_{zj} – дрейфова швидкість газової компоненти. \bar{j} – об'ємна середня щільність потоку суміші, яка визначається з виразу:

$$\bar{j} = \frac{Q_z + Q_p}{S} \quad (3)$$

Рівняння (1) може застосовуватися для будь-якого режиму двофазної течії. З його аналізу можна зробити наступний висновок: параметр розподілу C_0 і середньозважена дрейфова швидкість $\overline{\varphi_z W_{zj}} / \varphi_z$ – враховують неоднорідність потоку і профілю концентрації, а місцеву відносну швидкість.

Таким чином, для знаходження φ_z в пінному апараті необхідно знайти профілі концентрацій і швидкостей і рівняння для дрейфової швидкості W_{zj} , використовуючи рівняння кількості руху для

двофазного потоку і рівняння нерозривності, було отримано вираз для середньозваженої дрейфової швидкості при турбулентному бульбашкою перебігу у вигляді:

$$\overline{\varphi_z W_{zj}} = 1.53 \left[\frac{\sigma g (\rho_{жс} - \rho_z)}{\rho_{жс}^2} \right]^{1/4} \quad (4)$$

Слід зазначити, що формула (4) отримана з урахуванням залежності дрейфової швидкості від концентрації. Неоднорідність профілю потоку і концентрації враховує параметр розподілу C_0 , який можна записати у вигляді:

$$C_0 = \frac{\int_A j \varphi_z ds}{\left[\int_A j ds \right] \frac{1}{S} \int_A \varphi_z ds} \quad (6)$$

Тут інтегрування ведеться по площі потоку S , вираз (6) вперше емпірично було отримано Армандом у вигляді:

$$\frac{1}{C_0} = \frac{\bar{\varphi}_z}{\beta}$$

Параметр C_0 змінюється в межах від 1 до 15, в залежності від зміни режиму течії. Знайдемо параметр розподілу C_0 , використовуючи експериментальний матеріал, отриманий в пінному апараті зі стабілізатором пінного шару. Відзначимо, що нам відомі значення профілю газовмісту в залежності від об'ємної витрати. Є підстави вважати, що профіль обох компонентів об'ємної концентрації мало відрізняється від профілю об'ємної щільності потоку, тому для прямокутного каналу параметр розподілу запишеться як:

$$C_0 = \left(\frac{n+2}{n+1/2} \right) \left(\frac{2\varphi_c}{\varphi_z + \varphi_c} \right), \quad (7)$$

де φ_c – газовміст в центральній частині апарату, n – ступінь розподілу, який задається профілем значення газовмісту.

Таблиця 1 - Показники ступеня розподілу n при різних W_z

W_z , м/с	1,5	2,0	2,5	3,0
n	2,2	2,63	2,95	3,67
W_z , м/с	3,5	4,0	4,5	5,0
n	3,85	5,05	6,64	7,8

Зміна швидкості газу призводить до зміни профілю концентрацій, а це змінює значення C_0 відмінність спостерігається також при зміні середнього газовмісту φ_z і газовмісту в центрі потоку φ_c .

Для знаходження параметра розподілу C_0 були використані дані табл. 1, отримані методом «кинутих» точок. Обробка результатів спостережень дозволила отримати C_0 у вигляді простої залежності від швидкості газу: для дірчастої решітки:

$$C_0 = 1,529 - 0,0857 W_z \cdot C^*, \quad (8)$$

де C^* - коефіцієнт розподілу швидкостей, м/с⁻¹.

Остаточний вираз для визначення газовмісту можна отримати у вигляді:

$$\varphi_z = \frac{1}{(C_0 - C^*W_z)(1 + \frac{L_0}{3600W_z}) + \frac{1.53}{W_z} \left[\frac{Gg(\rho_p - \rho_z)}{\rho^2_p} \right]^{1/2}}, \quad (9)$$

де $C_0^* = 1,529$ для дірчастих решіток, а $C^* = 0,057$.

Для води і близьких до неї за фізичними параметрами рідин формула спрощується і набуває вигляду:

$$\bar{\varphi}_z = \frac{1}{(C_0 - C^*W_z)(1 - L_0/3600W_z) + \frac{0,251}{W_z}}. \quad (10)$$

Формула має простий вигляд для знаходження газовмісту, так як не містить дрібних ступенів і залежить практично тільки від двох параметрів, що дещо спрощує інженерні розрахунки.

