

### АБСОРБЦІЯ ДОБРЕ РОЗЧИННИХ ГАЗІВ В АПАРАТАХ З ПРОВАЛЬНИМИ ТАРИЛКАМИ ВЕЛИКИХ ОТВОРІВ

**Л. Л. Гурець**

Сумський державний університет

вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007, Україна. E-mail: lgurets@bk.ru

Захист атмосфери від забруднення викидами промислових підприємств ставить задачу вибору газоочисного обладнання, яке характеризується високою продуктивністю та ефективністю очищення, дозволяє здійснювати комплексне очищення повітря. Одним з видів високоєфективного газоочисного обладнання є абсорбери з провальними тарілками великих отворів, які дозволяють працювати з великими об'ємами відхідних газів. Інтенсивний гідродинамічний режим апаратів сприяє подрібненню рідкої фази і підвищує ефективність очищення газів. При абсорбції добре розчинних газів лімітуючою стадією процесу масопередачі є швидкість масовіддачі в газовій фазі. Використання гідродинамічної аналогії між масопередачею та тертям для опису масовіддачі при обтіканні газовим потоком крапель рідини дозволило отримати вирази для визначення коефіцієнту масовіддачі в газовій фазі при різних гідродинамічних режимах, що враховують характеристики газового потоку та абсорбента.

**Ключові слова:** відхідні гази, абсорбція, краплі, масовіддача

### АБСОРБЦІЯ ХОРОШО РАСТВОРИМЫХ ГАЗОВ В АППАРАТАХ С КРУПНОДЫРЧАТЫМИ ПРОВАЛЬНЫМИ ТАРЕЛКАМИ

**Л. Л. Гурец**

Сумский государственный университет

ул. Римского-Корсакова, 2, г. Сумы, 40007, Украина, E-mail: lgurets@bk.ru

Защита атмосферы от загрязнения отходящими газами промышленных предприятий ставит задачу выбора газоочистного оборудования, характеризующегося высокой производительностью и эффективностью очистки, позволяющего осуществлять комплексную очистку воздуха. Одним из видов высокоэффективного газоочистного оборудования является абсорберы с провальными тарелками больших отверстий, которые позволяют работать с большими объемами отходящих газов. Интенсивный гидродинамический режим аппаратов способствует измельчению жидкой фазы и повышает эффективность очистки газов. При абсорбции хорошо растворимых газов лимитирующей стадией процесса массопередачи является скорость массоотдачи в газовой фазе. Использование гидродинамической аналогии между массопередачей и трением для описания массоотдачи при обтекании газовым потоком капель жидкости позволило получить выражения для определения коэффициента массоотдачи в газовой фазе при различных гидродинамических режимах, учитывающие характеристики газового потока и абсорбента.

**Ключевые слова:** отходящие газы, абсорбция, капли, массоотдача

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Екологічна ситуація в Україні формувалася на протязі тривалого періоду і пов'язана з високою концентрацією ресурсовмісних та енергоємних технологій. В результаті це призвело до деградації довкілля, що негативно впливає на демографічну ситуацію в Україні. Важливою проблемою розвитку сучасного суспільства є збільшення забруднення атмосфери, оскільки недостатнє очищення відхідних газів приводить до регіонального та глобального забруднення довкілля. Екологічний стан стрімко погіршується внаслідок запилення та потрапляння в повітря населених пунктів шкідливих хімічних сполук. Серед основних причин подібної тенденції – високий рівень зношеності основних засобів, який різко підвищує рівень реальної та потенційної техногенної небезпеки населенню України. На сьогодні знос основних виробничих фондів більшості галузей народного господарства України становить у середньому 50 % , причому темпи оновлення фондів не відповідають темпам їх зносу. Низьким залишається рівень застосування інноваційних, ресурсозберігаючих та природоохоронних технологій.

Це призвело до того , що обсяги викидів шкідли-

вих речовин в атмосферу зростають. Протягом 2011 року викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря здійснювали близько 8,7 тис. промислових підприємств. Від них в атмосферу надійшло понад 4,37 млн. т забруднюючих речовин , що на 5,9 відсотків більше, ніж у 2010 році [1].

Через недосконалість технологічних процесів та обладнання діючих підприємств в атмосферу надходять гази, що містять різні за токсичністю газоподібні компоненти , пари органічних рідин , дрібнодисперсні краплі і тверді частинки. Ще одна причина низької ефективності роботи газоочисного обладнання – великий діапазон забруднюючих речовин, які підлягають очищенню. Відхідні гази промислових підприємств часто містять разом з газовидними забруднювачами тверді частинки, що негативно впливає на роботу існуючого обладнання та утруднює вибір газоочисного обладнання. Отже виникає проблема підвищення ефективності роботи очисного обладнання шляхом модернізації існуючого та розробки нових видів газоочисних апаратів [2, 3].

