

УДК 661.185

Дзевочко О.М., к. техн. н., доцент, Подустов М.О., д. техн. н., професор

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

ДОСЛІДЖЕННЯ ГОФРОВАНИХ НАСАДОЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В ПРОЦЕСАХ АБСОРБЦІЇ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ ВИРОБНИЦТВА ПАР

Ключові слова: гофрована насадка, абсорбційна колона, газоповітряний потік, гідравлічний опір, масопередача, енергоефективність.

Вступ. Очищення газоповітряного потоку від діоксиду сірки у виробництві поверхнево-активних речовин (ПАР) проводиться в абсорбційних колонах. В якості абсорбента використовується гідроксид натрію, як правило концентрації 10–15 % мас. В якості насадок використовуються кільця Рашига, блочні керамічні насадки [1, 2]. Ступінь очищення при цьому складає не більше 95 %. Такий ступінь очищення не задовольняє сучасним вимогам з екологічної безпеки. Крім того при використанні таких насадок абсорбційні колони мають значний гідравлічний опір, працюють при малих швидкостях газоповітряного потоку і громіздкі за розмірами [3, 4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основними характеристиками абсорбційних насадкових колон є гідравлічний опір насадки та об'ємний коефіцієнт масопередачі в колоні. Як правило гідравлічний опір визначається для сухої насадки, тобто при відсутності зрошування рідиною. Теоретично величину гідравлічного опору визначають по відповідному рівнянню Дарсі

$$\Delta P_{\text{сyx}} = \lambda \cdot \frac{H}{d_e} \cdot \frac{W_r^2 \cdot \rho_r}{2} = \lambda \cdot \frac{H \cdot a}{4\varepsilon^3} \cdot \frac{W_{\text{np}}^2 \cdot \rho_r}{2}, \quad (1)$$

де: λ – коефіцієнт опору насадки; H – висота шару насадки, м; d_e – еквівалентний діаметр, м; ρ_r – щільність газоповітряного потоку, кг/м³; W_r – дійсна швидкість газоповітряного потоку, м/с; W_{np} – приведена швидкість газоповітряного потоку, м/с; ε – вільний об'єм насадки, м³; a – питома поверхня насадки, м².

Коефіцієнт опору насадки λ є функцією критерію Рейнольдса Re_r

$$\text{при } Re_r < 80, \quad \lambda = \frac{400}{Re_r^{0,85}}; \quad (2)$$

$$\text{при } Re_r < 400, \quad \lambda = \frac{16,5}{Re_r^{0,2}}; \quad (3)$$

$$\text{при } 80 < Re_r < 400, \quad \lambda = \frac{70}{Re_r^{0,45}}; \quad (4)$$

$$\text{де } Re_r = \frac{W_r \cdot d_e \cdot \rho_r}{\mu_r} = \frac{W_{\text{np}} \cdot \rho_r}{\mu_r \cdot a}.$$

В залежності від числа Рейнольдса розрізняють п'ять режимів руху фаз у насадковій колоні: плівковий, проміжний, підвисання, барботажу, емульгування [5]. Гідродинамічний режим встановлюють за перепадом тиску в насадці.

Як зтверджують автори [6, 7] основними режимами в промислових колонах є плівковий та проміжний, і вони визначають оптимальну швидкість газоповітряного потоку.

У відповідності з теорією масопередачі [8] є різні засоби інтенсифікації процесу в насадкових колонах: за рахунок збільшення коефіцієнтів масопередачі, збільшення площі контакту фаз, підвищення рушійної сили процесу. Найбільш перспективним засобом інтенсифікації є збільшення площі контакту фаз, яку можна забезпечити за рахунок вибору оптимальної конструкції насадки. Інші засоби вимагають значних енергетичних витрат.

