

В. Ф. МОЙСЕЕВ, Є. В. МАНОЙЛО, Ю. О. МАНОЙЛО, К. Ю. РЕПКО, О. О. ЖУГА, Д. В. ДАВИДОВ

ГІДРАВЛІЧНИЙ ОПІР ТА БРИЗКОВІДНЕСЕННЯ У СТАБІЛІЗОВАНОМУ ТРИФАЗНОМУ ПІННОМУ ШАРІ

Промислове впровадження способу стабілізації газорідного шару дозволяє значно розширити область застосування пінних апаратів і відкриває нові можливості для інтенсифікації технологічних процесів з одночасним створенням маловідходних технологій. У статті встановлені основні параметри, що впливають на гідродинаміку пінного апарату, розглянуті основні конструкції і режими роботи пінного апарату. Виявлено зв'язок гідродинамічних параметрів. Розглянуто гідродинамічні закономірності шару піни. Зазначені фактори 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 з сітчастими матеріалами. Була розроблена нова конструкція стабілізатора з великим вільним об'ємом і сферичні рухомі насадки. Перевагою запропонованої конструкції нерегулярної насадки є перехід до режиму роботи зі структурованою піною при відносно низьких швидкостях газу, а також розвинена поверхня контакту фаз. Після експериментальних досліджень гідродинамічних характеристик комбінованого контактного елемента були отримані експериментальні дані по гідродинамічному опору і експериментальні показники бризковіднесення для контактної ступені з комбінованими контактними елементами. В результаті досліджень було встановлено, що при використанні стабілізаторів шару піни знижується бризковіднесення на ступені контакту, що призводить до більш стабільної роботи пристрою. Наведено емпіричне рівняння для визначення значення бризковіднесення. Зазначено, що механізм переходу сопла в режим підвищеного псевдозрідження буде істотно відрізнятися від звичайних балістичних сопел. Дослідження масообміну в абсорбері з псевдозрідженим шаром зрошуваної форсунки ускладнюється тим, що поверхня контакту між фазами може значно варіюватися в залежності від гідродинамічних умов, зокрема, від швидкості газу і щільності зрошення.

Ключові слова: гідродинаміка; стабілізація; шар піни; дірчаста тарілка; турбулізація; рухома насадка; зниження бризко віднесення; викиди промислових газів; процес очищення; інтенсивний апарат

V. F. MOISEEV, E. V. MANOULO, Y. O. MANOULO, K. Y. REPKO, O. O. ZHUHA, D. V. DAVYDOV

HYDRAULIC RESISTANCE AND SPRAY REMOVAL IN STABILIZED THREE-PHASE FOAM LAYER

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. A new design of the stabilizer with a large free volume and a spherical movable nozzle was developed. The advantage of the proposed design is the transition to a structured foam mode of operation at relatively low gas speeds, as well as a developed phase contact surface. After experimental studies of the hydrodynamic characteristics of the combined contact element, experimental data on hydrodynamic resistance and experimental indicators of spray attribution for a contact stage with combined contact elements were obtained. As a result of research, it was found that when using foam layer stabilizers, the spray ratio at the contact stage is reduced, which leads to more stable operation of the device. Empirical equation for determining the value of the spray attribution is given. 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.

Keywords: hydrodynamics; stabilization; foam layer; hole plate; turbulization; movable nozzle; spray removal reducing; industrial gas emissions; cleaning process; intensive apparatus

В. Ф. МОЙСЕЕВ, Е. В. МАНОЙЛО, Ю. А. МАНОЙЛО, К. Ю. РЕПКО, О. А. ЖУГА, Д. В. ДАВИДОВ

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И БРЫЗГООУНОС В СТАБИЛИЗИРОВАННОМ ТРЕХФАЗНОМ ПЕННОМ СЛОЕ

Промышленное внедрение способа стабилизации газожидкостного слоя позволяет значительно расширить область применения пенных аппаратов и открывает новые возможности для интенсификации технологических процессов с одновременным созданием малоотходных технологий. В статье установлены основные параметры, влияющие на гидродинамику пенного аппарата, рассмотрены основные конструкции и режимы работы пенного аппарата. Показана связь гидродинамических параметров. Рассмотрены гидродинамические закономерности слоя пены. Указанные факторы влияют на процесс массообмена, как в газовой, так 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 с сетчатыми материалами. Была разработана новая конструкция стабилизатора с большим свободным объемом и сферическими подвижными соплом. Преимуществом предлагаемой конструкции является переход к режиму работы со структурированной пеной при относительно низких скоростях газа, а также развитая поверхность контакта фаз. После экспериментальных исследований гидродинамических характеристик комбинированного контактного элемента были получены экспериментальные данные по гидродинамическому сопротивлению и экспериментальные показатели брызгоуноса для контактной ступени с комбинированными контактными элементами. В результате исследований было установлено, что при использовании стабилизаторов пены снижается брызгоунос на ступени контакта, что приводит к более стабильной работе устройства. Приведено эмпирическое уравнение для определения значения брызгоуноса. Указано, что механизм перехода насадки в режим псевдооживления существенно отличается от обычных шаровых насадок. Исследование массообмена в абсорбере с псевдооживленным слоем орошаемой насадки осложняется тем, что поверхность контакта между фазами может значительно варьироваться в зависимости от гидродинамических условий, в частности, от скорости газа и плотности орошения.

