

УДК 677.027

DOI 10.47367/0021-3497\_2021\_5\_235

**ГИДРОДИНАМИКА АППАРАТА С РЕГУЛЯРНОЙ СТРУКТУРОЙ АДсорбЕНТА  
ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ТЕКСТИЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ\***

**HYDRODYNAMICS OF A DEVICE WITH A REGULAR ADSORBENT  
STRUCTURE FOR WASTEWATER TREATMENT  
OF TEXTILE ENTERPRISES**

*А.Е.ХУСАНОВ, З.И.ДЖАМАЛОВА, Б.М.КАЛДЫБАЕВА, Д.А.ТУРДЫБЕКОВА, М.Д.САБЫРХАНОВ*  
*A. YE. KHUSSANOV, Z.I.JAMALOVA, B.M. KALDYBAYEVA, D.A. TURDYBEKOVA, M.D. SABYRKHANOV*

**(Южно-Казахстанский университет им. М.Ауэзова, Республика Казахстан)**

**(M.Auezov South Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan)**

E-mail: khusanov\_1975@inbox.ru; zulya\_d\_85@mail.ru; kaldybaeva.b@mail.ru;  
dilya\_turdibekova@mail.ru; smd\_1976@mail.ru

*Адсорбционная технология, отличающаяся относительно простой и проработанной конструкцией аппаратов и машин и приемлемыми энергозатратами, является одной из наиболее перспективных и конкурентоспособных технологий. В этой статье предлагается описание конструкции аппарата с регулярной структурой адсорбента для очистки сточных вод текстильных предприятий, приведена экспериментальная установка для исследования тепломассообменных и гидродинамических характеристик.*

---

\* Представленные результаты исследования гидродинамики аппарата с регулярной структурой адсорбента для очистки сточных вод текстильных предприятий получены в рамках грантового проекта МОН РК AP09260365 "Применение интегрированных технологий для снижения уровня загрязнения окружающей среды и повышение энергоэффективности производственных территориальных комплексов".

*Статья посвящена исследованию гидродинамики стационарного слоя гранулированного активированного угля при фильтрации газожидкостного потока. Определен коэффициент сопротивления слоя на основании внутренней задачи гидродинамики. Приведено сравнение полученных результатов с точки зрения их точности и трудоемкости необходимых расчетов.*

*The adsorption technology, characterized by a relatively simple and well-developed design of devices and machines and acceptable energy consumption, is one of the most promising and competitive technologies. This article deals with the design of an apparatus with a regular structure of an adsorbent for textile enterprises wastewater treatment, an experimental installation for the study of heat and mass transfer and hydrodynamic characteristics is given. The article is also devoted to the study of the hydrodynamics of a granular activated carbon stationary layer during gas-liquid flow filtration. The coefficient of the layer resistance is determined, based on the internal problem of hydrodynamics. The results obtained are compared in terms of their accuracy and the complexity of the necessary calculations.*

**Ключевые слова:** внешняя задача гидродинамики, внутренняя задача гидродинамики, стационарный слой, коэффициент сопротивления, фильтрационная сушка, текстильная отрасль, тепломассообменные закономерности.

**Keywords:** external hydrodynamic problem, internal hydrodynamic problem, stationary layer, resistance coefficient, filtration drying, textile industry, heat and mass transfer patterns.

#### *Введение*

В современной текстильной промышленности адсорбционный метод широко используют для глубокой очистки технологических потоков, который позволяет практически полностью извлечь примеси из жидкой среды [1...6].

Анализ конструкций адсорбционных аппаратов показывает, что их достоинствами являются: тонкая очистка сточных вод, селективность, несложность работы и простота конструкции аппаратов, а недостатками – трудность регенерации, снижение его активности в процессе эксплуатации, большие потери давления в аппаратах [1]. Для устранения указанных недостатков и снижения больших потерь давления в адсорбционных аппаратах возникает необходимость исследования гидравлического сопротивления аппаратов и модернизации конструкции аппаратов.