Дослідженню різних насадкових елементів приділяється значна увага. В останній час знайшли використання такі насадкові елементи: блочні насадки [9], енергозберігаючі насадки [10], насадки для тепло- і масообмінних процесів [11]. Вони можуть дозволити підвищити енергоефективність процесу очищення газоповітряного потоку від діоксиду сірки у виробництві ПАР. Однак даному питанню не приділено належної уваги.

Мета роботи. Метою роботи є експериментальні дослідження різних гофрованих насадкових елементів для їх подальшого використання у виробництві ПАР для підвищення енергоефективності та ступеня очищення.

Матеріали і методи досліджень. Дослідження проводилися на експериментальній установці, схема якої наведена на рис. 1.

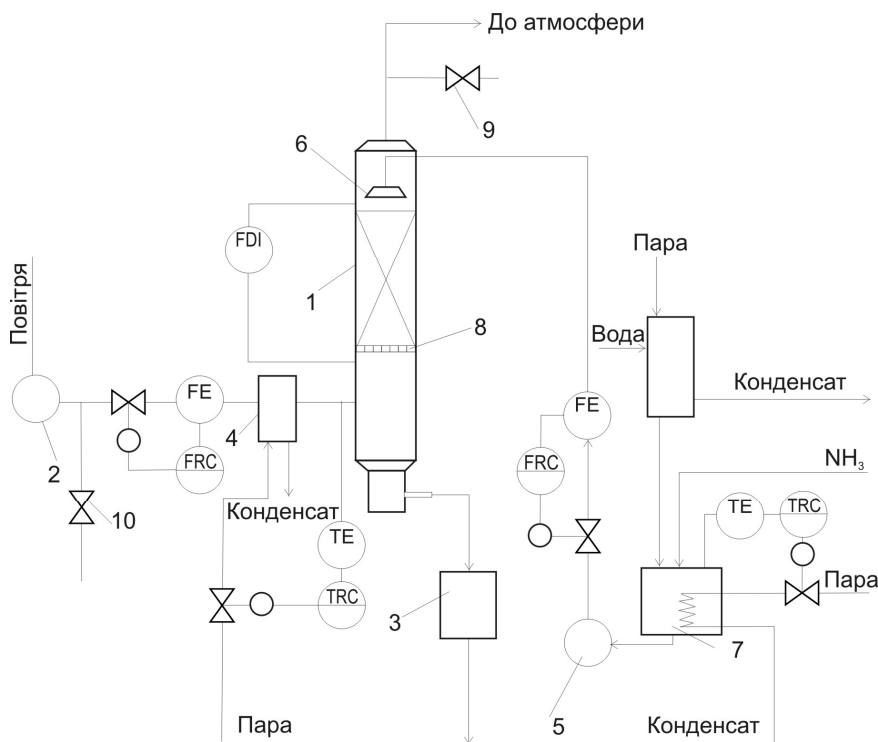


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки

Установка складалась з колони 1 діаметром 0,8 м, повітрядувки 2, двох ємностей 3 і 7 по 4,5 м³ кожна, насоса 5 для подачі води в колону через обладнання, що розбризкує 6. Для підтримки постійної температури розчину в ємності 7 передбачений її підігрів паром. Для підтримки постійної температури повітря використовувався теплообмінник 4. Установка була оснащена всіма необхідними вимірювальними пристроями. Клас точності приладів для виміру витрати становив $\pm 1,5\%$, вторинних приладів для виміру температури $\pm 1,0\%$. Навантаження по рідині становила від 0,003 до 0,009 м³/(м²×с). Швидкість повітря підтримували в межах 0,5–2,5 м/с, яка розраховувалася на повний перетин колони. Експериментально досліджувались три види насадок: ГН1 – з трикутними гофрами; ГН2 – з трапецеїдальними гофрами; ГН3 – з округлими поперековими ребрами. Ефективність насадок визначали в процесі десорбції аміаку з водного розчину повітрям. Відбір проб здійснювався за допомогою пробовідбірників 9 і 10.

