



ПОЛИКАНАЛЬНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗДЕЛЕНИЯ ЖИДКИХ АЭРОЗОЛЬНЫХ СИСТЕМ В НАСАДОЧНЫХ СКРУББЕРАХ-ОХЛАДИТЕЛЯХ

Лаптева Е.А., Аласгарли С.У.О., Клочкова В.А.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

grivka100@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в полученной математической модели расчета эффективности разделения аэрозольных систем, которая учитывает неравномерный профиль скорости газа в насадочном газосепараторе-скруббере. ЦЕЛЬЮ является на основе разработанной математической модели создание инженерной методики расчета эффективности насадочных скрубберов-охладителей совместно с разделением аэрозолей с привлечением данных по гидравлическому сопротивлению локальных зон слоя хаотичной насадки и неравномерного профиля скорости газа. МЕТОДЫ заключаются в применении дифференциального уравнения массопереноса аэрозольных частиц с локальным объемным источником массы переноса и осаждения частиц на поверхность хаотичной насадки. Для этого используется теория турбулентно-инерционного механизма осаждения частиц при больших скоростях движения аэрозольных систем. Объемный источник массы связан с коэффициентом скорости турбулентной миграции частиц, разностью концентраций и с удельной поверхностью насадки. Уравнение массопереноса частиц записано в одномерной постановке для ряда параллельных условных каналов насадочного слоя с различной скоростью движения газа. Научная новизна состоит в математической модели сепарации аэрозолей, которая с небольшими вычислительными затратами позволяет прогнозировать влияние неоднородности размещения насадки и неравномерность профиля скорости газа на эффективность процесса разделения. РЕЗУЛЬТАТАМИ является установленное влияние неравномерного профиля скорости газа в насадочном слое на профиль концентрации частиц и на эффективность сепарации аэрозолей, что очень важно при проектировании или модернизации скрубберов-охладителей. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В результате применения разработанной математической модели и методики расчетов выявлено влияние различной скорости газа в хаотичном насадочном слое на эффективность разделения аэрозольных систем. Показано, что наличие неравномерностей снижает эффективность разделения на 5-33%, что необходимо учитывать при проектировании контактных скрубберов с насадками при очистке газа от дисперсной фазы на предприятиях топливно-энергетического комплекса.

Ключевые слова: разделение аэрозолей; математическая модель; турбулентная миграция; неравномерность скорости газа; эффективность разделения.

Благодарности: Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

Для цитирования: Лаптева Е.А., Аласгарли С.У.О., Клочкова В.А. Поликанальная математическая модель разделения жидких аэрозольных систем в насадочных скрубберах-охладителях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 1. С. 126-138. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-126-138.

MULTICHANNEL MATHEMATICAL MODEL OF SEPARATION OF LIQUID AEROSOL SYSTEMS IN PACKED SCRUBBER-COOLERS

Lapteva E.A., Alasgarli S.U.O., Klochkova V.A.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
grivka100@mail.ru

Abstract: *THE RELEVANCE* of the study lies in the obtained mathematical model for calculating the efficiency of separation of aerosol systems, which takes into account the uneven profile of the gas velocity in the nozzle gas separator-scrubber. *THE PURPOSE* is, based on the developed mathematical model, to create an engineering methodology for calculating the efficiency of nozzle scrubber coolers together with aerosol separation using data on the hydraulic resistance of local zones of the chaotic nozzle layer and an uneven gas velocity profile. *METHODS* consist in the application of a differential equation of mass transfer of aerosol particles with a local volumetric source of mass transfer and deposition of particles on the surface of a chaotic nozzle. For this purpose, the theory of the turbulent inertial mechanism of particle deposition at high velocities of aerosol systems is used. The volumetric mass source is related to the coefficient of the turbulent particle migration rate, the concentration difference and the specific surface area of the nozzle. The equation of mass transfer of particles is written in a one-dimensional formulation for a number of parallel conditional channels of the packing layer with different gas velocity. The scientific novelty consists in a mathematical model of aerosol separation, which, with low computational costs, makes it possible to predict the effect of inhomogeneity of nozzle placement and uneven gas velocity profile on the efficiency of the separation process. *RESULTS* are the established effect of the uneven gas velocity profile in the packing layer on the particle concentration profile and on the efficiency of aerosol separation, which is very important when designing or upgrading scrubber coolers. *CONCLUSION.* As a result of the application of the developed mathematical model and calculation methodology, the influence of different gas velocities in a chaotic packing layer on the separation efficiency of aerosol systems has been revealed. It is shown that the presence of irregularities reduces the separation efficiency by 5-33%, which must be taken into account when designing contact scrubbers with nozzles for gas purification from the dispersed phase at enterprises of the fuel and energy complex.