Ключевые слова: гидродинамика; стабилизация; слой пены; дырчатая тарелка; турбулизация подвижная насадка; снижение брызгоуноса, выбросы промышленных газов; процесс очистки; интенсивный аппарат

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. А способом інтенсифікації зазначених процесів є їх проведення у стабілізованому пінному шарі.

Сучасний стан проблеми. Режим спінування і пристрої для спінування "класичного" типу описані в роботах [1-2]. Завдяки своєму високому ККД, високій питомій продуктивності, хорошим експлуатаційним якостям при їх застосуванні вони дозволяють удосконалити стадії очищення газу в технологічних і санітарних цілях, підвищити ККД і підвищити надійність газоочисного обладнання [3-4].

Одним з перспективних напрямків інтенсифікації процесу масообміну є розробка апаратів з використанням стабілізованого пінного режиму взаємодії газорідних потоків у тому числі із наявністю рухомих насадочних тіл.

Досліджені раніше апарати з пінним шаром [5-6] 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 та із невисоким бризко віднесенням [7-9].

Методика дослідження. Була розроблена нова конструкція стабілізатора із великим вільним обсягом та шароподібні насадки. Перевагою запропонованої конструкції є перехід у структурований пінний режим роботи при порівняно низьких швидкостях газу, а також розвинена поверхня контакту фаз. Чарункова структура, з якої виготовлено стабілізатор та насадка, дозволяє досягти підвищених значень коефіцієнтів масопередачі за рахунок ефекту утворення плівки в осередках малого розміру. Конструкція має високу

порозність і відносно низький гідравлічний опір. Залежно від підбору матеріалу конструкція може мати різну змочуваність. Нові конструкції прості 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 процесів тепло- та масообміну у тому числі шляхом модернізації вже діючих установок.

Комбінований контактний блок складається із провальної тарілки та одного чи двох контактних елементів, що виступають у якості стабілізаторів, та розташованої всередині блоку зваженої шароподібної насадки.

Для проведення досліджень гідродинамічних параметрів були обрані контактні елементи - стабілізатори, які представляють собою пакети або блоки, набрані зі сталевих плоских і гофрованих під кутом 30, 45, 60, 90 ° листів металевої сітки.

Барботажний шар утворюється на дірчастих провальних тарілках на яких розташовано зважену насадку. Особливості конструкції і режими роботи дозволяють системі самоочищатися від можливих дисперсних включень і працювати тривалий час без зупинок на прочищення.

У роботі були досліджені гідравлічний опір запропонованої конструкції та показники бризко віднесення.

Принципова схема експериментальної установки для вивчення гідродинаміки зображена на рис. 1. Комбінований лабораторний апарат виконаний шляхом з'єднання трьох царг з внутрішнім діаметром 240 мм, виготовлених з нержавіючої сталі, з оглядовими вікнами з органічного скла. Експериментальна установка складається з наступних основних елементів: вертикального колонного апарату із комбінованими контактними блоками, вентилятора з газоходом, водопідводної, водорозподільної і водозбірної систем.

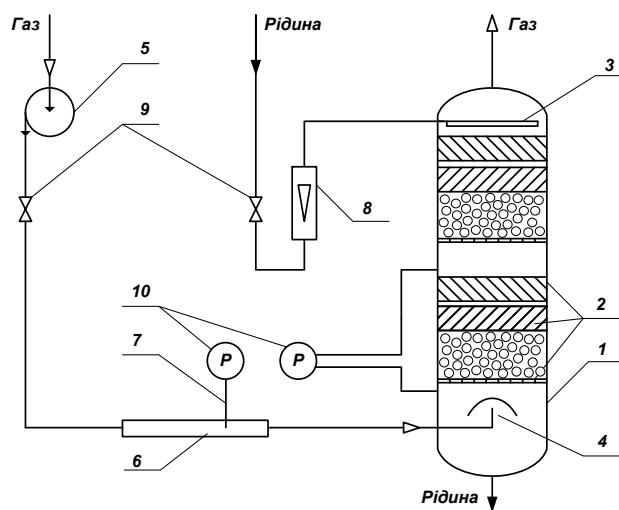


Рис. 1 – Схема лабораторної установки для дослідження

гідралічного опору комбінованого контактного елемента.
 1 – колона; 2 – блок комбінованого контактного елемента із стабілізованим трифазним пінним шаром;
 3 – розподільник рідини; 4 – розподільник газу;
 5 – газодувка; 6 – вимірювальна труба; 7 – трубка Піто;
 8 – ротаметр; 9 – вентиля; 10 – дифманометри.