Для зпівставлення були обрані кільця Рашига. Насадки укладалися на ґрати 8.

Основна частина. Виходячи з аналізу останніх досліджень і публікацій, в першу чергу, досліджувались залежності гідравлічного опору насадок від швидкості повітря.

На рис. 2 представлені залежності гідравлічного опору від швидкості повітря для сухої насадки

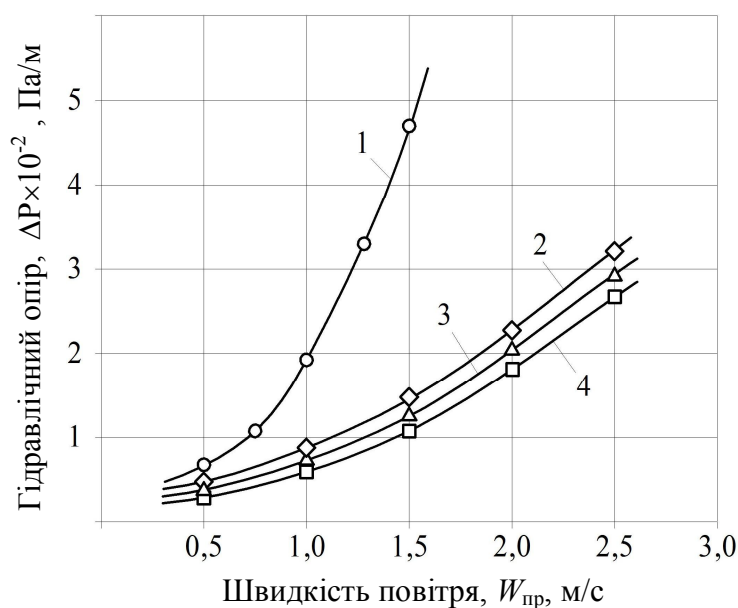


Рисунок 2 – Залежність гідравлічного опору насадок від швидкості повітря для сухої насадки.
Тип насадки: 1 – кільця Рашига; 2 – ГН1; 3 – ГН2; 4 – ГН3

Як видно з рисунка усі насадки стабільно працюють при $W_{пр} = 0,5$ м/с, однак при збільшенні $W_{пр}$ гідравлічний опір кільця Рашига значно підвищується. Так при $W_{пр} = 1,5$ м/с гідравлічний опір кільця Рашига дорівнює 480 Па/м, а, наприклад, насадки ГН3 – 120 Па/м.

Слід відзначити, що з 3-х гофрованих насадок кращі показники має насадка ГН3 з округлими поперековими ребрами.

При протитічному русі двох фаз через шар насадки її вільний обсяг зменшується порівняно з сухою насадкою за рахунок утворення плівки рідини. Тому гідравлічний опір зрошуваної насадки є функцією швидкості повітря і щільності зрошування.

На рис. 3 представлена залежність гідравлічного опору насадок від швидкості повітря при постійній швидкості зрошування

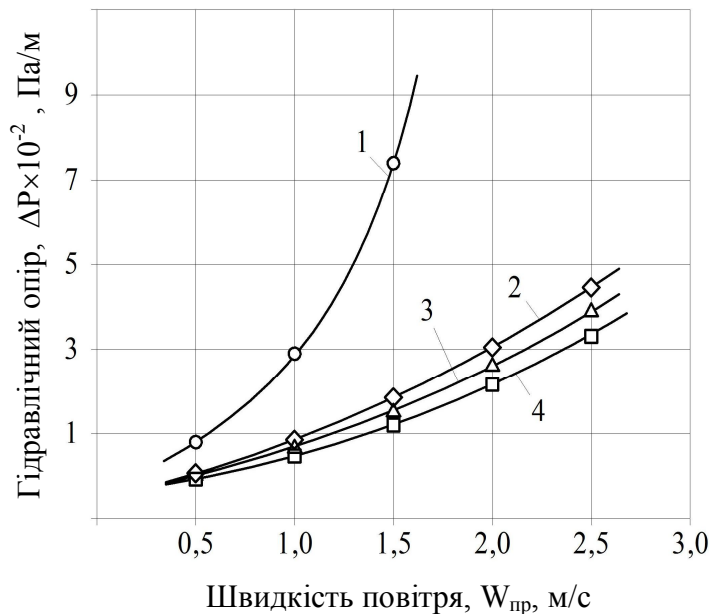


Рисунок 3 – Залежність гідравлічного опору насадок від швидкості повітря при постійній швидкості зрошування.