Keywords: aerosol separation; mathematical model; turbulent migration; uneven gas velocity; separation efficiency.

Acknowledgments: The work was carried out at the expense of a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, provided to young candidates of science (postdoctoral students) for the purpose of defending a doctoral dissertation, carrying out research work, and also performing work functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program of the Republic of Tatarstan "Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan".

For citation: Lapteva E.A., Alasgarli S.U.O., Klochkova V.A. Multichannel mathematical model of separation of liquid aerosol systems in packed scrubber-coolers. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (1): 126-138. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-126-138.

Введение (Introduction)

Задачи охлаждения и очистки газов от различного вида дисперсной фазы актуальны для предприятий нефтегазохимического комплекса и энергетики. Тепломассообменные аппараты, технологические установки и компрессорные станции не могут работать без эффективных газосепараторов (скрубберах). Применяются скрубберы «мокрой» очистки и охлаждения газов различных конструкций – Вентуры, барботажные, насадочные, ударно-распылительные и другие. Выбор типа аппарата зависит от решаемой технологической задачи и требований к газоочистке. Охлаждаемыми и очищаемыми газами могут дымовые на тепловых станциях или технологические газы на промышленных предприятиях ТЭК. Например, на узлах компримирования газа в процессе работы компрессоров образуются масляные аэрозоли

(масляный туман). Капли таких аэрозолей имеют размеры 0,5-20 мкм. Жидкие аэрозольные системы эффективно разделяются в аппаратах с различными контактными элементами – регулярными и нерегулярными (хаотичными) насадками. Известно многие сотни различных насадочных элементов и важной задачей является выбор рациональной конструкции, которая обеспечивает заданную степень очистки при ограничениях по энергозатратам. Эффективными инструментами решения таких задач являются математическое моделирование и экспериментальные исследования процесса сепарации аэрозолей.

1. Анализ современного состояния. Теоретические основы физического и математического моделирования тепломассообменных и сепарационных процессов и модернизации аппаратов были сформулированы и развиты в многочисленных работах академиков АН СССР Жаворонкова Н.М., Кафарова В.В., Кутателадзе С.С., Леонтьева А.И., академиками РАН Мешалкиным В.П., Алексеенко С.В., а так же профессорами Плановским А.Н., Касаткиным А.Г., Малюсовым В.А., Куловым Н.Н., Комиссаровым Ю.А., Кутеповым А.М., Дильманом В.В., Розеном А.М., Николаевым А.Н., Холпановым Л.П., Дьяконовым С.Г., Медниковым В.П., Систером В.Г., Саркисовым П.Д., Павленко А.Н., зарубежными учеными: Э.Ф. Тейлором, Данквертсом П.В., Р.Х. Jiang, S. Gurke, Хьюит Дж., Холландом Ч.Д. и многими другими. Некоторые современные работы анализируются ниже.

В работе [1] показано применение комбинированных контактных устройств для охлаждения дымовых газов, однако не решается задача очистки газов от продуктов сгорания. Тепломассообмен при контакте газа с пленкой жидкости рассмотрен в работе [2], где также нет решений по очистке газов от аэрозольных частиц. Разработаны способы [3] охлаждения газа с ресурсосберегающим эффектом, однако это не относится к дымовым газам. Представляет интерес результаты исследований [4] гидродинамических характеристик струйного массообменного аппарата, который может применяться при решении задач тепломассообмена и сепарации аэрозолей. Рекуперации теплоты продуктов сгорания природного газа при контакте с жидкой фазой с методикой расчета аппарата представлена в работе [5], без решения проблемы очистки газа. Технологические схемы охлаждения коксового газа даны в работе [6].

Обзорная статья [7] по развитию аппаратов очистки газов от пыли представляет интерес при разработке новых конструкций контактных устройств. Совместные процессы очистки дымовых газов от оксиды азота и угольной пыли даны в статье [8], где рассмотрено применение «мокрых» насадочных скрубберов, однако без решения тепловой задачи. Похожие задачи очистки газов обсуждаются в обзорной статье [9], а также в работе [10].