Комбінований контактний блок із зваженою шароподібною насадкою, встановлюється в середній робочій секції колони, у верхній секції колони розміщуються сепаратор і водорозподільна система, а нижня секція призначена для входу повітряного потоку через розташовані в ній вікна для підводу повітря і для збору води.

У колоні організовано протитечійний рух фаз. Повітря від вентилятора по газоходу подається в нижню частину апарата. Далі воно проходить через сітчастий розподільник, в результаті чого досягається рівномірний профіль швидкості на вході в контактний блок. В той же час рідка фаза з напірної ємності подається на зрошення в колону.

Для рівномірного початкового розподілу рідкої фази по перерізу апарату зверху встановлений розподільник. Проходячи через апарат, рідина розподіляється по поверхні контактних елементів, а газова фаза займає весь вільний обсяг апарата. Далі рідина надходить в накопичувальну ємність, а повітря викидається в атмосферу. В колону встановлювали по три комбінованих контактних блоки. Робочим є середній блок. Для вимірювання перепадів тиску використовували відбірники, які поміщали всередину колони та за допомогою гумових шлангів з'єднували з диференціальним мікроманометром через штуцери, передбачені в колоні для цих цілей.

Для визначення перепаду тиску над і під блоком були встановлені датчики тиску, що представляють собою трубки Піто-Прантля, які дозволяють фіксувати зміну динамічного впливу висхідного газового потоку в залежності від його витрати, витрати рідкої фази і геометрії складових контактних елементів. Датчики тиску з'єднані з диференціальним манометром, з якого знімаються показання перепаду тиску в шарі контактних елементів.

Робочим середовищем в експериментах виступало повітря. Випробування проводилися для декількох модифікацій комбінованих контактних блоків, які відрізнялися один від одного наявністю одного або двох стабілізаторів, встановлених на відстані від провальної тарілки, а також із відстанню між стабілізаторами. Для вимірювання гідралічного опору зрошувального елемента в колону насосом подавалася вода, витрати якої регулювався краном і встановлювалися за показаннями ротаметра; за допомогою зрошувача вода рівномірно розподілялася по перетину колони. Потім включалася подача повітря, і гідралічний опір зрошувального контактних елементів вимірювали аналогічно гідралічному опору сухого контактних елементів.

Бризковіднесення з контактних елементів є однією із важливих гідродинамічних характеристик масообмінних колон, які призначені для обробки

парогазових та рідинних потоків. Воно в значній мірі визначає верхні граничні навантаження, розподіл сил міжфазного масо- і теплопереносу в колоні та її гідралічний опір. На сьогодні використовують два методи. Для вимірювання бризковіднесення використовували уловлювач, який сепарує винесені краплини рідини із потоку. Дослідження міжтарільчатого бризковіднесення проводилося на гідродинамічному стенді, який був модернізований після проведення гідродинамічних досліджень. Було залишено один комбінований контактний блок для дослідження.

Бризковіднесення заміряли ваговим методом за допомогою волокнистого сепаратора з войлоку, який перебиває газохід на виході з апарата. Після пуску газу і утворення в апараті барботажного шару (через 3-10 секунд після пуску газу) висушений і зважений войлочний сепаратор встановлювали в газохід у верхній частині апарата, і відсікали час початку досліду. Таким чином, весь газовий потік проходив крізь сепаратор, а бризки, які містяться в газі уловлювалися.

Тривалість досліду становила від 60-120 секунд залежно від навантаження по газу. Після дослідів волокнистий сепаратор виймали з газоходу, повторно зважували і по зміні його маси за час проведення досліду обчислювали витрати рідини, що виносилася газовою фазою. Зважування вологого сепаратора проводилося на електронних вагах. Досліди по виміру бризковіднесення проводили в тому ж діапазоні зміни навантажень по газу і рідини що і досліди по визначенню інших гідродинамічних характеристик комбінованого апарата.

Результати дослідження. На гідродинамічні характеристики комбінованого контактних елементів впливають швидкість газу в повному перерізі апарата, щільність зрошення та вільний перетин контактної ступені, який залежить в основному від вільного перетину дірчастої тарілки.

Тому можна записати для системи повітря-вода загальну залежність:

$$\Delta P = f(W_z, L_0, S_0, d_e) \quad (1)$$

Гідралічний опір контактних елементів та газорідинного шару що створюється залежить від режимних параметрів, зокрема від діаметру тарілок, вільного перетину, масових витрат газу та рідини. Загальний вигляд рівняння для визначення гідралічного опору контактних елементів із шаром піни приведено у вигляді [7]:

$$\Delta P = P_c + P_w + P_\sigma \quad (2)$$

$$\text{де, } P_c = \zeta \frac{W_z^2 \rho_z}{2S_0} - \text{опір сухого контактних елементів;}$$

елементів;

$$P_w = g \rho_p \frac{W_z^k L_0}{S_0^m d_e^m} - \text{опір пінного шару в контактних елементів;}$$

елементів;

$$P_\sigma = \frac{4\sigma}{1,3d_0 + 0,06d_0^2} - \text{опір, який виникає в}$$

результаті дії сил поверхневого натягу.