Тип насадки: 1 – кільця Рашига; 2 – ГН1; 3 – ГН2; 4 – ГН3.

Швидкість зрошування, $m^3/(m^2 \times c)$ – 0,006

Як видно з рис. 3 для усіх насадок збільшився гідравлічний опір. Однак для кільця Рашига це збільшення дорівнює наприклад при $W_{пр} = 1,5$ м/с на 140 Па/м, то для гофрованих насадок (наприклад ГН3) збільшення нижче 20 Па/м.

З рисунка також видно, що усі 3 гофровані насадки стабільно працюють при високих швидкостях повітря і кращою з них залишається насадка ГН3. Це можливо пояснити наступним:

- несуттєвим, але збільшенням вільного простору за рахунок наявності гофрів;
- у порівнянні з ГН1 та ГН2 у ГН3 відсутні гострі кромки на поверхні що унеможлиблює сколи та руйнування як окремих ділянок гофрів так і насадкового елементу вцілому;
- біль рівномірний розподіл плівки рідини при стіканні по плавній поверхні без відриву крапель.

Для подальших експериментів використовували насадку ГН3.

На рис. 4 наведені дані залежності гідравлічного опору насадок від швидкості повітря та щільності зрошування.

Отримані дані підтверджують теоретичні викладки, що при збільшенні щільності зрошування збільшуються і гідравлічний опір у всьому діапазоні швидкостей повітря.

Ефективність насадкових елементів по масопередачі визначали наступним чином.