Коефіцієнт кореляції визначення φ_z для пінного апарату зі стабілізатором пінного шару за формулою (10) при зміні W_z від 1,5 м/с до 4,5 м/с, L_0 від 1 до 15 м³/м² год та $\sigma = 0,05 - 0,073$ н/м лежить в межах 0,94.

Поверхня контакту фаз (ПКФ)

Відомо, що зміна швидкості газу, запасу і фізичних властивостей рідини мають найбільш сильний вплив на величину питомої ПКФ. А такі параметри, як щільність зрошення, діаметр отворів і вільний перетин решітки впливають на ПКФ через величину запасу рідини.

Залежність $a_z \approx f(W_z)$ має точку екстремуму, а це значить, що збільшення швидкості газу викликає збільшення питомої ПКФ, а потім її зниження при інших рівних умовах. Однак застосування відомих формул не дає екстремальних залежностей. Це можна пояснити тим, що дослідники обмежують верхній діапазон зміни швидкості до величини 2 м/с, забезпечуючи тим самим полярність величини $\partial a_z / \partial W_z$. Нас же цікавлять питання інтенсифікації, а, отже, і поведінка питомої ПКФ при швидкостях газу 2 м/с та вище.

Для вирішення цього завдання ми скористалися стереометричним методом вимірювання і знаходили геометричну ПКФ в одиниці об'єму, а також ту, що припадає на одиницю площі решітки. Стереометричний метод вимірювання питомої ПКФ дає статистично середнє в часі значення величини a_z в локальній області. Однак, структура газорідного шару, як по перетину, так і по висоті колони неоднорідна, тому доцільно провести дослідження всередині всього обсягу, щоб врахувати нерівномірність шару при отриманні середніх значеннях ПКФ. Стінки апарату і стабілізатора істотно впливають на гідродинамічну обстановку в

пристінній області апарату. У пристінній області спостерігається складна залежність поведінки геометричної питомої ПКФ від швидкості.

Якщо при малій приведеній швидкості газу $W_z = 1,5$ м/с форма профілю ПКФ мало відрізняється від профілю газовмісту, то збільшення швидкості призводить до появи екстремального ефекту на кривій залежності питомої ПКФ від відстані до стінки. Поява екстремуму спостерігається при швидкості 2,0 м/с і вище. Причому, зростання W_z призводить до збільшення відносини (a_z / \bar{a}_z) . Розподіл, осереднений за часом і експериментальний можна апроксимувати формулою:

$$\frac{a_z}{\bar{a}_z} = A - B \cos \eta \exp(-\eta) + \exp(-2\eta), \quad (11)$$

де A та B – коефіцієнти, η – безрозмірна відстань від стінки.

Експеримент підтверджує припущення про те, що поблизу стінки відбувається дроблення великих газових бульбашок на більш дрібні, що збільшує геометричну питому ПКФ в цій області. Підтверджує це також і існування критичного стану газовмісту 0,7 – 0,75, при якому відбувається інтенсивна коалесценція газових включень. Це явище в пристінній області можна пояснити наступним чином. При малих витратах газової фази поблизу стінки відбувається майже лінійне зростання φ_z та a_z .

Після досягнення критичного витрати газу W^{kp} середній діаметр газових включень збільшується, приводячи до зменшення геометричної питомої ПКФ, однак, консервативні властивості стінки (стабілізатора), які проявляються через $\text{grad } W_z$ і перешкоджають зростанню газовмісту ПКФ, зберігаючи в цій частині значення ПКФ вище середнього. Наявність максимуму питомої ПКФ поблизу стінки видався цікавим ще й в тому сенсі, що наявність вихідних потоків уздовж поверхні призводить до сильної турбулізації, в результаті чого умови для процесу тепломасопередачі в цій області стають більш сприятливими. В області, прилеглої до стінок апарату і стабілізатора, створюються умови для «оновлення» ПКФ, яка має, на нашу думку, вирішальну роль в процесі дифузії.

Дослідження розподілу ПКФ по висоті газорідного шару показало, що найбільш сильна зміна ПКФ спостерігається в притарільчастій зоні і верхньої частини шару. Різке збільшення величини a_z до максимальної спостерігається на відстані 10-30 мм над ґратами, причому, збільшення швидкості призводить до збільшення відношення a_z / \bar{a}_z , а збільшення щільності зрошення до деякого зниження цього відношення і вирівнюванню по висоті. Можна також відзначити збереження трьох зон, кожній з яких притаманна своя структура. При великій щільності зрошення $L_0 > 10$ м³/м²·год і швидкості 2 м/с можна спостерігати ділянку з деяким підвищенням величини

a_z , який здійснює симбатно до верхнього рівня, коливання.