В работе [11] представлена кинетика сепарации и численный анализ профилей концентраций газовых конденсатов. Численное исследование параметров дисперсной фазы при распылительной сушке дано в работе [12]. Моделирование с использованием программного комплекса вычислительной гидродинамики для газоразделения показано в работе [13]. Обзорное исследование по разделению газожидкостных систем с подробным анализом механизмов переноса дано в работе [14]. Способы улучшения нефтегазового сепаратора рассмотрены в работе [15]. Разделение аэрозольных систем на примере мультивихревого сепаратора дано в статьях [16, 17].

Применение вихревых аппаратов для газоочистки представлено в многочисленных работах А.Ф. Махоткина, А.Н. Николаева, В.И. Петрова и многих других авторов. Показана высокая эффективность таких аппаратов с большой производительностью, однако вихревые аппараты характеризуются повышенными энергозатратами.

В монографии [18] представлены десятки конструкций регулярных и нерегулярных насадок отечественных и зарубежных фирм, а также даны их гидравлические характеристики в виде графических зависимостей или таблиц. В монографии [19] кроме конструктивных характеристик многих насадочных элементов даны экспериментальные исследования гидравлического сопротивления, задержки жидкости, активной поверхности, а также математические модели для расчета эффективности тепло-и массообмена. Гидродинамика и массообмен для ряда хаотичных и регулярных насадок представлены в монографии [20], где также показаны различные виды неравномерностей распределения газа и жидкости в различных сечениях аппаратов. Применение математических моделей гидродинамической структуры потоков показано в монографии [21], где даны как теоретические, так и экспериментальные результаты по расчету эффективности тепломассообменных

аппаратов.

Фундаментальные исследования движения и осаждения аэрозольных систем представлены в монографии [22], где показано, что основным механизмом сепарации является турбулентно-инерционный. Очистка газовых сред при интенсивном гидродинамическом режиме рассмотрено в монографии [23], где детально исследованы механизмы турбулентного переноса и дан ряд важных математических моделей для расчета эффективности сепарации. Математическая модель очистки природного газа в местах добычи при его охлаждении в аппарате с спиральным расположением витых трубок представлена в работе [24]. Даны результаты расчета сепарации масляных аэрозолей с учетом центробежного и турбулентного механизмов. В учебно-справочном пособии [25] показаны примеры применения теории турбулентной миграции частиц для аппаратов различных конструкций. Однако в рассмотренных выше научных работах не учитывается неоднородность газового потока в газосепараторах, поэтому целью данной статьи является представить математическую модель с методикой расчета разделения жидких аэрозольных систем с учетом неравномерного профиля скорости газа.

Целью работы является на основе разработанной математической модели создание инженерной методики расчета эффективности насадочных скрубберов – охладителей совместно с разделением аэрозолей с привлечением данных по гидравлическому сопротивлению локальных зон слоя хаотичной насадки и неравномерного профиля скорости газа.

Научная новизна состоит в математической модели сепарации аэрозолей, которая с небольшими вычислительными затратами позволяет прогнозировать влияние неоднородности размещения насадки и неравномерность профиля скорости газа на эффективность процесса разделения.

Практической значимостью: установленное влияние неравномерного профиля скорости газа в насадочном слое на профиль концентрации частиц и на эффективность сепарации аэрозолей, что очень важно при проектировании или модернизации скрубберов – охладителей.

Математическая модель (Mathematical model)

Рассматривается стационарное стабилизированное движение газа с жидкими аэрозольными тонкодисперсными частицами (< 20 мкм) в вертикальном канале. Режим движения газа в канале без внутренних устройств турбулентный ($Re_r > 10^4$, где $Re = w_r d_s / \nu_r$ – число Рейнольдса; w_r – средняя скорость газа, м/с; d_s – эквивалентный диаметр канала, м; ν_r – кинематический коэффициент вязкости газа, m^2/c). За счет турбулентно-инерционного механизма происходит миграция аэрозольных частиц к стенке канала и достигая поверхности аэрозольные частицы прилипают к стенке и образуется тонкая пленка, которая за счет силы тяжести стекает вниз. Пленка, как правило, имеет волновую поверхность, что увеличивает касательное напряжение газового потока на межфазной границе, за счет этого повышается гидравлическое сопротивление канала и эффективность сепарации увеличивается.

Для вертикальных каналов дифференциальное уравнение массопереноса аэрозольных частиц записывается в виде [22]

$$w_r(y) \frac{\partial C_q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left[D_{тq}(y) \frac{\partial C_q}{\partial y} \right] - [C_q u_t(y)] \right\}, \quad (1)$$

где $w_r(y)$ – скорость газа, как функция поперечной координаты, м/с; x – продольная координата, м; C_q – концентрация частиц, $кг/м^3$; $D_{тq}$ – коэффициент турбулентной диффузии частиц, $м^2/с$; u_t – коэффициент скорости турбулентной миграции частиц к стенке канала, м/с.