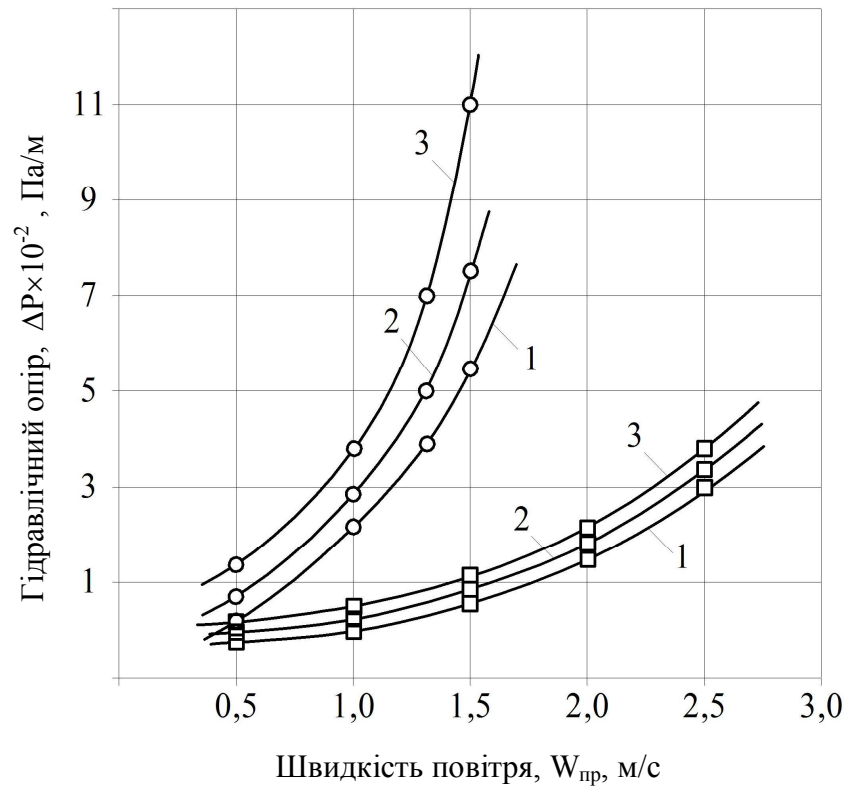


Рисунок 4 – Залежність гідравлічного опору насадок від швидкості повітря та щільності зрошування. Щільність зрошування, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \times \text{с})$: 1 – 0,003; 2 – 0,006; 3 – 0,009

Вміст аміаку в повітрі розраховували за рівнянням матеріального балансу

$$G_{\text{ж}} \cdot \Delta X = G_{\text{г}} \cdot \Delta Y, \quad (5)$$

де $G_{\text{ж}}$, $G_{\text{г}}$ – масові витрати рідкої і газової фаз, кг/с ;

$$\Delta X = X_1 - X_2, \quad (6)$$

де X_1 , X_2 – вміст аміаку в рідкій фазі до і після десорбції, кг/м^3 ;

$$\Delta Y = Y_1 - Y_2, \quad (7)$$

де Y_1 , Y_2 – вміст аміаку в газовій фазі до і після десорбції, кг/м^3 .

Рівноважний вміст аміаку в повітрі (Y^*) визначаємо з рівняння

$$Y^* = \frac{M_{\text{к}}}{M_{\text{н}}} \cdot \frac{P^*}{P - P^*}, \quad (8)$$

де $M_{\text{к}}$ – 17 та $M_{\text{н}}$ – 29 молекулярні маси аміаку і повітря; P – загальний тиск, Па; P^* – рівноважний парціальний тиск аміаку над його водним розчином, Па.

$$P^* = m \cdot X, \quad (9)$$

де X – вміст аміаку в рідкій фазі, кг/м³; m – константа Генрі.

$$\lg m = 9,343 - \frac{1922}{T}, \quad (10)$$

де T – температура, °К.

Число одиниць переносу в шарі насадки визначали за рівнянням

$$N_1 = \frac{1}{H} \cdot \frac{1}{1-S} \cdot \ln \frac{1-\psi}{1-\varphi}, \quad (11)$$

де H – висота шару насадки, м.

$$\varphi = \frac{Y_2 - Y_1}{Y^* - Y_1} \text{ – коефіцієнт насичення,}$$

$$\psi = \frac{X_1 - X_2}{X_1} \text{ – коефіцієнт відгону,}$$

$$S = \frac{\psi}{\varphi} \text{ – фактор відгону.}$$

Об'ємний коефіцієнт масопередачі

$$K_v = \frac{N_1 \cdot G_r}{F \cdot H}, \quad (12)$$

де F – площа перетину десорбера, м²; G_r – масова витрата газоповітряного потоку, кг/с.

Для переходу від газорідної системи "розчин NH₄OH – повітря" до "розчин NaOH – повітря" застосовували рівняння аналогії фізико-хімічних властивостей газорідних систем Чілтона-Кольборна

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{P_{r_2}}{P_{r_1}} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (13)$$

На рис. 5 наведені залежності об'ємного коефіцієнта масопередачі від швидкості повітря, які показують значно більшу ефективність гофрованої сферичної насадки: при швидкості $W_{пр} = 1,5$ м/с, K_v для насадки ГНЗ складає $5,2 \times 10^5$ кг/(м³·с·Па), а для кільця Рашига $K_v = 1,8 \times 10^5$ кг/(м³·с·Па).

Нами були проведені розрахунки по зміні ступеня очищення газоповітряного потоку від діоксида сірки в умовах виробництва ПАР. Розрахунки (рис. 6) показали що ступінь очищення газоповітряного потоку від двооксиду сірки при швидкості 1,5 м/с збільшується з 95,6 % (кільця Рашига) до 98,6 % (ГНЗ). При цьому гідравлічний опір нової гофрованої насадки при швидкості потоку 1,5 м/с у 6 разів нижче в порівнянні з кільцями Рашига.