В тепломассообменных аппаратах с регулярной насадкой заложен принцип создания синфазного режима взаимодействующих фаз [7]. Это достигается рацио-

нальным размещением контактных элементов вдоль движения сплошного и дисперсного потоков, как показали предварительные исследования, это приводит к существенной интенсификации проводимых процессов. Благодаря вышеперечисленному такие аппараты нашли свое промышленное применение в процессах абсорбции, десорбции адсорбции, и улавливания пыли [7], [8].

Исследования, проведенные на различных текстильных предприятиях США по адсорбционной очистке сточных вод, показали, что степень очистки сточных вод от красителей составляет 98...100% [8...10].

*Методы и объект исследования.* На основании информационного анализа данных о составе и методах для очистки отходящих сточных вод текстильных предприятий нами разработана конструкция аппарата с регулярной структурой адсорбента, которая приведена на рис. 1 [9]. Аппарат с регулярной структурой адсорбента для промышленной адсорбции жидкостей работает следующим образом.

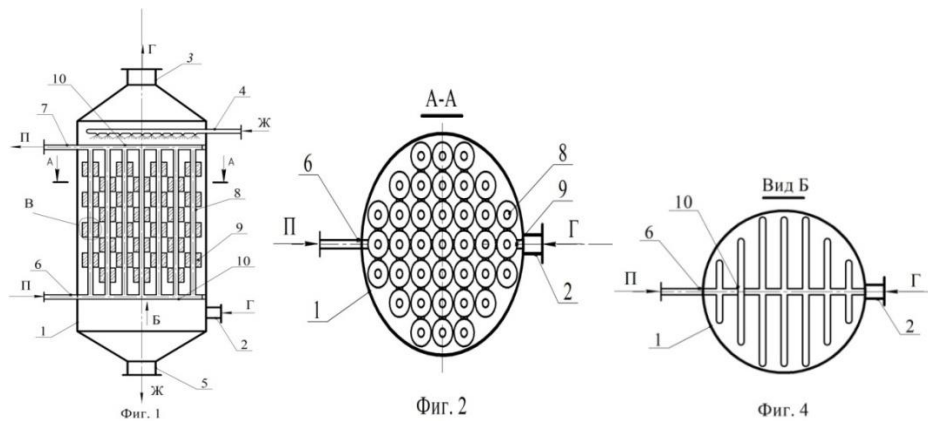


Рис. 1

Поток, поступающий на очистку, подается через штуцер 4. Взаимодействие газа и жидкости, подаваемой через патрубков ввода газа 2, происходит в противоточном режиме в объеме контактной зоны, представляющей собой контактное устройство, состоящее из адсорбента 9, регулярно расположенных в сечении и по высоте аппарата. Регулярность расположения контактных устройств с шагами, равными двум линейным размерам поперечного сечения контактного устройства в вертикальном и радиальном направлениях, приводит к созданию режима одновременного вихреобразования (синфазного режима) взаимодействия вихрей, образующихся за контактными устройствами. В синфазном режиме суммарная мощность вихрей увеличивается, что позволяет совершить большую работу по дроблению очищаемой жидкости и созданию высокоразвитой межфазной поверхности. Кроме того, в аппарате с регулярной структурой адсорбента происходит процесс поглощения очищаемой жидкости слоем адсорбента, который повышает эффективность очистки [9].

Движение регенерационного газа по слоям контактных устройств осуществляется по схеме патрубков 6 – коллектор 10 – распределительные трубы 8 – коллектор 10 – патрубков 7. В случае регенерации адсорбента регенерационный газ через отверстия в распределительной трубе проникает в слой адсорбента и, продувая поглощенное загрязнение, удаляется через штуцер 5 выхода жидкости.

При понижении степени очистки потока адсорбентом, о чем свидетельствует повышение концентрации поглощаемого вещества в очищенном потоке, слой адсорбента подвергают регенерации. Для этого отключается подача исходного газа через штуцер 2 и жидкости через штуцер 4, через штуцер 6 вводится регенерирующий газ и подается в распределительные трубы 8 на адсорбент 9. Отделенное от адсорбента поглощаемое вещество в смеси с регенерирующим агентом выводится через штуцер 5 [9].

Использованный газовый поток выводится из аппарата через штуцер 3, а очищенная жидкость стекает через патрубков 5.