На рис. 2 представлена залежність гідравлічного опору сухого контактної елементу від швидкості газу у вільному перетині колони при використанні дірчастих тарілок різного вільного перетину. З рис. 2 видно, що із зростанням швидкості газу зростає гідравлічний опір, і чим менше площа вільного перетину та діаметр отвору тарілки - тим опір більший.

По гідравлічному опору пінного шару судять не тільки про затрачену енергію на процес, але і про інтенсивність процесу в цілому, оскільки висота піни і її гідродинамічний опір взаємопов'язані.

В результаті обробки даних було отримано емпіричне рівняння для визначення середнього гідравлічного опору контактної елементу:

$$\Delta \bar{P} = 6,8 W_{\Gamma}^{1,5} L_0^{0,3} d_o^{0,7} S_0^{-3} \quad (3)$$

Величина середнього значення ΔP , що розрахована за формулою (3) відрізняється від експериментальних значень не більше ніж 15%.

Аналізуючи формулу (3) можна стверджувати, що на ΔP найбільше впливають швидкість газу в повному перетині апарату та вільний перетин, що підтверджується залежностями на рис. 3 та рис. 4.

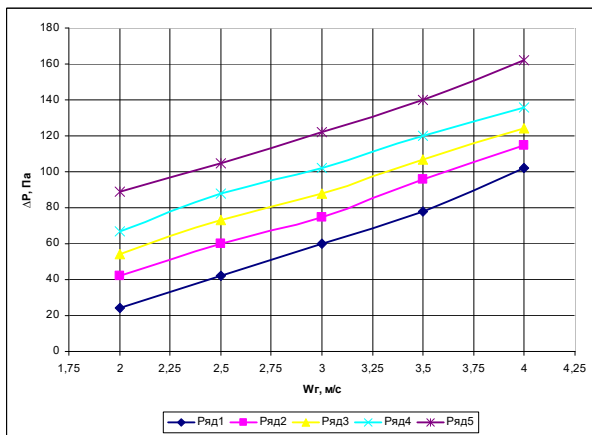


Рис. 2 – Залежність гідравлічного опору сухого контактної елементу від швидкості газу.

1 – $S_0 = 0,38 \text{ м}^2/\text{м}^2$, $d_o = 0,02 \text{ м}$; 2 – $S_0 = 0,244 \text{ м}^2/\text{м}^2$, $d_o = 0,016 \text{ м}$; 3 – $S_0 = 0,217 \text{ м}^2/\text{м}^2$, $d_o = 0,015 \text{ м}$; 4 – $S_0 = 0,137 \text{ м}^2/\text{м}^2$, $d_o = 0,012 \text{ м}$; 5 – $S_0 = 0,095 \text{ м}^2/\text{м}^2$, $d_o = 0,01 \text{ м}$

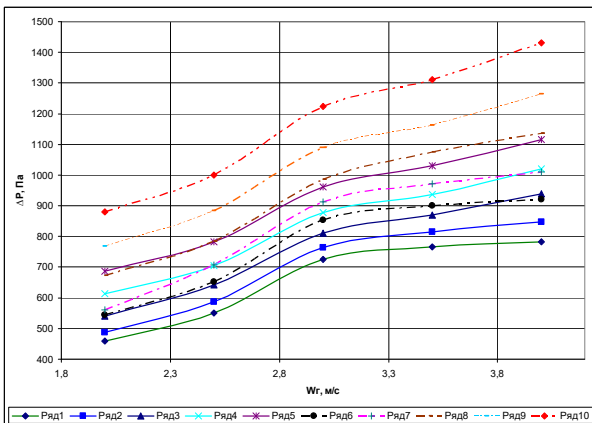


Рис. 3 – Залежність гідравлічного опору контактної елементу від швидкості газу та діаметру отворів провальної тарілки. 1 – 5: $L_0 = 5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год}$; 1 – $d_o = 0,02 \text{ м}$; 2 – $d_o = 0,016 \text{ м}$; 3 – $d_o = 0,015 \text{ м}$; 4 – $d_o = 0,012 \text{ м}$; 5 – $d_o = 0,01 \text{ м}$; 6 – 10: $L_0 = 10 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год}$; 6 – $d_o = 0,02 \text{ м}$; 7 – $d_o = 0,016 \text{ м}$; 8 – $d_o = 0,015 \text{ м}$; 9 – $d_o = 0,012 \text{ м}$; 10 – $d_o = 0,01 \text{ м}$