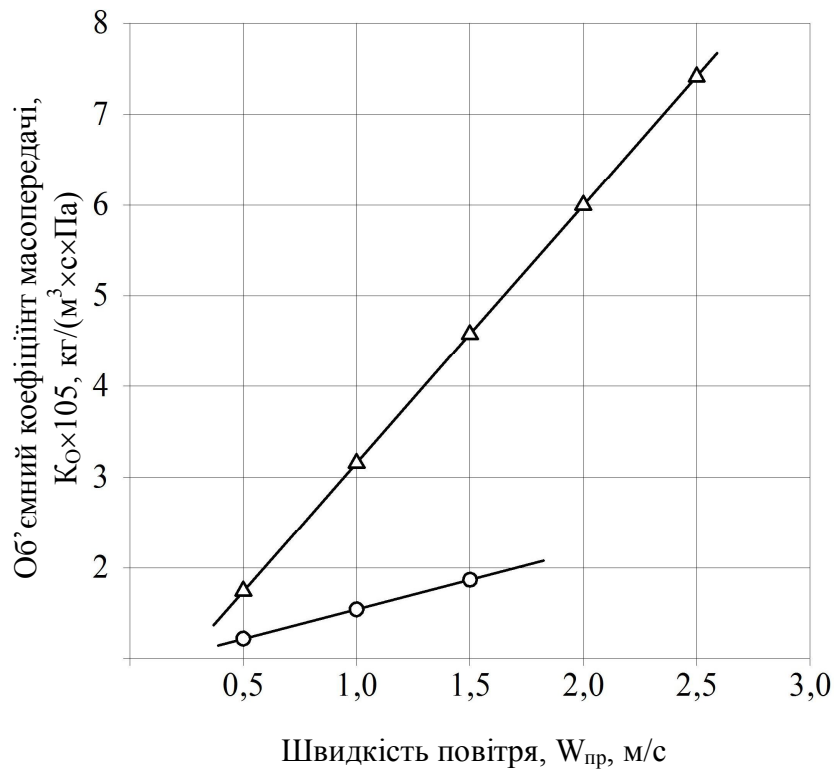


Рисунок 5 – Залежність об'ємного коефіцієнта масопередачі від швидкості повітря: тип насадки: 1 – кільця Рашига; 2 – ГНЗ. Швидкість зрошування, м³/(м²·с) – 0,006

