

УДК 66.074:661

Бабенко В.М., Лаврова І.О.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ ГАЗОРІДИННОЇ СИСТЕМИ КОЛОННОГО АПАРАТУ ЗІ СТАБІЛІЗАТОРОМ ПІННОГО ШАРУ**

Робота колонного апарату залежить від великої кількості параметрів, але одним з основних показників гідродинамічних режимів роботи пінних апаратів є висота піни  $H$ . Автори низки робіт [3, 4, 6–8] підкреслюють, що висота піни залежить, в основному, від швидкості газового потоку  $W_r$ .

**Актуальність роботи полягає в тому**, що введення в систему стабілізатора пінного шару сприяє зростанню діапазону навантажень по газу і, як наслідок, підвищенню надійності та ефективності системи в цілому, це особливо важлива обставина для тих процесів хімічної технології, де можливі перемінні навантаження по газу.

Від висоти пінного шару залежать конструктивні параметри апарату, вона також характеризує ступінь розвиненості поверхні контакту фаз. Проте, крім висоти, важливою є однорідність шару, що утворюється з мінімальними витратами енергії. Не менш важливим чинником є газовміст. Як відзначають більшість авторів [2–8], на величину газовмісту ( $\varphi_r$ ) впливають швидкість газу в повному перетині апарата, густина зрощення й фізичні властивості рідини.

**Метою досліджень** було виявлення впливу цих параметрів на ефективність досліджуваного процесу. Крім того, як показав експеримент, внесення стабілізатора в шар піни змінює його газовміст. Це видно з рис. 1. Зміна газовмісту виявляється істотною при збільшенні швидкості газу до 2,5 м/с. Якщо при малій швидкості газу різниця газовмісту для апарата зі стабілізатором і без нього була біля 5–6 %, то при  $W_r = 2,5$  м/с ця різниця сягає 10 %, що досить істотно, якщо врахувати, що величина газовмісту при цій швидкості досягає значень 0,75. Існує думка, що збільшення газовмісту приводить до збільшення поверхні контакту фаз і до очевидного у зв'язку з цим збільшення ефективності роботи колонного устаткування. У певних межах це так, але було відзначено, що питома об'ємна поверхня контакту фаз [3,4], росте до швидкостей газу  $W_r = 2,0 - 2,2$  м/с, а потім зменшується.

Тому в цьому випадку стабілізатор пінного шару, стримуючи ріст газовмісту, дозволяє зрушити точку максимальної ефективності, на кривій  $\varphi_r = f(W_r)$ , збільшуючи геометричну поверхню контакту фаз і відіграючи позитивну роль. Це твердження справедливо для великих, більше 2,5 м/с, наведених швидкостей  $W_r$ , але після проведених експериментів виявилось вірним і при  $W_r = 0,7-1,5$  м/с.

Крім самого факту наявності стабілізатора, деякий вплив на розподіл газовмісту має його розташування в шарі по висоті. У нашому експерименті стабілізатор перебував на відстані 15 мм над тарілкою. Та частина пінного шару, де перебуває стабілізатор, ущільнюється. Це особливо помітно при збільшених, порівняно з робочими, витратах рідини.

На рис. 1 і 2 ми спостерігаємо, як змінюється газовміст в стабілізаторі пінного шару при різних навантаженнях. Видно, що у верхній частині стабілізатора при критично низьких навантаженнях по газу піни практично немає, проте вона ще спостерігається в нижній і середній частині стабілізаційного блоку.



Рисунок 1 – Лабораторний стенд із сітчастими ґратами і стабілізатором пінного шару DYNAMIX,  $W_r = 1,7$  м/с



Рисунок 2 – Лабораторний стенд із сітчастими ґратами і стабілізатором пінного шару DYNAMIX,  $W_r = 0,5$  м/с

В чарунках стабілізатору піна спостерігається навіть при провалі рідини на тарілки. Це можливо пояснити наявністю спіральних каналів, що примусово створюють бульбашки газу з діаметром, що дорівнює перетину самого каналу. Товщина плівки змоченої поверхні стабілізатора, по нашим вимірам, змінюється в інтервалі 1,5–2,5 мм і течія її, очевидно, спрямована назустріч газовому потоку, що веде до зміни структури шару, в тому числі і газомісту в пристінній зоні колонного апарату.