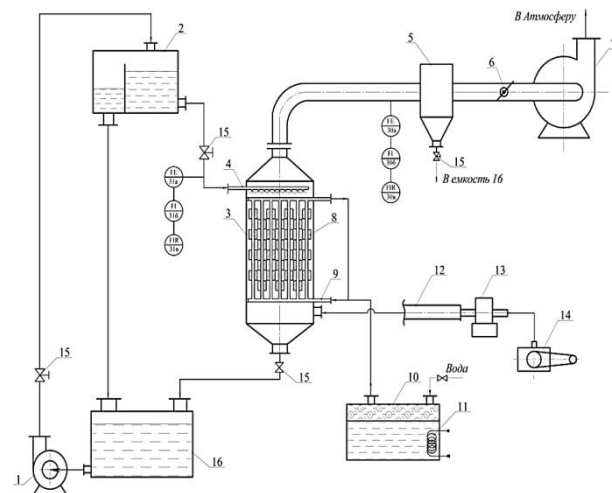


Рис. 2

Преимуществами заявляемого технического решения, по сравнению с прототипом, являются [9]:

- достижение более высоких коэффициентов тепло- и массоотдачи при очистке (до 30%) за счет равномерного распределения взаимодействующих потоков;

- снижение расхода регенерационного газа за счет индивидуального распределения в каждый адсорбционный элемент контактного устройства.

Технологическая схема установки представлена на рис. 2, где 1 – насос; 2 – напорная емкость; 3 – аппарат; 4 – ороситель; 5 – каплеуловитель; 6 – шибер; 7 – вентилятор; 8 – контактные устройства (насадка); 9 – распределитель регенерационного агента; 10 – нагревательная емкость; 11 – нагревательное устройство; 12 – входной газодод; 13 – воздухоподатчик; 14 – компрессор; 15 – вентиль; 16 – циркуляционная емкость. Экспериментальная установка включала модель аппарата круглого сечения ( $D=350$  мм), выполненную из оргстекла [11].

Поток воздуха, нагнетаемый вентилятором 7, поступает через штуцер 12 в колонный аппарат 3 диаметром 350 мм и высотой рабочей зоны 1,3 м. Затем, проходя через насадочную зону 8, орошаемый очищаемой жидкостью, поступающей через ороситель 4, выбрасывается в атмосферу. Расход воздушного потока регулируется шибером 6 по показаниям стандартной диафрагмы с дифманометром. Очищаемая жидкость из нижней емкости аппарата 16 с помощью насоса 1 подается в напорный бак 2, откуда через ороситель 7 поступает на орошение. Расход воды регулируется вентилем 15 по показаниям ротаметра.

Диапазон изменения режимных параметров: скорость газа  $w_r$  -  $1 \div 5$  м/с; плотность орошения  $L$  -  $10 \div 75$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч; температура воздуха  $t_{\text{возд.}}$  =  $20 \div 100$ °С; температура теплоносителя в трубчатом пучке  $t_{\text{ж.}}$  =  $16 \div 100$ °С; конструктивных параметров: шаг между насадочными элементами по вертикали  $t_b/b$  -  $1 \div 5$ ; шаг между насадочными элементами по горизонтали  $t_p/b$  -  $1,5 \div 4$ ; размер насадочных элементов: насадка с адсорбентом:  $d = 0,025$  м;  $l = 0,34$  м.

*Результаты и обсуждение.* Целью работы является экспериментальный и теоретический анализ гидродинамики при взаимодействии газожидкостного потока в стационарном слое адсорбента, состоящего из активированного угля, и определение коэффициента гидравлического сопротивления слоя  $\lambda$  [12], [13].