Граничные условия к уравнению (1) записываются в виде:

при $x = 0$, $C_q = C_{нq}$ (вход газа);

при $x = l$, $C_q = C_{кq}$ (выход газа);

при $y = R$, $w_r(y) = 0$; $\partial C_q / \partial y = 0$; $j_q = u_t C_q$ (на стенке канала),

при $y = 0$, $\partial C_q / \partial y = 0$ (на оси симметрии канала).

где l – длина канала, м;

R – радиус канала, м;

n, k – начальное и конечное значение;

j_q – плотность потока частиц, $кг/(м^2 c)$.

На стенке канала принимается $C_q = 0$ так как частица аэрозоля покинула газовую фазу и прилипла к стенке (к пленке). Локальный поток массы частиц в теории турбулентной миграции записывается в виде $j_q = u_t C_q$, где C_q – средняя концентрация частиц в поперечном сечении канала, кг/м^3 .

В канале (аппарате) заполненном нерегулярными (хаотичными) насадками задать граничные условия на поверхности каждого хаотично расположенного элемента не представляется возможным, так как таких элементов может быть несколько тысяч с неизвестной функцией распределения в объеме аппарата. В таких случаях при математическом моделировании используется объемный межфазный источник переноса, который записывается в виде $R_q = j_q F / V_H$, где F – площадь поверхности насадки, м^2 , V_H – объем насадки, м^3 . Отношение $F / V_H = a_v$ – удельная поверхность насадки, $\text{м}^2/\text{м}^3$, значение которой для каждой конструкции и типоразмера дается в специальной литературе [18-20]. Тогда $R_q = j_q a_v$ и уравнение массопереноса получит вид:

$$w_r(y) \frac{\partial C_q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} D_{Tq}(y) \frac{\partial C_q}{\partial y} + j_q a_v, \quad (2)$$

где конструктивные характеристики насадки, скорость переноса и осаждения аэрозолей учитывается за счет коэффициента $D_{Tq}(y)$ и источника массы $j_q a_v$.

Можно считать, что такая форма записи уравнения (2) является упрощенной формой частного случая модели многоскоростного континуума, где допускается, что фазы заполняют один и тот же объем аппарата с учетом взаимодействий с помощью межфазных источников.

Коэффициент турбулентной диффузии частиц можно вычислить по выражению [22]:

$$D_{Tq} = \frac{D_T}{1 + \omega_E \tau_p}, \quad (3)$$

где D_T – коэффициент турбулентной диффузии в газовой фазе, $\text{м}^2/\text{с}$; обычно принимается $D_T \approx \nu_T$, где ν_T – коэффициент турбулентной вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; $\omega_E = u_* / (0,1R)$ – частота энергоемких пульсаций, с^{-1} ; u_* – динамическая скорость (скорость трения), м/с ; $\tau_p = d_q^2 \rho_q / (18\mu_T)$ – время релаксации частицы, с ; d_q – диаметр частицы, м ; ρ_q – плотность частицы, кг/м^3 ; μ_T – коэффициент динамической вязкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

Для определения скорости турбулентной миграции частиц применяются полуэмпирические выражения, связанные с безразмерным временем релаксации $\tau^+ = u_*^2 \tau_p / \nu_T$. Как правило, это степенные зависимости вида $u_t^+ = u_t / u_* = A(\tau^+)^2$, где A – эмпирический коэффициент.

Наибольшие применения получили выражения В.П. Медникова [22]:

при $\mu_p^2 \tau^+ \leq 16,6$, $u_t^+ = 7,25 \cdot 10^{-4} \left[\tau^+ / (1 + \omega_E \tau_p) \right]^2$;

при $\mu_p^2 \tau^+ > 16,6$, $u_t^+ = 0,2$; где $u_t^+ = u_t / u_*$; $\mu_p = 1 / (1 + \omega_E \tau_p)^{0,5}$.

Уравнение (2) при известных значениях $D_{Tq}(y)$ и u_t может решаться численно с заданными граничными условиями. Результаты решения даны в работах [21, 25, 26].