Природно припустити, що в притарильчастій зоні відбувається дроблення струменів і великих бульбашок, внаслідок взаємодії газового потоку з пінним шаром, чим і обумовлене зростання ПКФ. А в верхній частині шару відбувається коалесценція, яка веде до збільшення фракційного складу великих бульбашок, і, як наслідок, зменшує величину a_z . Використовуючи залежності розподілу ПКФ по висоті і діаметру, шляхом усереднення або графічного інтегрування можна отримати середні значення питомої ПКФ в одиниці об'єму.

В результаті порівняння залежності питомої ПКФ для апарату зі стабілізатором пінного шару і без нього отримано, що для обох кривих зберігається екстремальний характер. Очевидно, що стабілізатор перешкоджає зростанню великих бульбашок при збільшенні швидкості. Максимальний розвиток ПКФ для системи повітря-вода знаходиться в діапазоні швидкостей 1,8 - 2,0 м/с, тобто поблизу кордону виникнення хвильового режиму. Цікавим видається той факт, що різке зниження питомої ПКФ в одиниці об'єму при $W_z > 2,5$ м/с для обох залежностей відбувається при одному і тому ж значенні газовмісту, приблизно рівному 0,75. Як відомо, при тих же значеннях газовмісту 0,7 і вище в трубах спостерігається перехід від бульбашкової течії до роздільної – кільцевої. Очевидно, тому, що зменшення ПКФ пов'язано з ростом обсягу бульбашок.

Зростання висоти пінного шару зі швидкістю газу стримує зменшення ПКФ на одиниці площі решітки. Видно, що наявність стабілізатора дозволяє отримати більш розвинену ПКФ на одиниці площі решітки і зрушити екстремальні значення в сторону більших швидкостей. Щільність зрошення на питому геометричну ПКФ чинить менший вплив, ніж швидкість газу. Однак цей вплив зовні носить суперечливий характер. Для пояснення отриманих результатів залежностей можна припустити наступне: при малій щільності зрошення і великій швидкості газу $W_z \geq 3$ м/с значна частина рідини знаходиться в зоні бризок; структура шару представлена великими бульбашками, осередками, агрегатами, тому збільшення щільності зрошення призводить до ущільнення шару, особливо його нижньої частини, і зменшення зони бризок. При малих швидкостях газу $W_z \leq 2$ м/с збільшення L_0 призводить до зниження газовмісту нижче критичного в нижній частині, і відповідно до зміни ПКФ.

Відомо, що фізичні параметри газорідної системи роблять сильний вплив на структурні параметри шару. Тому для встановлення залежностей ПКФ від в'язкості і поверхневого натягу були використані водні розчини мила і гліцерину.

Зміни в'язкості були незначні, в межах від 1 до

2,6 сп. При швидкості газу 2,5 м/с і нижче зберігається залежність ПКФ від в'язкості в ступеня 0,2 - 0,22. Зростання швидкості газу, як видно з малюнка, призводить до залежності від в'язкості до ступеня 0,16 - 0,18. Збільшення геометричної ПКФ зі збільшенням в'язкості обумовлено появою значної кількості маленьких газових включень, особливо поблизу поверхні стабілізатора і стінки. Зменшення поверхневого натягу викликає збільшення геометричної ПКФ в ступені 0,35 для швидкостей, менших 2,5 м/с. При великих швидкостях W_z вплив поверхневого натягу так само, як і в'язкості, знижується.

Обробка експериментальних даних дозволила отримати рівняння множинної регресії для визначення питомої геометричної ПКФ:

$$a_z = 1134,2 + 390,92W_z - 8,76\sigma - 646,69\mu - 87,35W_z^2 + 0,01795W_z\sigma - 19,217W_z\mu - 0,034088\sigma^2 + 7,279\sigma\mu + 85,845\mu^2 \quad (12)$$

Відхилення даних, обчислених за рівнянням (12), від експериментальних знаходиться в межах 15%.

Обговорення результатів

Раніше було висловлено припущення про перспективність використання пористих матеріалів для виготовлення насадкових тіл, то слід підкреслити особливості роботи апаратів з подібними насадками [11]. 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 пористою 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. До того ж використання для таких конструкцій методу стабілізації пінного шару також є перспективним. Отже, необхідне проведення додаткових досліджень гідродинамічних режимів роботи апарату з пористою насадкою і визначенням параметрів, що впливають на швидкість переходу насадки з одного режиму в інший [12].