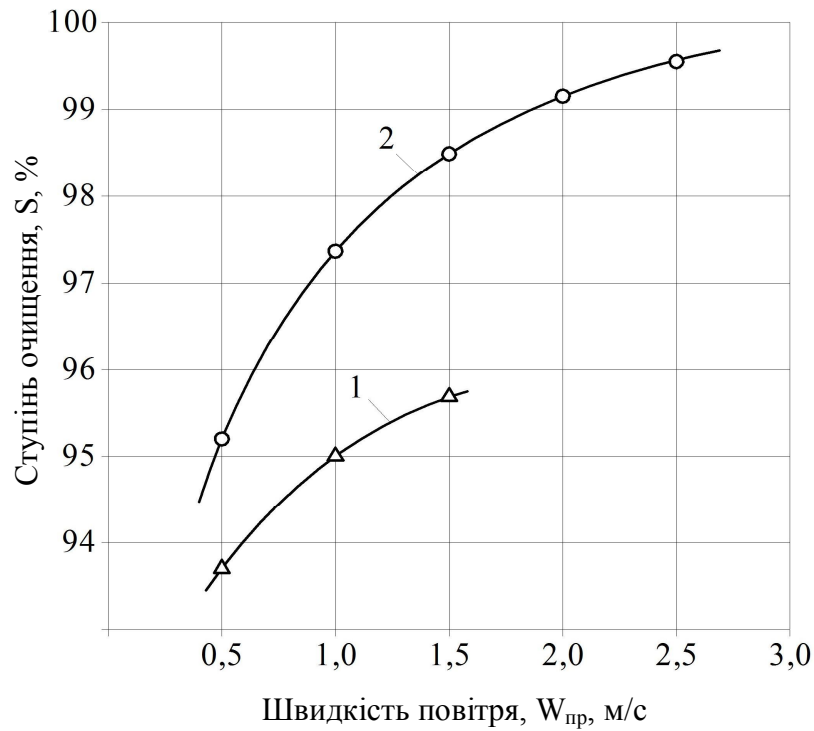


Рисунок 6 – Залежність ступеня очищення газоповітряного потоку від двооксиду сірки від швидкості газоповітряного потоку. Тип насадки: 1 – кільця Рашига; 2 – ГНЗ

Висновки. Експериментальними дослідженнями доведено що насадкові елементи з округлими поперековими ребрами мають значно низький гідравлічний опір ніж кільця Рашига, як на сухій, так і на зрошуваній насадці. Підвищення енергоефективності гофрованої насадки підтверджена і збільшенням об'ємного коефіцієнта масопередачі. У цілому вдається досягнути ступеня очищення газоповітряного потоку від двооксиду сірки 98,6 % при $W_{пр} = 1,5$ м/с і 99,6 % при $W_{пр} = 2,5$ м/с.

Література

1. Рамм В.М. Абсорбция газов / В.М. Рамм // М.: РГБ, 2009. – 655 с.
2. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Часть 2: Массообменные процессы и аппараты / Ю.И. Дытнерский // М.: Альянс, 2015. – 357 с.
3. Борисов Г.С. Основные процессы и аппараты химической технологии / Г.С. Борисов, В.П. Брыков, Ю.И. Дытнерский // М.: Альянс, 2008. – 496 с.
4. Захарова А.А. Процессы и аппараты химической технологии / А.А. Захарова, Л.Т. Бакшиев, Б.И. Кандауров // М.: Академия, 2006. – 528 с.
5. Товажнянський Л.Л. Процеси та апарати хімічної технології. Підручник. Частина 2 / Л.Л. Товажнянський, А.П. Готлінська, В.О. Лещенко, І.О. Нечипоренко, І.С. Чернишов // Харків: НТУ "ХПІ", 2007. – 540 с.
6. Игнатович Э. Химическая техника. Процессы и аппараты. В 3-х частях. Пер. с нем. – М.: Техносфера, 2007. – 656 с.
7. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин // М.: Альянс, 2014. – 753 с.
8. Кафаров В.В. Основы массопередачи. / В.В.Кафаров // М.: Высшая школа, 1979. – 439 с.
9. Подустов М.А. Новые подходы к очистке газовых выбросов в производстве поверхностно-активных веществ / М.А. Подустов, В.И. Тошинский, В.Н. Петров // Вестник НТУ "ХПИ". – Харків: НТУ "ХПИ". – 2003. – № 15. – с. 26–31.
10. Тошинский В.И. Разработка новой конструкции эффективной энергосберегающей массообменной насадки / В.И. Тошинский, В.Л. Голуб, А.В. Медяник // Экология и промышленность. – 2011. - № 2. – С. 62–66.
11. Патент 174152 Российская Федерация, МПК В01П19/30 Насадка для тепло- и массообменных процессов. А.Ю. Голованчиков, Н.А. Прохоренко, К.В. Черникова, С.В. Сумбулян, А.А. Тарасов, М.А. Насонова: ВолгГТУ. – 2017.