Согласно рекомендациям, приведенным в [14], и на основе визуального анализа формы гранул коэффициент сферичности приняли равным  $\psi = 0,9$ , учитывая микрошероховатость внешней поверхности гранул, коэффициент взаимного экранирования их поверхности приняли равным  $K_e = 0,9$ , а удельную поверхность слоя определяли из зависимости [14]:

$$a = \frac{a_0(1-\varepsilon_{\text{сл}})}{K_e}, \quad (1)$$

где  $a_0 = \frac{6}{\psi \cdot d_n}$  – удельная поверхность гранулы;  $\varepsilon_{\text{сл}}$  – порозность слоя, которую определяли методом двух жидкостей согласно методике, приведенной в [15]. Исследование гидродинамики проводили согласно методике, описанной в [16]. Зависимость потерь давления в слое гранулированного активированного угля от фиктивной скорости фильтрования газожидкостного потока приведены на рис. 3-а и 3-б, где  $H \cdot 10^3$  м: 1 – 140; 2 – 119; 3 – 97; 4 – 76; 5 – 54; 6 – 40; 7 – 32; 8 – 22. С целью сравнения различных методов обобщения экспериментальных данных и определения их влияния на точность прогнозирования потерь давления в слое дисперсного материала проанализируем их.

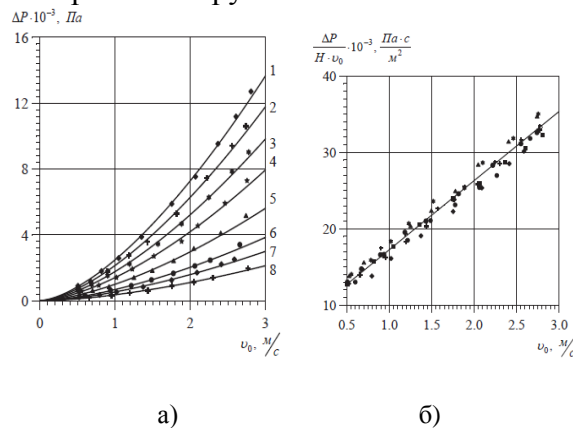


Рис. 3

$$A = 120Re_e^{-0,45}, \quad (2)$$

На практике для определения потерь давления в слое дисперсного материала разные исследователи используют как внутреннюю, так и внешнюю задачу гидродинамики. В этой статье мы рассмотрели только внутреннюю задачу, а результаты внешней задачи гидродинамики приведены в нашей работе [11].

Внутренняя задача гидродинамики. Определяющим геометрическим размером в этом случае принимают эквивалентный диаметр канала, по которому движется тепловой агент  $d_e$ . Для нахождения функциональной зависимости между числом Эйлера, Рейнольдса и геометрическим симплексом используем графоаналитический метод (рис. 4-а и 4-б: а) зависимость числа Эйлера от геометрического симплекса для активированного угля, б) зависимость коэффициента "А" от числа  $Re_e$  для активированного угля: 1 –  $Re_e=180$ ; 2 – 320; 3 – 460; 4 – 600; 5 – 740; 6 – 880; 7 – 1020).

Для этого результаты экспериментальных исследований представим в виде зависимости числа Эйлера от геометрического симплекса  $Eu = f\left(\frac{H_e}{d_e}\right)$  для различных значений числа Рейнольдса (рис. 4-а).

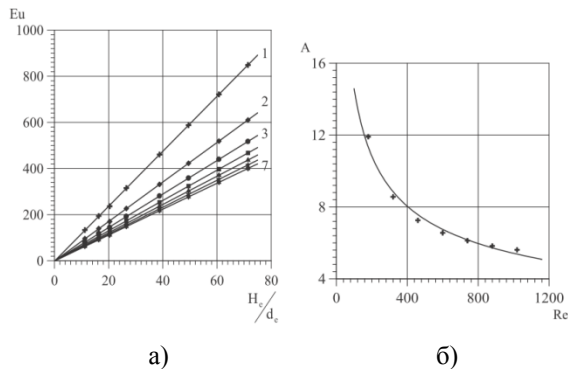


Рис. 4

Как видно из рис. 4-а, рост числа Рейнольдса приводит к росту угла наклона прямой к оси абсцисс. Поэтому для нахождения неизвестного коэффициента "А" построим зависимость тангенса угла наклона прямой к оси абсцисс, как функции от числа Рейнольдса (рис. 4-б).

На основе графической зависимости получаем:

где  $Re_e = \frac{\omega \cdot d_e \cdot \rho}{\mu}$  – эквивалентное значение числа Рейнольдса.