Одним із видів обладнання, що ефективно працює з забрудненими потоками є абсорбери з провальними тарілками великих отворів. Застосування

## Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

контактних елементів з великими отворами дозволяє збільшити ефективність та продуктивність газоочисних апаратів [4]. Інтенсивний гідродинамічний режим, який спостерігається в апаратах з провальними тарілками великих отворів, буде сприятливо впливати на процеси масопередачі в абсорбційному обладнанні за рахунок зниження опору як в газовій так і в рідкій фазі.

Одержання залежностей для опису процесів масовіддачі дозволяє вибрати режимні та конструктивні параметри роботи апаратів, при яких досягається максимальна ефективність газоочищення, що і визначило актуальність даної роботи.

## МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

При абсорбційному очищенні малокоцентрованих та багатокомпонентних газів великий вплив на протікання процесу має вибір абсорбенту. Аналіз відомих способів очищення багатокомпонентних газів показує, що при виборі абсорбентів необхідно враховувати наступні основні вимоги:

- абсорбенти повинні мати достатню ємність по відношенню до забруднювачів;
- відпрацьований абсорбент, який містить цінні речовини в рідкому та твердому вигляді, повинен повертатись в технологічний процес або надходити на переробку;
- відходи, які утворюються в процесі очищення багатокомпонентних газів, не повинні бути новими джерелами забруднення навколишнього середовища.

При однакових умовах проведення процесу вибір газоочисного обладнання, здатного проводити процес в інтенсивному гідродинамічному режимі, також сприяє підвищенню ефективності очищення.

Перевагами колонних апаратів пінного типу з провальними тарілками великих отворів (30 – 150 мм) та вільним перетином більшим ніж 30% є простота та надійність конструкції, розвинута поверхня контакту фаз, велика одинична потужність, високий гідродинамічний к.к.д.; стабільна робота при наявності в газових викидах твердих частинок, липких та смолистих речовин; широкий діапазон стійкої роботи при високій ефективності. Конструкція провальних тарілок з отворами великих діаметрів проста, вони можуть монтуватися й демонтуватися без розбирання колонного обладнання (їх секції легко виймаються через люки). На плато тарілок легко наноситься антикорозійне покриття, що подовжує строк їх експлуатації й зменшує адгезію відкладень до поверхні тарілки. Найбільша ефективність очищення газів в апаратах даного типу досягається при проведенні процесу очищення в турбулентному режимі при швидкостях газу 3,0 – 3,5 м/с.

Дослідження гідродинаміки [5] апаратів з провальними тарілками великих отворів дозволили виявити гідродинамічні режими роботи апарату.

В першому режимі при швидкостях до 1,8 м/с спостерігається суцільний провал рідини через отвір тарілки. Рідина в апараті знаходиться у вигляді струменів, плівок, крапель. При швидкості газу 1,8 – 2,1 м/с в режимі первинного піноутворення спостерігаються прориви газового потоку через центральну частину отвору у вигляді фонтануючих струме-

нів, при цьому бризковиніс практично відсутній. З подальшим підвищенням швидкості газу до 2,5 м/с на обраній тарілці спостерігається нестабільний турбулізований шар піни і злив рідини з тарілки, що носить невпорядкований характер (переважно це периферійна зона перетину отворів), збільшується кількість фонтануючих проривів та бризковиніс.

Зі збільшенням швидкості газу в апараті (2,5 - 3,5 м/с) спостерігається розвинута вихрова взаємодія фаз внаслідок утворення тороїдального вихору при розпаді пухиря в зоні пінного шару над отворами тарілки. Під час відриву від краю отвору такий вихор розпадається внаслідок нестійкості форми та зменшення сил поверхневого натягу і утворює менші вихрові потоки та ряд дрібних, стійких пухирів. Саме в процесі подрібнення пухиря і утворення системи пухирів та вихрових потоків відбувається передача коливального імпульсу на отвір тарілки, що призводить до пульсаційної зміни тиску в просторі під тарілкою. Рідина в об'ємі апарату знаходиться переважно у вигляді плівок та крапель.

Інтенсивний турбулентний режим роботи апарату приводить до максимальності ефективності очищення, тому гідродинамічний режим при швидкостях газу 2,5-3,5 м/с вибраний як робочий.