#### **Гідродинаміка сітчастих ґрат**

Гідродинаміка сітчастих та близьких до них за характеристиками провальних ґрат без стабілізатора піни досить повно досліджена у низці робіт вітчизняних та зарубіжних дослідників [1–8]. Встановлено, що основний вплив на гідродинаміку зрошуваних ґрат здійснюють швидкість газу у вільному перетині апарату  $W_r$ , вільний перетин ґрат  $S_0$  та густина зрошування  $L_0$ .

Зміна властивостей рідини і газу менш суттєво впливає на гідродинаміку ґрат [12–16]. Так, зміна в'язкості рідини з 0,1 до 2,3 Па·с, практично не впливає на  $H$ ,  $\Delta P$ ,  $\varphi_r$ .

$$\Delta P = \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_b} \right)^{0,1} \left( \frac{\mu_p}{\mu_b} \right)^{0,066} . \quad (1)$$

Оскільки в більшості технологічних процесів хімічних та нафтохімічних виробництв при абсорбції та очищенні газів  $\sigma_p, \mu_p, \rho_p$  незначно відрізняються від тих же параметрів для води, а  $\mu_t, \rho$ , відповідно для повітря, дослідження гідродинаміки ґрат із стабілізатором піни проводилося у моделюючій системі повітря – вода.

Очевидно, що мінімальний опір проходу газу буде при висоті рідини над отвором  $h_p$ , а гідравлічний напор, що визиває витікання рідини з отвору, визначається з рівняння:

$$W_{0p} = \mu_p \cdot \varphi_{0p} \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h} , \quad (2)$$

де  $W_0$  – швидкість рідини в отворі ґрат, м/с;  $\mu_p$  – коефіцієнт витрат через отвір.

Розв'язуючи рівняння (2), отримаємо:

$$\Delta h = \frac{1}{2g} \left( \frac{W_{0p}}{\mu_p \cdot \varphi_{0p}} \right)^2 . \quad (3)$$

Таким чином, витікання буде відбуватися при досягненні рівності:

$$(h_p + \Delta h) \cdot \rho_p \cdot g = \Delta P + \Delta h \cdot \rho_p \cdot g, \quad (4)$$

де  $\rho_p$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>,  $\Delta P$  – гідравлічний опір зрошуваних сітчастих ґрат, Па

Розподіл потоків на ґратах відбувається за умови витрат мінімуму енергії на здоладання гідравлічного опору ґрат газом, або на створення різниці рівнів на ґратах. Умову мінімуму втрат енергії зазвичай виражають у вигляді рівняння:

$$\frac{d}{d \cdot \varphi_{0p}} (W_{0g} \cdot \Delta P) = 0 . \quad (5)$$

Під час роботи ґрат в пінному режимі при зростанні  $W_g$  та незмінній густині зрошення повинна зрости частка перетину ґрат, що зайнята газом  $\varphi_{0g}$ , та знизитися частка перетину, зайнята рідиною, що стікає  $\varphi_{0p}$ .

Для протікання незмінної кількості рідини крізь ґрати повинна зростати швидкість витікання останньої. У свою чергу, швидкість витікання рідини може зростати тільки при зростанні  $\Delta h$ , тобто при зростанні гребінців хвиль на поверхні шару піни. Особливо помітним зростання  $\Delta h$  стає при хвильовому режимі роботи тарілки.