Уменьшить количество необходимых расчетов и количество графических зависимостей при определении коэффициента сопротивления стационарного слоя активированного угля можно, если представить экспериментальные данные в виде графической зависимости  $\frac{Eu}{\frac{H_e}{d_e}} = f(Re_e)$ :

$$Eu = 120 \frac{H_e}{d_e} Re_e^{-0,45}, \quad (3)$$

а коэффициент гидравлического сопротивления слоя соответственно:

$$\lambda = 240Re_e^{-0,45}. \quad (4)$$

Из графической зависимости (рис. 5-а) определяем:

$$\frac{Eu}{\left(\frac{H_e}{d_e}\right)} = \frac{\lambda}{2} = 120Re_e^{-0,45}. \quad (5)$$

Как видим, два последних варианта дают нам одинаковые зависимости для определения коэффициента сопротивления  $\lambda$ .

С целью сравнения точности определения коэффициента сопротивления  $\lambda$  из вышеприведенных зависимостей (3) и (5) рассчитаем потери давления в стационарном слое активированного угля по известному уравнению Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta P_T = \lambda \frac{H}{d_q} \frac{\rho \cdot \omega_0^2}{2 \cdot \varepsilon_{cl}^2} \quad (6)$$

и сравним полученные результаты с экспериментальными данными. Результаты сравнения приведем в виде графической зависимости рис. 5-а.

На рис. 5 показаны: а) зависимость  $\frac{Eu}{\frac{H_e}{d_e}}$  от числа Рейнольдса  $Re_e$ , б) корреляционная зависимость между теоретически рассчитанными по зависимости (8) и в соответствии (3), (5) и экспериментальными

данными, где  $\diamond - \lambda = \frac{4200}{Re} + 14$ ;  $+ - \lambda = 424 \cdot Re^{-0,43}$ ;  $\bullet - \lambda = 240 \cdot Re^{-0,45}$ .

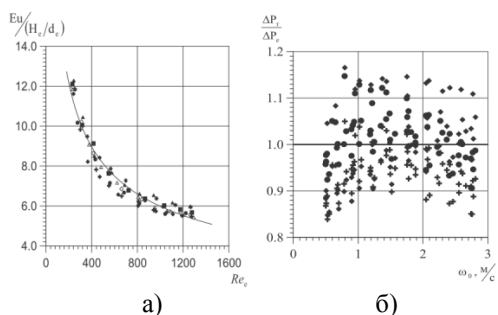


Рис. 5

## ВЫВОДЫ

Как свидетельствует анализ рис. 5-б, максимальная относительная погрешность между рассчитанными значениями и экспериментальными данными для всех высот активированного угля не превышает: для первого метода ( $\lambda = \frac{4200}{Re} + 14$ ) – 16,7%, второго метода ( $\lambda = 424 \cdot Re^{-0,43}$ ) – 16,1% и третьего, и четвертого ( $\lambda = 240 \cdot Re^{-0,45}$ ) – 14,5%, что является вполне приемлемым для проектных расчетов технологического оборудования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники // 2-е изд. перер. и доп. – М.: Химия, 1984.
2. Ласков Ю.М., Ефимова Н.А. Очистка сточных вод красильно-отделочных предприятий хлопчатобумажной промышленности физико-химическими методами. – М., 1980. С.102...108.
3. Фруммин Л.Е., Филатов В.Н., Соротюк Р.Е., Кричевский Г.Е. Очистка сточных вод красильно-отделочного производства сорбционным методом. – М., 1983. С.98...101.
4. Ануфриев В.Н. Очистка сточных вод предприятий текстильной промышленности // Экология на предприятиях. – 2015, № 1 (43). С. 87...96.
5. Волхонская Н.С. Основные тенденции в использовании пигментных композиций в текстильной промышленности // Текстильная химия. – 1996, № 1(8). С. 11...13.
6. Абрамов О.В., Кошелева М.К., Кереметин П.П., Муллакаев М.С. Очистка сточных вод текстильных предприятий гальванохимическим методом с использованием ультразвукового поля // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009, № 3. С.107...110.

7. Volnenko A.A., Balabekov O.S., Korganbaev B.N., Sarsenbekuly D.S. Purification apparatuses with new types of regular packings for chromium salts production // Chemical Engineering Transactions. – № 43, 2015. P. 1147...1152.