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, газовміст та 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).

Вивчення інтенсивності перенесення речовини в шарі псевдозрідженої насадки вимагає подальших всебічних досліджень.

У теперішній час розрахунок і проектування апаратів з псевдозрідженою насадкою проводиться поки тільки на основі експериментальних даних 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, хоча мають вищу ефективність для процесів масообміну.

Висновки

З наведених вище положень можна зробити висновок, що на процес масообміну істотний вплив роблять гідродинамічні параметри – швидкість газу в апараті і питоме навантаження по рідині, які опосередковано впливають, на висоту шару рідини на тарілці і газоміст 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. Для систем очищення газів від газоподібних компонентів необхідно забезпечити малі навантаження по рідині при збереженні високого ступеня очищення. Цього можна досягти шляхом використання контактних елементів зі стабілізацією.

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.

З метою розробки теорії і практики процесів обробки газів і рідин в стабілізованому пінному шарі були проведені численні дослідження на лабораторних та напівзаводських пінних апаратах зі стабілізованим шаром. Ці дослідження дозволили встановити теоретичні основи турбулізації газорідних систем, методи і принципи моделювання апаратів а також гідродинамічні та кінетичні закономірності їх роботи.

Встановлено оптимальні режими роботи пінних апаратів зі стабілізацією шару для ряду промислових процесів, розроблені методи розрахунку і конструювання та створений уніфікований ряд типорозмірів апаратів даної конструкції. Накопичений необхідний досвід їх промислової експлуатації. Встановлені теоретичні закономірності мають значення також для розвитку наукових основ для інших способів інтенсифікації процесів в газорідних системах шляхом їх турбулізації.

Застосування нових пінних апаратів зі стабілізацією шару дозволяє докорінно та з

мінімальними витратами реконструювати технологічні схеми очищення газів, що відходять в хімічній та інших галузях промисловості з метою надання їм кращих експлуатаційних і технологічних характеристик з одночасним збільшенням ефективності роботи апаратів.

Висока інтенсивність і велика одинична потужність агрегатів на різних стадіях абсорбційних процесів дозволяють підійти до ефективного вдосконалення технологічних схем конкретних виробництв, потребуючих реконструкції без суттєвого збільшення капітальних витрат на нове обладнання.

Список літератури

1. **Мухленов, И. П.** Пенный режим и пенные аппараты / **И. П. Мухленов, Э. Я. Тарат.** – М.: Химия. – 1977. – 304 с.
2. **Тарат, Э. Я.** Интенсивные колонные аппараты для обработки газов жидкостями / **Э. Я. Тарат, О. С. Балабеков, Н. П. Болтов.** – Л.: Изд. ЛГУ им. А.А.Жданова, 1976. – 244 с.
3. **Мухленов, И. П.** Абсорбция и пылеулавливание в производстве минеральных удобрений / **И. П. Мухленов, О. С. Ковалев.** – М.: Химия. – 1987. – 206 с.
4. **Гельперин, Н. И.** Определение поверхности контакта фаз в массообменном аппарате с псевдооживленной шаровой насадкой / **Н. И. Гельперин, В. З. Гришко, В. А. Михайлов** // *Теор. основы хим. технол.* – 1972. – Т. 6., №4. – с. 534-538
5. **Микулин, Г. И.** Дистилляция в производстве соды / **Г. И. Микулин, И. К. Поляков.** – М., Л.: Госхимиздат, 1956. – 348 с.
6. **Perry, D. C.** Gas absorption and reaction in a wet pneumatic foam / **D. C. Perry, P. Stevenson** // *Chemical Engineering Science.* – 2015. – Volume 126. – P. 177-185. – doi:10.1016/j.ces.2014.11.037.
7. **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. – Volume 79, Issue 4. – P. 244-252. – doi:10.1205/095758201750362280.
8. **Woźniak, M.** An investigation of mass transfer in a countercurrent three-phase fluidized bed / **M. Woźniak, K. Østergaard** // *Chemical Engineering Science.* – 1973. – Volume 28, Issue 1. – P. 167-171. – doi:10.1016/0009-2509(73)85097-3.
9. **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. – Volume 80, Issue 2. – P. 135-144. – doi:10.1205/026387602753501852.
10. **Jungkee, Jang.** CFD simulation of a pharmaceutical bubbling bed drying process at three different scales / **Jungkee Jang, Hamid Arastoopour** // *Powder Technology.* – 2014. – Volume 263. – P. 14-25. – doi:10.1016/j.powtec.2014.04.054.
11. **Моисеев, В. Ф.** Обработка газожидкостных систем на трубчатых решетках со стабилизатором пенного