Відомо [6, 7], що при великих швидкостях газу основним механізмом утворення крапель є подрібнення рідини струменями газу. При цьому в апаратах з провальними тарілками великих отворів в робочому режимі спостерігаються наступні стадії утворення та руху крапель:

1. Диспергування рідини газовим потоком в отворах тарілки. При цьому в апараті утворюється висхідний газорідинний потік, що розпадається по мірі віддалення від поверхні тарілки.

2. Частина крапель по мірі розпаду струменя та зниження дійсної швидкості газу в шарі, опускається на тарілку, а інша частина разом з газовим потоком піднімається до верхнього рівня газорідинного шару та виноситься з апарату.

Втрати рідини будуть залежати від розподілу крапель за розміром, обмеженим діаметром витання крапель  $d_v$ . Всі краплі з діаметром  $< d_v$  будуть винесені газом з апарату.

При русі крапель в турбулентному потоці газу буде відбуватись їх укрупнення та подрібнення. Процес подрібнення крапель відбувається за рахунок енергії турбулентних пульсацій, масштаб яких дорівнює діаметру краплі та визначається відношенням сил інерції та сил поверхневого натягу на границі поділу фаз. Подрібнення крапель дисперсної фази відбувається при числі  $We_k > 12$ .

При уловленні добре розчинних газів швидкість масопередачі лімітується швидкістю масовіддачі в газовій фазі. Тому для визначення залежності ефективності газоочищення від конструктивних та режимних параметрів проведення процесу знайдемо вираз для визначення коефіцієнта масовіддачі в газовій фазі.

Літературні дані свідчать про функціональний зв'язок між гідравлічним опором газорідинного шару та ефективністю масовіддачі в газовій фазі, що

**Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування**

показує, що оцінка ефективності апарата може базуватись на використанні гідродинамічної аналогії між масопередачею та тертям.

Спільний розв'язок диференціальних рівнянь передачі маси та кількості руху приводить до відомої аналогії Рейнольдса

$$St' = \frac{\beta}{w} = \frac{\xi}{8}, \quad (1)$$

де  $St'$  - дифузійне число Стентона;  $\beta$  - коефіцієнт масопередачі в суцільній фазі;  $\xi$  - коефіцієнт опору тертя;  $\xi/8$  - фактор масовіддачі.

Цей вираз справедливий для ядра турбулентної фази, однак в прикордонному шарі вплив коефіцієнта молекулярної дифузії значний. Тому для урахування явищ на границі розділу фаз в рівняння (1) вводять число Шмідта  $Sc$ , яке характеризується в даному випадку закон затухання турбулентних пульсацій на границі розділу фаз. З урахуванням числа Шмідта  $Sc$  рівняння (1) приймає вигляд

$$St' \cdot Sc^{0.5} = \frac{\xi}{8}. \quad (2)$$

Число Стентона можна виразити через числа  $Sh$ ,  $Re$ ,  $Sc$

$$St' = \frac{Sh}{Re \cdot Sc}. \quad (3)$$

Проводячи спільне перетворення рівнянь (2) та (3) отримуємо вираз

$$Sh = \frac{\xi}{8} \cdot Re \cdot Sc^{0.5}. \quad (4)$$

Наведений вираз свідчить про те, що при визначенні ефективності масовіддачі потрібно використовувати не значення загального перепаду тиску, а тільки опір тертя, який характеризує перенос кількості руху та маси.

Так як закономірності обтікання одиначної краплі та комплексу крапель, які утворюють газорідний шар однакові, то критеріальне рівняння (4) з урахуванням стиснутого потоку частинок дисперсної фази представимо у вигляді

$$\frac{\beta_g \cdot d_k}{D_g} = \frac{\xi_k}{8} \cdot \frac{w_k \cdot d_k}{\varphi \cdot v_g} \cdot \left( \frac{v_g}{D_g} \right)^{0.5}, \quad (5)$$

де  $w_k$  - швидкість руху крапель, м/с;  $d_k$  - діаметр крапель, м;  $\varphi$  - газоміст;  $v_g$  - кінематична в'язкість газу, м<sup>2</sup>/с;  $D_g$  - коефіцієнт дифузії газу, м<sup>2</sup>/с.

Коефіцієнт опору руху крапель  $\xi_k$  в потоці газу розраховується за виразом [8], який враховує форму та розмір частинок, а також фізичні параметри системи

$$\xi_k = \frac{13\hat{O}^2}{Re_k^{0.5}}. \quad (6)$$

Коефіцієнт форми  $\hat{O}$  розраховується за рівнянням

$$\hat{O} = K \cdot We_k^{1/5}. \quad (7)$$

Коефіцієнт  $K$  в рівнянні (7) залежить від режиму обтікання крапель:

при  $Re_k > 800$   $K = 1,1$ ;

при  $100 < Re_k \leq 800$   $K = 5,5 \cdot Re_k^{-0,25}$ .