При визначенні нижньої межі роботи сітчастих ґрат без стабілізатора, отримане наступне рівняння:

$$W_{0g} \cdot 8,1 \cdot \left( \frac{B_{ш}}{L_0} \right)^{0,5} d_{тр}^{0,33} . \quad (6)$$

Автори інших робіт для визначення верхньої та нижньої меж режимів роботи сітчастих ґрат без стабілізатора використовують залежність:

$$Y = Ve^{4x};$$

$$Y = \frac{W_{\Gamma}}{g \cdot d_e \cdot S_0} \cdot \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_p} \left( \frac{\mu_p}{\mu_b} \right)^{0,16}; \quad (8)$$

$$X = \left( \frac{L}{G} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_p} \right)^{0,125},$$

де  $e$  – основа натурального логарифму;  $d_e$  – еквівалентний діаметр отвору;  $\mu_p$  – в'язкість рідини, Па·с;  $\mu_b$  – в'язкість води при 20 °С, Па·с;  $\rho_{\Gamma}$  – густина газу, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_p$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;  $L$  – вагова швидкість рідини, кг/ м<sup>2</sup>·год.;  $G$  – вагова швидкість газу, кг/ м<sup>2</sup>·год.;  $V$  – коефіцієнт пропорційності.

Для нижньої межі роботи рекомендується значення  $V = 4$ , для верхньої  $V = 16$ .

Вплив властивостей рідини та газу на  $W_{\Gamma,кр.}$  ілюструють залежності (2–6), якими в тому чи іншому вигляді користуються дослідники [11,15].

Очевидно, що значно впливає на величину  $W_{\Gamma,кр.}$  відношення  $\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_p}$ .

Відомо, що для початку роботи ґрат на них необхідно створити певний запас рідини. Встановлено, що сітчасті ґрати мають досить велику провалуючу спроможність. Тому для початку роботи сітчастих ґрат необхідно створити велике навантаження по газу і рідині. При певних значеннях вільного перетину ґрат необхідно створити необхідну густину зрошення, а піноутворення розпочинається тільки при досягненні певної швидкості газу в повному перетині апарату. Мінімальну швидкість газу, при якій на ґратах починає утворюватися пінний шар, назовемо критичною швидкістю  $W_{\Gamma,кр.}$ . Результати дослідів показали, що при постійній густині зрошення для початку роботи ґрат необхідна тим більша швидкість, чим більше вільний перетин ґрат. На рис. 1 чітко видно наявність пінного шару як під, так і над стабілізатором піни, тобто  $W_{\Gamma,кр.}$  вже пройдена.

На рис. 2 спостерігається стан, коли  $W_{\Gamma,кр.}$  вже досягнута, але густина зрошення недостатня для створення ефективної висоти пінного шару.

Саме для такого випадку необхідний розроблений нами стабілізатор шару піни. З рис. 2 видно, що протиточні ґрати із стабілізатором починають ефективно працювати при суттєво менших значеннях  $W_{\Gamma,кр.}$ , ніж ґрати без стабілізатора. Крім того, протиточні сітчасті ґрати без стабілізатора не працюють при густині зрошення менше 3 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·год., тоді як ґрати із стабілізатором стабільно працюють при густині зрошення 0,6 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·год.

Залежність  $W_{\Gamma,кр.}$  від діаметра отворів, отримана експериментальним шляхом повною мірою кореспондується із даними вітчизняних та зарубіжних дослідників [1,2]. Математична обробка даних дала залежність:

$$W_{\Gamma,кр.} = 372S_0^{3,0} \cdot L_0^{0,3}. \quad (9)$$

Відхилення дослідних даних  $W_r$ кр. від розрахованих складає  $\pm 10\%$ . Порівняння режимів роботи зі стабілізаторами та без них показало, що їх використання значно розширює діапазон сталої роботи сітчастих ґрат в пінних апаратах. Особливе значення ця обставина приймає при обробці технологічних газів від сушарок, реакторів та інших видів обладнання, кількість видалених газів від яких може коливатися в широких межах в залежності від потреб технології.