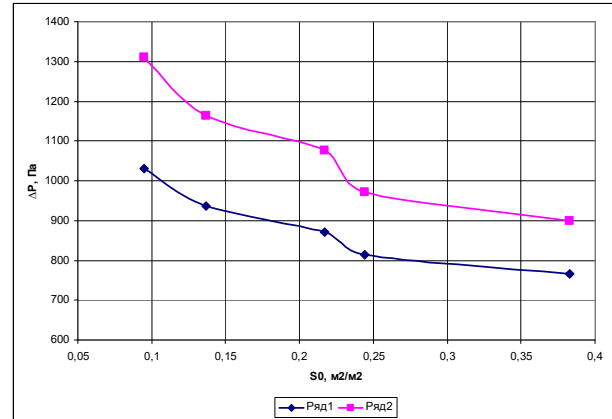


Рис. 4 – Залежність гідравлічного опору від вільного перетину контактної ступені: $W_{\Gamma} = 3,5 \text{ м/с}$; $d_o = 0,04 \text{ м}$, $L_0: 1 - 5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год}$; 2 – $10 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год}$

Так видно, що із зростанням швидкості газу зростає гідравлічний опір контактної елементу. Це зумовлено тим, що при зростанні швидкості газу зростає висота газорідного шару при достатньому рівні зрошення, що призводить до пропорційного росту опору. Зворотну залежність мають гідравлічний опір та вільний переріз контактної елементу – із зростанням вільного перетину – зменшується гідродинамічний опір, оскільки зменшується висота піни та утримуюча здатність контактної ступені, а при низьких швидкостях газу, зростає провал рідини на нижні ступені контакту. Ці результати підтверджуються дослідженнями [10-12].

Бризковіднесення в комбінованому контактному елементі

Однією з важливих характеристик колонних апаратів є бризковіднесення. Під час досліджень при швидкостях газу від 2,5 – 4 м/с спостерігалися режими високотурбулізованої газорідної системи та було наявне явище бризковіднесення.

Досліди з бризковіднесення проводилось у залежності від ряду впливаючих на газорідний пінний шар параметрів. До них належать W_{Γ} , L_0 , S_0 , d_o швидкість газу, навантаження по рідині, вільний перетин контактної ступені, та діаметр отворів дірчастої тарілки.

На рис 5 можна побачити, що чим більші отвори в тарілці тим більше значення бризковіднесення. Цей факт пояснюється тим, що при збільшенні діаметра отворів відбувається збільшення кінетичної сили, яка утворює газові вихори більших розмірів. У результаті зростає кінетична енергія пінного шару та відбувається відрив крапель, які у повному обсязі не стримує навіть подвійна стабілізація пінного шару, хоча це значно знижує бризковіднесення у порівнянні із роботою дірчастої тарілки без стабілізації пінного

шару.

Помітний вплив на бризковіднесення має швидкість газу у вільному перетині (рис 6). При збільшенні швидкості газу до 3,5 м/с верхній шар піни під дією кінетичної енергії газу починає руйнуватися.

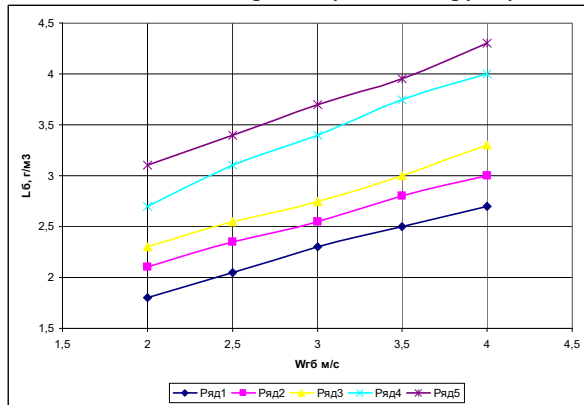


Рис. 5 – Залежність питомого бризко-віднесення від площі вільного перетину та швидкості газу: $L_0 = 5 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{год}$, контактний елемент із двома стабілізаторами без зазору: 1 – $S_0 = 0,095 \text{ м}^2/\text{м}^2$; 2 – $S_0 = 0,137 \text{ м}^2/\text{м}^2$; 3 – $S_0 = 0,217 \text{ м}^2/\text{м}^2$; 4 – $S_0 = 0,244 \text{ м}^2/\text{м}^2$; 5 – $S_0 = 0,383 \text{ м}^2/\text{м}^2$

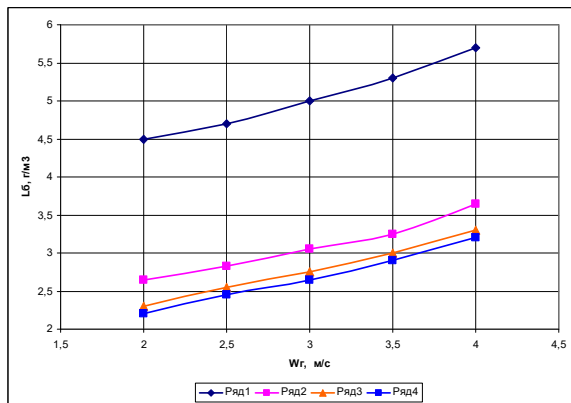


Рис. 6 – Залежність питомого бризковіднесення від швидкості газу: $L_0 = 5 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{год}$, $S_0 = 0,217 \text{ м}^2/\text{м}^2$, $d_0 = 0,015 \text{ м}$; 1 – без стабілізаторів; 2 – із застосуванням 1 стабілізатора; 3 – із застосуванням 2 стабілізаторів; 4 – із застосуванням 2 стабілізаторів із зазором 0,01 м