Перетворюючи вираз (5) з урахуванням (6) отримуємо:

при  $Re_k > 800$

$$Sh = A \cdot Re_k^{0.5} We_k^{0.4} \cdot Sc^{0.5}; \quad (8)$$

при  $100 < Re_k \leq 800$

$$Sh = \hat{A} We_k^{0.4} \cdot Sc^{0.5}. \quad (9)$$

У виразах (8) та (9) число Вебера визначається наступним чином:

$$We_k = \frac{w_k^2 \cdot \rho_g \cdot d_k}{\varphi^2 \cdot \sigma},$$

де  $\sigma$  - поверхневий натяг, Н/м.

Із критеріальних рівнянь (8) і (9) отримуємо залежність для розрахунку  $\beta_g$ :

при  $Re_k > 800$

$$\beta_g = \hat{A} \frac{w_k^{1.3} \cdot \rho_g \cdot D_g^{0.5}}{\varphi^{1.3} \cdot \sigma^{0.4} \cdot d_k^{0.1}}; \quad (10)$$

при  $100 < Re_k \leq 800$

$$\beta_g = \hat{A} \frac{w_k^{0.8} \cdot \rho_g^{0.4} \cdot v_g^{0.5} \cdot D_g^{0.5}}{\varphi^{0.8} \cdot \sigma^{0.4} \cdot d_k^{0.6}}. \quad (11)$$

Обробка експериментальних даних дозволила визначити коефіцієнти  $\hat{A} = 35,8$  та  $\hat{A} = 895$ .

Вивчення залежності коефіцієнта масовіддачі в газовій фазі  $\beta_g$  від діаметра отворів  $d_o$  (рис.1) показало, що збільшення  $d_o$  до 0,06 м приводить до значного підвищення  $\beta_g$ . При цьому кількість рідини, яка утримується на тарілці, та гідравлічний опір тарілки ростуть більш інтенсивно. Тобто зі збільшенням  $d_o$  енергетичний параметр  $(\Delta P/\beta_g)$  підвищується.

При збільшенні кількості рідини на тарілці росте шар суцільної рідини на тарілці, зменшується газоміст  $\varphi$  і, відповідно, росте дійсна швидкість газу в газорідному шарі. Подальший ріст  $d_o$  та кількості рідини на тарілці призводить до деякого зменшення  $\beta_g$ . Це пояснюється збільшенням діаметра крапель  $d_k$ , і, відповідно зменшенням фактору масовіддачі  $\xi/8$ .

Аналіз експериментальних даних показав (рис.1), що найбільший вплив на величину  $\beta_g$  чинить швидкість газу.

**ВИСНОВКИ.** Проведені дослідження дозволили отримати вираз для визначення коефіцієнта масовіддачі в газовій фазі та виявити, що основним фак-

Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

тором, який приводить до інтенсифікації процесу масовіддачі в газовій фазі на провальних тарілках великих отворів, є швидкість газу.

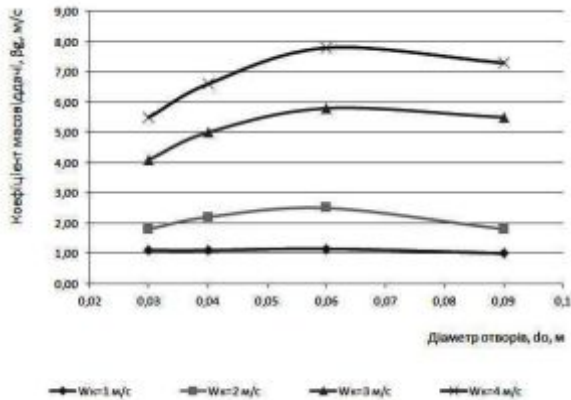


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнта масовіддачі в газовій фазі від діаметра отворів при густині зрошення  $L=5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год}$  та вільному перетині тарілки  $S_o = \text{м}^2/\text{м}^2$

ЛІТЕРАТУРА

1. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2011 році. – К. : Міністерство екології та природних ресурсів України, LAT & K. – 2012. – 258 с.