- слоя /В. Ф. Моїсєєв, 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.
12. **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. Давыдов** // *Вісник НТУ «ХПИ»*, Серия: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 165-176. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.25.
- Bibliography (transliterated)**
1. **Mukhlenov, I. P., Tarat, E. Ya.** Pennyu rezhim i pennyue apparaty. M.: Khimiya, 1977, 304 s.
 2. **Tarat, E. Ya., Balabekov, O. S., Boltov, N. P.** Intensivnyye kolonnyye apparaty dlya obrabotki gazov zhidkostyami. L.: Izd. LGU im. A.A.Zhdanova, 1976, 244.
 3. **Mukhlenov, I. P., Kovalev, O. S.** Absorbtsiya i pyleulavlivaniye v proizvodstve mineral'nykh udobreniy. M.: Khimiya, 1987, 206.
 4. **Gel'perin, N. I., Grishko, V. Z., Mikhaylov, V. A.** Opredeleniye poverkhnosti kontakta faz v massoobmennom apparate s psevdoozhizhennoy sharovoy nasadkoy. *Teor. osnovy khim. tekhnol.*, 1972, **6**, №4., 534-538
 5. **Mikulin, G. I., Polyakov, I. K.** Distillyatsiya v proizvodstve sody. M., L.: Goskhimizdat, 1956, 348.
 6. **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.
 7. **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.
 8. **Woźniak, M., Østergaard, K.** An investigation of mass transfer in a countercurrent three-phase fluidized bed. *Chemical Engineering Science*, 1973, **28**, 1, 167-171, doi:10.1016/0009-2509(73)85097-3.
 9. **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.
 10. **Jungkee, Jang, Arastoopour, Hamid.** 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.
 11. **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.
 12. **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.

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: publikova1@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: publikova1@gmail.com.

Ляпощенко Олександр Олександрович – доктор технічних наук, Сумський державний університет, доцент кафедри «Процеси та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв», м. Суми, Україна; e-mail: o.liaposhchenko@pohnp.sumdu.edu.ua.

Alexander Liaposhchenko – Doctor of Technical Sciences, Sumy State University, Docent of the Department "Processes and Equipment for Chemical and Petroleum Processing Industries", Sumy, Ukraine; e-mail: o.liaposhchenko@pohnp.sumdu.edu.ua.

Хухрянський Олег Миколайович – генеральний директор ПАТ "УКРХІМПРОЕКТ", м. Суми, Україна; e-mail: khukhryanskiy@ukrhimproekt.com.ua.

Oleg Khukhryanskiy – General Director of "UKRHIMPROEKT", Sumy, Ukraine; e-mail: khukhryanskiy@ukrhimproekt.com.ua.

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.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Моїсєєв, В. Ф. Структура пінного шару на протиточних контактних елементах зі стабілізацією / **В. Ф. Моїсєєв, Є. В. Манойло, О. О. Ляпощенко, О. М. Хухрянський, Н. Г. Пономарьова** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 2. – С. 83-92. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.37.

Please cite this article as:

Moiseev, V., Manoilo, E., Liaposhchenko, A., Khukhryansky, O., Ponomaryova, N. Foam layer structure on countercurrent contact elements with stabilization. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, 26 (1302), 2, 83-92, doi:10.20998/2413-4295.2018.26.37.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Моисеев, В. Ф. Структура пенного слоя на противоточных контактных элементах со стабилизацией / **В. Ф. Моисеев, Е. В. Манойло, А. А. Ляпощенко, О. Н. Хухрянский, Н. Г. Пономарёва** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 2. – С. 83-92. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.37.

АННОТАЦИЯ 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 выявлены основные закономерности гидродинамики пенного слоя со стабилизатором на противоточных контактных элементах. Рассматриваются структурные параметры фаз пенного слоя как цельной среды. Учитывается взаимное влияние двух фаз. Изучены закономерности газосодержания и параметры площади контакта фаз. Установлены функциональные зависимости основных параметров процесса. Проведенный анализ ряда исследований показал, что перспективным направлением интенсификации процесса массообмена является разработка аппаратов с трехфазным псевдооживленным слоем орошаемой насадки сложных форм из пористых материалов. Следовательно, необходимо проведение специальных исследований гидродинамических режимов работы аппарата со стабилизируемым пенным слоем с определением параметров, влияющих на скорость перехода контактного элемента из одного режима работы 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) 13.06.2018