Кількісна величина бризковіднесення на дрібно дірчастих тарілках описується таким емпіричним рівнянням, $\text{г}/\text{м}^3$:

$$L_0 = 0,36W_g^{2,25} d_0^{0,36} S_0^{-0,18} \quad (4)$$

Величина бризковіднесення на крупно дірчастих тарілках з використанням двох стабілізаторів описується рівнянням виду, $\text{г}/\text{м}^3$,

$$L_{0(2)} = 2,1W_g^{1,65} d_0^{0,45} S_0^{-0,20} \quad (5)$$

При встановленні другого стабілізатора (рис.6) у верхній частині пінного шару спостерігалось значне скорочення бризків, оскільки газоріднинний потік має додаткове скручування та спрямування газу і рідини під кутом до стінки апарату. Також було відмічено незначне зменшення величини бризковіднесення при збільшенні щільності зрошення рис. 7.

Отже, проаналізувавши рівняння 4 та 5, можна

зробити висновок, що найбільший вплив на бризковіднесення має швидкість газу у вільному перетині, навіть при використанні подвійної стабілізації пінного шару. Похибка при розрахунках за рівняннями 4-5 складає $\pm 10\%$.

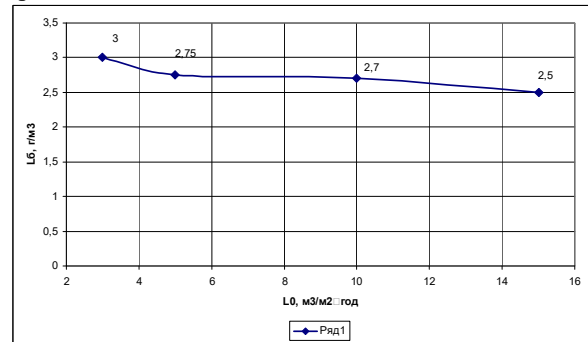


Рис. 7 – Залежність бризковіднесення від щільності зрошення: $W_g = 3 \text{ м/с}$; $S_0 = 0,217 \text{ м}^2/\text{м}^2$, $d_0 = 0,015 \text{ м}$

При проведенні експериментальних досліджень гідродинамічних характеристик роботи комбінованого контактного елемента були отримані експериментальні дані з гідродинамічного опору та експериментальні показники бризко віднесення для контактної ступені з комбінованими контактними елементами.

В результаті досліджень встановили що при застосуванні стабілізаторів пінного шару бризковіднесення на контактній ступені скорочується, що призводить до більш стабільної та рівномірної роботи апарату. Приведені емпіричні залежності для визначення величини бризко віднесення.

Таким чином, для подальшої інтенсифікації абсорбційних апаратів можливо використання запропонованої конструкції зваженої насадки у режимі трифазного пінного шару. Раніше було висловлено припущення про перспективність використання сітчастих матеріалів для виготовлення насадкових тіл, то слід підкреслити особливості роботи апаратів з подібними контактними пристроями [13]. 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 псевдозріднення істотно відрізняється від звичайних кульових насадок [14].

Наведені рівняння мають емпіричний характер, що визначає можливість їх застосування тільки для умов дослідів, на прикладі яких вони виведені. Тому розрахунок і проектування апаратів з пінним шаром та з псевдозрідженою насадкою проводиться поки тільки на основі експериментальних даних [15-17], отриманих на обмеженій кількості взаємодіючих систем.

Висновки. Перспективним напрямом інтенсифікації процесів абсорбції/десорбції є

розробка апаратів з трифазним стабілізованим псевдозрідженим шаром зрошуваної насадки 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 або середнім вільним перетином і нової розробленої шароподібної насадки та стабілізатору, коли апарат працює у розвиненому пінному режимі із стабілізацією.

Аналіз ряду досліджень [2, 5, 7, 9] 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.

Збільшення кількості різноманітних і складних за складом викидів в атмосферу, що супроводжує зростання ряду галузей промисловості, викликає потребу в ефективних і надійних в експлуатації газоочисних установках.

Інтенсифікація пінних апаратів стала можливою завдяки застосуванню нових конструкцій зі стабілізатором пінного шару. На решітках зі стабілізатором не виникає хвильовий режим, завдяки чому швидкість газу в повному перерізі апарата може бути збільшена більш ніж у два рази і сягати 5 м/с. Усунення коливань пінного шару призводить до значного збільшення висоти піни і вихідного шару рідини, а ступінь уловлювання погано розчинних газів зростає в усьому діапазоні досліджених швидкостей газу.

Значно розширюються діапазон стійкої роботи апаратів при змінах навантажень по газу і рідині. Це має вирішальне значення для надійної та ефективної роботи газоочисних систем технологічних ліній з перемінним навантаженням по потужності.