ABSORPTION SOLUBLE GASES IN DEVISE WITH LARGE-HOLE SIEVE TRAYS

L. Gurets

Sumy State University

vul. Rimsky-Korsakov, 2, Sumy, 40007, Ukraine, E-mail: lgurets@bk.ru

Protection of the atmosphere from pollution flue gas industry makes the task of choosing abatement equipment, characterized by high performance and efficiency of cleaning, which allows to carry out a comprehensive clean air. One kind of highly efficient gas cleaning equipment is absorber with large-hole sieve trays that allow you to work with large volumes of exhaust gases. The intense hydrodynamic mode apparatus serves for fragmentation the liquid phase and increases the efficiency of gas cleaning. With absorption of soluble gases limiting stage of the process are speed mass transfer in the gas phase. Using hydrodynamic analogy to describe the mass transfer in gas flow that flowing around liquid drops allow to obtain expressions for determination of coefficient mass transfer in the gas phase in different hydrodynamic modes, taking into account the characteristics of the gas flow and absorbent. Found that the main factor that leads to the intensification of mass transfer in the gas phase is the gas velocity.

**Keywords:** exhaust gases, absorption, drop, mass transfer

REFERENCES

1. *Natsionalna dopovid pro stan navkolichnjogo prirodnogo seredovicha v Ukraini u 2011 rotci* [National Report on the State of Environment in Ukraine in 2011], LAT & K, Kyiv, Ukraine

2. Tarat, E.Ja. (1975), *Intensivnie kolonnie apparati dlja obrabotki gazov zhjldkostjami* [Intense column equipment for processing gas liquids], Leningragskij university, Leningrad, Russia.

3. Ladigitchev, M.G. and Berner, G.Ja.(2004), *Zarubezhoe I otchestvennoe oborudovanie dlja otchistki gazov:Spravotchnoe izdanie* [Foreign and domestic equipment for gas purification: Reference Edition],Teplotechnik, Moscow, Russia.

4. Tovazhnjanskij, L.L., Moiseev, B.F., Bajratchnij, V. P. and Chaporev, V.P. (2003), *Intensivnie apparati so stabilizirovannim sloem peni dlja otchistki othodjachih gazov* [Intense devices with a stabilized layer of foam for cleaning exhaust gases], National

2. *Intensivnye kolonnie apparaty dlja obrabotki gazov zhjldkostjami.* / Под общей редакцией проф. Э.Я.Тарата. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1975. – 239 с.

3. Ладыгичев М.Г., Бернер Г.Я. *Зарубежное и отечественное оборудование для очистки газов: Справочное издание.* – М.: Теплотехник, 2004.–696 с.

4. Товажнянский Л.Л., Моисеев В.Ф., Байрачный В.П., Шаповров В.П. *Intensivnye apparaty so stabilizirovannym sloem peny dlja otchistki othodjachih gazov: [монография].* – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 228 с.

5. Пляцук Л.Д., Гурець Л.Л., Козій І.С. *Експериментальні дослідження гідродинаміки провальних тарілок великих отворів // Вісник СумДУ.* - Суми: СумДУ, 2009. - №1. – С.61-66.

6. Кутателадзе С.С. Старикович М.А. *Гидродинамика газожидкостных систем.* – М.: Энергия, 1976. - 296 с.

7. Уоллис Г. *Одномерные двухфазные течения.* Перев. с англ. под ред. И.Т. Аладьева – М.: Мир, 1972. – 440 с.

8. Балабеков О.С., Топалов Т., Мусин Н.А. *К гидродинамическому моделированию газожидкостных реакторов // Материалы XII Всесоюзной конференции по технологии неорганических веществ.* Т2, Чимкент, 1981, с. 550-553.

Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine.

5. Pljatsuk, L.D., Gurets, L.L. and Kozij, I.S. (2009), “Experimental studies of hydrodynamics device with large-hole sieve trays”, *Transactions of Sumy State University*, vol.1, pp. 61-66.

6. Kutateladze, S.S. and Staricovitch, M.A. (1976), *Gidrodinamika gazozhdkostnih sistem* [Hydrodynamics of gas-liquid systems], Energiya, Moscow, Russia.

7. Wallis, G. (1972), *Odnomernie dvuhfaznie tehnienija* [One-dimensional two-phase flow], Translated by Aladiev, I.T., Mir, Moscow, Russia.

8. Balabekov, O.S., Topalov, T.and Musin, N.A. (1981), “Hydrodynamic modeling of gas-liquid reactors”, *Materiali XII Vsesozuznoj konferentsii po tehnologii neorganitheskikh vecthctv* [Proceedings of XII All-Union Conference on the technology of inorganic substances], Vol.2, Shymkent, 1981, p.p. 550-553.