#### **Гідравлічний опір сітчастих ґрат**

Як відмічалось вище, на гідродинаміку зрошуваних ґрат головним чином впливають швидкість газу в повному перетині апарату, густина зрошування та вільний перетин ґрат. Проведені нами дослідження висоти пінного шару та висоти вихідного шару рідини на сітчастих ґратах зі стабілізатором піни підтвердили вагомий вплив  $W_r, S_0, L_0, d_{тр}$  на  $H, h_0$ . Враховуючи отримані залежності для  $H, h_0$ , а також дані інших авторів по розрахункам загального гідравлічного опору зрошуваних ґрат  $\Delta P$ , можна записати для системи повітря-вода:

$$\Delta P = f(W_r, L_0, S_0, d_{тр}). \quad (10)$$

Оскільки значення  $H, h_0$  в разі використання стабілізатора вище, ніж відповідні  $H, h_0$  без нього, закономірно припустити, що і гідравлічний опір ґрат із стабілізатором буде вище опору зрошуваних ґрат без стабілізатора.

Для гідравлічного опору ґрат із шаром піни  $\Delta P$  можна записати залежність:

$$\Delta P = \Delta P_{сг} + \Delta P_{\sigma} + \Delta P_{ш}, \quad (11)$$

де  $\Delta P_{сг}$  – гідравлічний опір сухих ґрат, Па;  $\Delta P_{\sigma}$  – гідравлічний опір, що виникає за рахунок сил поверхневого натягу при виході газу зі щілин, Па;  $\Delta P_{ш}$  – гідравлічний опір пінного шару.

#### **Гідравлічний опір сухих сітчастих ґрат**

Гідравлічний опір сухих ґрат є сумою наступних втрат тиску:

- витрати на стискання струменів при вході в отвори,
- витрати на тертя в отворах,
- витрати на розширення струменів при виході з отворів.

Гідравлічний опір сітчастих ґрат може бути виражений залежністю:

$$\Delta P_{сг} = f(Re_0, S_0). \quad (12)$$

В свою чергу:

$$Re = \frac{W_0 d_e}{v_r}, \quad (13)$$

$$d_e = 2B_{щ}, \quad (14)$$

$$W_0 = \frac{W_r}{S_0}, \quad (15)$$

де  $\Delta P_{cr}$  – гідравлічний опір сухих ґрат;  $Re$  – критерій Рейнольда, віднесений до швидкості газу в отворах ґрат;  $d_e$  – еквівалентний діаметр отвору, м;  $\nu_r$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості,  $m^2/s$ ;  $v_{щ}$  – ширина отвору в ґратах, м.

З (12) витікає, що на  $\Delta P_{cr}$  може впливати  $d_{тр}$ , оскільки при постійному вільному перетині ґрат ширина отвору може змінюватися, а в результаті буде перемінним  $Re_0$ . Опір сухих ґрат можна виразити формулою:

$$\Delta P_{cr} = \xi_{0г} \frac{\rho_r W_0^2}{2}, \quad (16)$$

де  $\rho_r$  – густина газу,  $kg/m^3$ ;  $\xi_{0г}$  – коефіцієнт місцевого опору, віднесений до швидкості газу в отворах ґрат.

В загальному випадку коефіцієнт місцевого опору залежить від критерію Рейнольда та величини вільного перетину ґрат. Вигляд залежності  $\xi_{0г} = f(Re_0)$  змінюється від характеру руху газу. При ламінарному режимі, коли  $\Delta P \approx W_r$

$$\xi_{0г} = \frac{C}{Re_0}, \quad (17)$$

де  $C$  – константа.

При турбулентному режимі, коли  $\Delta P \approx W_r^{1,75}$ ,

$$\xi_{0г} = \frac{C_1}{Re_0^{0,25}}. \quad (18)$$

І при режимі розвиненої турбулентності, що є автомодельним, коли  $\Delta P \approx W_0^2$ ,

$$\xi_{0г} = \frac{C_2}{Re_0}. \quad (19)$$

### **Висновки**

Як видно з формул (13–15) автомодельний режим в пінних апаратах наступає вже при  $W_r \geq 1,2$  м/с, тобто практично з початку пінного режиму.