Таким чином, промислова реалізація методу стабілізації газорідного трифазного шару дозволяє значно розширити сферу застосування пінних апаратів і відкриває нові можливості з інтенсифікації технологічних процесів із незначною реконструкцією діючого обладнання технологічних установок. При цьому можливе одночасне створення маловідходних технологій.

Список літератури

1. N. Pavlenko, N. I. Pecherkin, V. E. Zhukov, G. Meski, and P. Houghton, "Overview of methods to control the liquid distribution in distillation columns with structured packing: Improving separation efficiency," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 132, p. 110092, Oct. 2020.
2. J. Zbytovsky, T. Sommer, M. Zapletal, and J. Trejbal, "Comparison of various column packing materials efficiency for

- hydrocarbons and aqueous mixtures." *Chemical and biochemical engineering quarterly*, vol. 33, no. 2, pp. 183-190, 2019.
3. D. C. Perry. Gas absorption and reaction in a wet pneumatic foam//D. C. Perry, P. Stevenson//*Chemical Engineering Science*. – 2015. – Volume 126. – P. 177-185 – <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.11.037>
 4. S. Wang, S. Wang, B. Wu, Y. Lu, K. Zhang, H. Chen, "Effect of packing structure on anisotropic effective thermal conductivity of thin ceramic pebble bed", *Nuclear Engineering and Technology*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.01.013>
 5. R. Clavier, N. Chikhi, F. Fichot, M. Quintard, "Modeling of inertial multi-phase flows through high permeability porous media: friction closure laws," *Int. J. Multiphase Flow* 91 pp. 243-261., 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.02.003>.
 6. M. Fourati, V. Roig, and L. Raynal, "Experimental study of liquid spreading in structured packings," *Chemical Engineering Science*, vol. 80, pp. 1–15, Oct. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.05.031>
 7. Кузнецов П.В., Структурные параметры пенного слоя на мелкодырчатых противоточных решетках со стабилизатором /Кузнецов П.В. // *Східно-європейський журнал передових технологій*. – Харків: Технологічний центр, 2004. – № 4(10) – С. 84-88
 8. O. K. Rahmonov. Study of the process of deposition of fine particles in the apparatus with a movable nozzle / *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 2017, №2. <https://doi.org/10.20534/AJT-17-11.12-78-81>
 9. 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, <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2018.16.25>.
 10. Arakelyan V. B., Danko V. P., Grigoryan R. P. Influence of the external noise intensity on the kinetics of ligands binding to receptors. Influence of the external noise intensity on the kinetics of ligands binding to receptors. *Journal of Contemporary Physics*. 2017, Vol. 52, no. 1. <https://doi.org/10.3103/S106833721701011X>
 11. Shestova T. D., Markvart A. S., Lozovsky T. L., Zhelezny V. P. Cubical equations of state for predicting the phase equilibria of poorly studied substances. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2013, Vol. 87, No. 6, P. 883. <https://doi.org/10.1134/S0036024413060253>
 12. Valueva E. P., Purdin M. S. Hydrodynamics and heat exchange of the pulsing laminar stream in channels. *Теплоенергетика*. 2015, No. 9, P. 24. DOI:10.1134/S0040601515090116
 13. Moiseev V., Liaposhchenko O., Manoilo E., Khukhryansky O. Demianenko M. Hydrodynamic Parameters of a Combined Contact Device. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. — Springer, 2021. — P.257-267. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_26
 14. Vitcovskaya R.F., Zibina N.F. Polymeric contact equipment made of volumetric textile structures for heatmass-transfer apparatus/Bulletin of Saint Petersburg State University of Technologies and Design – 1998. – №2. – С. 120-127.
 15. Makoto Kunii, Kenji Kuroda, Kazuaki Yamagiwa, Akira Ohkawa. Performance Characteristics of Nozzle Foam-breakers Fitted to Tower Aerator / *Journal of chemical engineering of Japan* № 27(1), 1994, P. 129-132. <https://doi.org/10.1252/jcej.27.129>
 16. Jiasen Song, Caroline Hyndman, Rajesh K. Jakher, Kelly Hamilton. Fundamentals of Hydrodynamics and Mass Transfer in a Three-Phase Fluidized Bed System /*Chemical Engineering Science* 54(21), 1999, P. 4967-4973. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(99\)00219-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(99)00219-5)
 17. Jiasen Song, Caroline Hyndman, Apostolos Kantzas. Effect of Particle Tethering and Scale-up on Solid-Liquid Mass Transfer in Three-Phase Fluidized Beds of Light Particles /*The Canadian Journal of Chemical Engineering* №79(4), 2001, P. 557-563. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450790413>

References (transliterated)

1. N. Pavlenko, N. I. Pecherkin, V. E. Zhukov, G. Meski, and P. Houghton, "Overview of methods to control the liquid distribution