Представленные выражения для u_t^+ получены для вертикальных каналов при развитом турбулентном режиме движения аэрозольных систем. В хаотичном насадочном слое извилистость каналов для прохождения газа можно учесть за счет поправки Дэвисона $k = \pi / 2$. Тогда для насадочного слоя запишем $\bar{u}_t^+ = \pi u_t^+ / 2$.

Упрощенная модель (Simplified model)

В аппаратах химической технологии получили применение комбинированные, структурные и поликанальные математические и другие модели, которые применяются для инженерных расчетов массообменных аппаратов с двухфазными средами (насадочные, барботажные и другие) [20, 21].

Рассмотрим применение поликанальной модели для расчета насадочного газосепаратора аэрозолей с учетом неравномерного (неоднородного) профиля скорости газа в слое хаотичной насадки. Неравномерность скорости газа может быть вызвана как условиями подачи в аппарат и неоднородностью размещения контактных элементов.

Известно [19, 20], что у стенок аппарата порозность (удельный свободный объем) меньше, чем в центре. Это вызывает повышенную скорость газа в пристенной области, чем в центре аппарата. Такие неравномерности могут достигать $w_{\text{гм}} / w_{\text{го}}$ от 1,2 до 2,2, где $w_{\text{гм}}$ – максимальное значение скорости в локальной области, м/с; $w_{\text{го}}$ – средняя скорость в насадочном слое, м/с. Отношение $w_{\text{гм}} / w_{\text{го}}$ иногда называют коэффициентом неравномерности. Экспериментальные данные профиля скорости представлены на рисунках 1 и 2 [19].

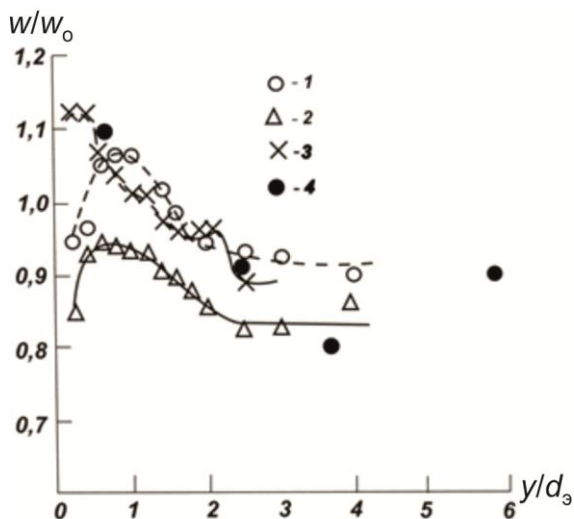


Рис. 1. Профили скорости в аппарате, загруженном различными насадками: 1 – кольца Рашига; 2 – насадка типа N1; 3 – насадка типа MS; 4 – кольца Рашига [12]

Fig. 1. Speed profiles in a machine loaded with various nozzles: 1 – Raschig rings; 2 – nozzle type N1; 3 – nozzle type MS; 4 – Raschig rings

*Источник (Source): Fei Zhang, Youyu Lu, Shaoyan Zhu, Funian Han, Guanghua Wen, Ping Tang, Zibing Hou. Mathematical model and numerical investigation of the influence of spray drying parameters on granule sizes of mold powder. Particuology Volume 85, February 2024, Pages 280-295

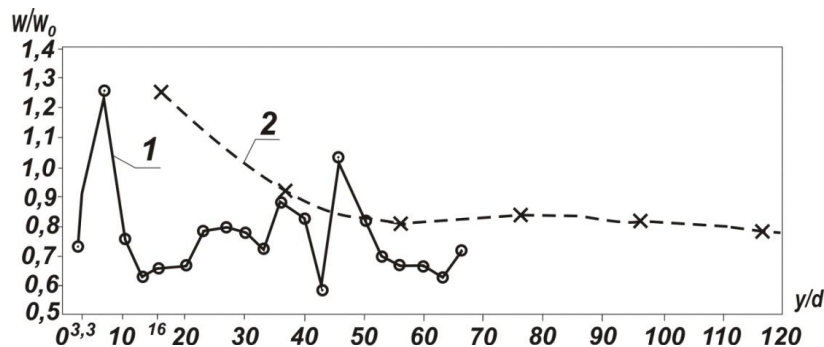


Рис. 2. Безразмерные профили скорости в аппаратах большого размера при обычной загрузке по данным [12]: 1 – $D/d=133.3$ – Клёнова; 2 – $D/d=280$ – Попова

Fig. 2. Dimensionless speed profiles in large devices with normal loading according to [12]: 1 – $D/d=133.3$ – Klenova; 2 – $D/d=280$ – Popova

*Источник (Source): Fei Zhang, Youyu Lu, Shaoyan Zhu, Funian Han, Guanghua Wen, Ping Tang, Zibing Hou. Mathematical model and numerical investigation of the influence of spray drying parameters on granule sizes of mold powder. Particuology Volume 85, February 2024, Pages 280-295

Известно, что неравномерности распределения фаз значительно снижают эффективность как теплообменных, так и сепарационных процессов.