Таким чином, можна зробити висновок, що при пінному режимі коефіцієнт місцевого опору  $\xi_{0г}$  не залежить від діаметру отворів при пропорційному змінненні всіх параметрів, тобто при незмінному  $S_0$ , та швидкості газу в щілинах ґрат.

### **Література**

1. Рамм В.М. Абсорбция газов М., «Химия» 1976, 460–467 с.
2. Александров И.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. Изд. 2-е. М., «Химия» 1971, 269 с.
3. Стабников В.Н. Ректификационные аппараты. М., «Машиностроение», 1995. 356 с.

4. Ректификационные и абсорбционные колонны с новыми конструкциями тарелок. М., ВНИИОЭНГ, 1996. 64 с.
5. Чехов О.С., Матрозов В.И. Труды МИХМ, 1997, вып. 15, с. 78–96.
6. Позин М.Е., Мухленов И.П. и др. Пенный способ обработки газов и жидкостей. Л., Госхимиздат, 1985. 248 с.
7. Позин М.Е., Мухленов И.Я., Тарат Э.Я. Пенные газоочистители, теплообменники и абсорберы. Л., Госхимиздат, 2002. 123 с.
8. Клапанные тарелки для массообменных аппаратов. М., Центр, ин-т. научно-техн. информ. и техн.-эконом, исслед. по хим. и нефт. машиностр., 1992. 40 с.
9. Norman W. S., Grocott G.I., Trans. Inst. Chem. Eng., 1991, v. 39, N 4, p. 305–312.
10. Hoppe /C., Chem. Ing. Techn., 1999, Bd. 39, N 11, S. 659–666.
11. Robin B.I., Brit. Chem. Eng., 2002, v. 4, N 6, p. 351–354.
12. Бляхер И.Г., Живайкин Л.Я. и др. Хим. пром., 1996, № 3, с. 178–181; 2000, № 9, с. 678–680.
13. Стабников В.Я., Николаев А.П. Труды Киев, технол. ин-та пищевой пром., 1990, вып. 22, с. 171–178.
14. Родионов А.И. Труды ХТИ им. Д. И. Менделеева, 1993, вып. 40, с. 66–69.
15. Аэров М.Э., Быстрова Т.А. и др. Хим. и технол. топлив и масел, 1999, № 1, с. 37–41.
16. Mailer H.M., Othmer D.F., Ind. Eng. Chem., 1999, v. 51, N 5, p. 625–632.

УДК 66.074:661

Бабенко В.Н., Лаврова И.О.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СИСТЕМЫ КОЛОННОГО АППАРАТА СО СТАБИЛИЗАТОРОМ ПЕННОГО СЛОЯ**

В статье рассмотрены вопросы, связанные с конструктивными особенностями колонных аппаратов, которые позволяют увеличить высоту пенного слоя на ситчатых решетках аппаратов, не увеличивая при этом ни нагрузку по жидкости, ни скорость газового потока. Разработанные нами технические решения позволяют получать хорошие показатели для широкого диапазона нагрузок по жидкости и газу. Описанные в статье методы расчета полностью подтверждают экспериментальные исследования и хорошо коррелируют с ранее проведенными исследованиями.

Babenko V.N., Lavrova I.O.

### **INVESTIGATION OF FEATURES OF GAS-LIQUID SYSTEMS COLUMNS WITH THE STABILIZER OF THE PEN LAYER**

The article deals with issues related to the design of the column apparatus, which allow to increase the height of the foam layer on sitchatyh lattices vehicles, without increasing the burden on any liquid or gas flow rate. Developed technical solutions allow us to obtain good performance for a wide range of loads of liquid and gas. Described in this article methods for calculating fully confirm the experimental studies and correlates well with previous studies.