- in distillation columns with structured packing: Improving separation efficiency,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 132, p. 110092, Oct. 2020.
2. J. Zbytovsky, T. Sommer, M. Zapletal, and J. Trejbal, "Comparison of various column packing materials efficiency for hydrocarbons and aqueous mixtures." *Chemical and biochemical engineering quarterly*, vol. 33, no. 2, pp. 183-190, 2019.
 3. D. C. Perry. Gas absorption and reaction in a wet pneumatic foam//D. C. Perry. P. Stevenson//*Chemical Engineering Science*. – 2015. – Volume 126. – P. 177-185 – <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.11.037>
 4. S. Wang, S. Wang, B. Wu, Y. Lu, K. Zhang, H. Chen, "Effect of packing structure on anisotropic effective thermal conductivity of thin ceramic pebble bed", *Nuclear Engineering and Technology*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.01.013>
 5. R. Clavier, N. Chikhi, F. Fichot, M. Quintard, "Modeling of inertial multi-phase flows through high permeability porous media: friction closure laws," *Int. J. Multiphas. Flow* 91 pp. 243-261., 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.02.003>.
 6. M. Fourati, V. Roig, and L. Raynal, "Experimental study of liquid spreading in structured packings," *Chemical Engineering Science*, vol. 80, pp. 1–15, Oct. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.05.031>
 7. Kuznecov P. V., *Struktururne parmetyry pennogo sloya na melkodyrchatykh protivotochnykh reshetkah so stabilizatorom //Skh-dno evropejskije zhurnal peredovihe tekhnologiy. – Harkviv: Tekhnologichnij centr, 2004. – №4(10) – s. 84-88*
 8. O. K. Rahmonov. Study of the process of deposition of fine particles in the apparatus with a movable nozzle / *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 2017, №2. <https://doi.org/10.20534/AJT-17-11.12-78-81>
 9. 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, <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2018.16.25>.*
 10. Arakelyan V. B., Danko V. P., Grigoryan R. P. Influence of the external noise intensity on the kinetics of ligands binding to receptors. Influence of the external noise intensity on the kinetics of ligands binding to receptors. *Journal of Contemporary Physics*. 2017, Vol. 52, no. 1. <https://doi.org/10.3103/S106833721701011X>
 11. Shestova T. D., Markvart A. S., Lozovsky T. L., Zhelezny V. P. Cubical equations of state for predicting the phase equilibria of poorly studied substances. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2013, Vol. 87, No. 6, P. 883. <https://doi.org/10.1134/S0036024413060253>
 12. Valueva E. P., Purdin M. S. Hydrodynamics and heat exchange of the pulsing laminar stream in channels. *Teplotenergetika*. 2015, No. 9, P. 24. DOI:10.1134/S0040601515090116
 13. Moiseev V., Liaposhchenko O., Manoilo E., Khukhryansky O. Demianenko M. Hydrodynamic Parameters of a Combined Contact Device. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. — Springer, 2021. — P.257-267. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_26
 14. Vitovskaya R.F., Zibina N.F. Polymeric contact equipment made of volumetric textile structures for heatmass-transfer apparatus/*Bulletin of Saint Petersburg State University of Technologies and Design – 1998. – №2. – C. 120-127.*
 15. Makoto Kunii, Kenji Kuroda, Kazuaki Yamagiwa, Akira Ohkawa. Performance Characteristics of Nozzle Foam-breakers Fitted to Tower Aerator / *Journal of chemical engineering of Japan* № 27(1), 1994, P. 129-132. <https://doi.org/10.1252/jcej.27.129>
 16. Jiasen Song, Caroline Hyndman, Rajesh K. Jakher, Kelly Hamilton. Fundamentals of Hydrodynamics and Mass Transfer in a Three-Phase Fluidized Bed System /*Chemical Engineering Science* 54(21), 1999, P. 4967-4973. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(99\)00219-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(99)00219-5)
 17. Jiasen Song, Caroline Hyndman, Apostolos Kantzas. Effect of Particle Tethering and Scale-up on Solid-Liquid Mass Transfer in Three-Phase Fluidized Beds of Light Particles /*The Canadian Journal of Chemical Engineering* №79(4), 2001, P. 557-563. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450790413>

Надійшла (received) 31.03.2023

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Моїсєєв Віктор Федорович (Viktor Moiseev) – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3217-1467>; e-mail: vmoiseev1209@gmail.com.

Манойло Євгенія Володимирівна (Evgeniya Manoilo) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3666-5066>; e-mail: bublikova1@gmail.com.

Манойло Юрій Олександрович (Yurij Manoilo) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-5223-7795>; e-mail: fassto@gmail.com

Репко Каліф Юрійович (Kalif Repko) – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9244-2660>; e-mail: kehaneko@gmail.com

Жуга Олег Олексійович (Oleg Zhuha) – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-9748-9129>; e-mail: ozhuga@ukr.net

Давидов Денис Валерійович (Denis Davydov) – студент кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0712-0358>; e-mail: den2013000@gmail.com