8. Kaldybaeva B.M., Khusanov A.E., Dmitriev E.A., Sabyrkhanov D.S., Abilmagzhanov A.Z. Modelling with simultaneous phase transfer chemisorption of hydrogen sulfide and carbon dioxide in the chemisorption apparatus // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – №6(420), 2016. P. 178...184.

9. Патент на полезную модель РК №6233, Заявка № 2021/0123.2. Дата подачи заявки 10.02.2021. Аппарат с регулярной структурой адсорбента // Джамалова З., Калдыбаева Б.М., Хусанов А.Е. и др.

10. McKay Jordon. Waster Color Removal From Textil Effluents // American Dyestuff Reporter. – V. 68, №4, 1979. P.29...34.

11. Джамалова З., Калдыбаева Б.М., Хусанов А.Е., Жолшыбек А. Расчет гидравлического сопротивления аппарата с регулярной структурой неподвижного слоя адсорбента: внешняя задача гидродинамики // Труды МНПК "Ауэзовские чтения-19:30 лет Независимости Казахстана". – Шымкент, 2021. Т.8. С.137...140.

## REFERENCES

1. Kel'tsev N.V. Osnovy adsorbtsionnoy tekhniki // 2-e izd. perer. i dop. – М.: Khimiya, 1984.
2. Laskov Yu.M., Efimova N.A. Ochistka stochnykh vod krasil'no-otdelochnykh predpriyatiy khlochatobumazhnoy promyshlennosti fiziko-khimicheskimi metodami. – М., 1980. S.102...108.
3. Frumin L.E., Filatov V.N., Sorotyuk R.E., Krichevskiy G.E. Ochistka stochnykh vod krasil'no-otdelochnogo proizvodstva sorbtsionnym metodom. – М., 1983. S.98...101.
4. Anufriev V.N. Ochistka stochnykh vod predpriyatiy tekstil'noy promyshlennosti // Ekologiya na predpriyatiyakh. – 2015, № 1 (43). S. 87...96.
5. Volkhonskaya N.S. Osnovnye tendentsii v ispol'zovanii pigmentnykh kompozitsiy v tekstil'noy promyshlennosti // Tekstil'naya khimiya. – 1996, №1(8). S. 11...13.
6. Abramov O.V., Kosheleva M.K., Keremetin P.P., Mullakaev M.S. Ochistka stochnykh vod tekstil'nykh predpriyatiy gal'vanokhimicheskim metodom s ispol'zovaniem ul'trazvukovogo polya // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2009, №3. S.107...110.
7. Volnenko A.A., Balabekov O.S., Korganbaev B.N., Sarsenbekuly D.S. Purification apparatuses with new types of regular packings for chromium salts production // Chemical Engineering Transactions. – № 43, 2015. P. 1147...1152.
8. Kaldybaeva B.M., Khusanov A.E., Dmitriev E.A., Sabyrkhanov D.S., Abilmagzhanov A.Z. Modelling with simultaneous phase transfer chemisorption of hy-

drogen sulfide and carbon dioxide in the chemisorption apparatus // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences.– №6(420), 2016. P. 178...184.

9. Patent na poleznuyu model' RK №6233, Zayavka № 2021/0123.2. Data podachi zayavki 10.02.2021 Apparat s regulyarnoy strukturoy adsorbenta //Dzhamalova Z., Kaldybaeva B.M., Khusanov A.E. i dr.

10. McKay Jordon. Waster Color Removal From Textil Effluents// American Dyestuff Reporter. – V. 68, №4, 1979. R.29...34.

11. Dzhamalova Z., Kaldybaeva B.M., Khusanov A.E., Zholshybek A. Raschet gidravlicheskogo soprotivleniya apparata s regulyarnoy strukturoy nepodvizhnogo sloya adsorbenta: vneshnyaya zadacha gidrodinamiki // Trudy MNPК "Auezovskie chteniya-19:30 let Nezavisimosti Kazakhstana". – Shymkent, 2021. T.8. S.137...140.

Рекомендована Ученым советом. Поступила 13.10.21.