Bibliography (transliterated)

1. Ramm V.M. Absorbtsiya gazov / V.M. Ramm // M.: RGB, 2009. – 655 p.
2. Dytnerskiy Yu.I. Protsessyi i apparaty himicheskoy tehnologii. Chast 2: Massoobmennyye protsessyi i apparaty / Yu.I. Dytnerskiy // M.: Alyans, 2015. – 357 p.
3. Borisov G.S. Osnovnyie protsessyi i apparaty himicheskoy tehnologii / G.S. Borisov, V.P. Bryikov, Yu.I. Dytnerskiy // M.: Alyans, 2008. – 496 p.
4. Zaharova A.A. Protsessyi i apparaty himicheskoy tehnologii / A.A. Zaharova, L.T. Bakshiev, B.I. Kandaurov // M.: Akademiya, 2006. – 528 p.
5. Tovazhnyanskyu L.L. Protsesi ta aparati himichnoyi tehnologiyi. Pidruchnik. Chastina 2 / L.L. Tovazhnyanskyu, A.P. Gotlinska, V.O. Leschenko, I.O. Nechiporenko, I.S. Chernishov // Harkiv: NTU "HPI", 2007. – 540 p.

6. Ignatovich E. Himicheskaya tehnika. Protsessyi i apparaty. V 3-h chastyah. Per. s nem. – M.: Tehnosfera, 2007. – 656 p.
7. Kasatkin A.G. Osnovnyie protsessyi i apparaty himicheskoy tehnologii / A.G. Kasatkin // M.: Alyans, 2014. – 753 p.
8. Kafarov V.V. Osnovy massoperedachi. / V.V.Kafarov // M.: Vysshaya shkola, 1979. – 439 p.
9. Podustov M.A. Novyye podhodyi k ochistke gazovyih vyibrosov v proizvodstve poverhnostno-aktivnyih veschestv / M.A. Podustov, V.I. Toshinskiy, V.N. Petrov // Vestnik NTU "HPI". – Harkiv: NTU "HPI". – 2003. – № 15. – p. 26–31.
10. Toshinskiy V.I. Razrabotka novoy konstruktсии effektivnoy energosberegayushey massoobmennoy nasadki / V.I. Toshinskiy, V.L. Golub, A.V. Medyanik // Ekologiya i promyshlennost. – 2011. – № 2. – P. 62–66.
11. Patent 174152 Rossiyskaya Federatsiya, MPK V01I19/30 Nasadka dlya teplo- i massoobmennyih protsessov. A.Yu. Golovanchikov, N.A. Prohorenko, K.V. Chernikova, S.V. Sumbulyan, A.A. Tarasov, M.A. Nasonova: VolgGTU. – 2017.

УДК 661.185

Дзевочко А.М., к. техн. н., доцент, Подустов М.А., д. техн. н., профессор

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОФРИРОВАННЫХ НАСАДОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОЦЕССАХ АБСОРБЦИИ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ ПРОИЗВОДСТВА ПАВ

Проведены экспериментальные исследования новых гофрированных насадочных элементов в абсорбционной колонне. Изучены их гидродинамические и массообменные характеристики. Приведены данные зависимостей гидравлического сопротивления и коэффициента массопередачи от скорости воздуха и плотности орошения. Обоснована эффективность насадочного элемента со сферическими гофрами. Представлены результаты позволят в производстве ПАР снизить выбросы в атмосферу отходящих газов и уменьшить габариты используемого оборудования.

Dzevochko O.M, Podustov M.O.

RESEARCH OF GRAPHIC POTENTIAL ELEMENTS IN DRUG DISCHARGE PROCESSES OF SWINE PRODUCTION GAS

Experimental studies of new corrugated nozzle elements in the absorption column have been carried out. Their hydrodynamic and mass transfer characteristics are studied. The data of the dependences of the hydraulic resistance and the mass transfer coefficient from the air velocity and irrigation density are presented. The effectiveness of the nozzle element with spherical corrugations is substantiated. The presented results will allow the production of surfactants to reduce emissions of atmospheric waste gases and reduce the dimensions of the equipment used.