Для математического моделирования профилей концентраций дисперсной фазы в газах и расчета локальной и средней эффективности разделения аэрозольных систем представим насадочный слой в виде параллельных каналов по высоте (рис. 3). Используем одномерные уравнение массопереноса частиц с источниками массы. В каждом канале в зависимости от профиля скорости газа вычисляются соответствующие значения коэффициента турбулентной диффузии частиц $D_{\text{тч}}$ и источник массы R_c .

Следует отметить, что в канале (аппарате) заполненным хаотичными элементами (насадкой) турбулентный режим начинается уже при $Re_r > 40$ [20].

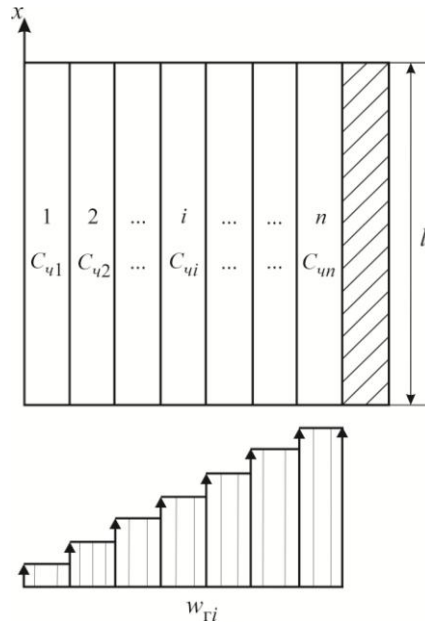


Рис 3. Условное деление насадочного слоя ряд параллельных каналов Fig 3. Conditional division of the packing layer a number of parallel channels

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Уравнения массопереноса частиц в ядре потока аэрозольной системы для i -го канала имеет вид:

$$w_{ri} \frac{dC_{qi}}{dx} = D_{\tau qi} \frac{d^2 C_{qi}}{dx^2} + R_{qi}, \quad (4)$$

$i = 1, 2, \dots, n$; n – число каналов (рис. 3).

При решении задачи совместного «мокрого» охлаждения газа с сепарацией дисперсной фазы аналогичные уравнения записываются для теплообмена между газовой и жидкой фазами и массообмена влаги.

Уравнение (4) решается при $x = 0$, $w_{ri} = w_{rni}$; $C_{ri} = C_{rn}$: при $x = l$, $dC_q / dx = 0$; C_{rn} принимается средней по сечению перед входом в слой.

На выходе из насадочного слоя усреднения концентрация частиц будет равна

$$\bar{C}_{гк} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{ri} C_{ri})}{V_r}, \quad (5)$$

где V_r – объемный расход газа, m^3/c .

Локальная эффективность сепарации в канале и всего насадочного слоя будет

$$\eta_i = \frac{C_{rn} - C_{ri}}{C_{rn}}, \quad \eta = \frac{C_{rn} - \bar{C}_{гк}}{C_{rn}}. \quad (6)$$

Средний коэффициент турбулентной диффузии частиц в ядре газовой фазы на основе выражения (3) для хаотичной насадки записывается в виде [21, 25]

$$D_{\tau qi} = \frac{3,86 v_r \sqrt{\xi_i Re_{ri}}}{1 + \omega_{Ei} \tau_p}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (7)$$

где $Re_{ri} = w_{ri} d_3 / v_r$ – число Рейнольдса в канале; d_3 – эквивалентный диаметр насадки, м; ξ_i – коэффициент гидравлического сопротивления канала, $\xi_i = f(Re_{ri})$ вычисляется по эмпирическим выражения в зависимости вида и характеристик насадки [19, 20].

Расчет средней динамической скорости u_{*ri} для вычисления ω_{Ei} и u_{li} по выражению для хаотичной насадки ($Re_r > 40$) [21, 25]:

$$u_{*i} = 1,56 w_{ri} (\xi_i / Re_{ri})^{0,25}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

Дифференциальное уравнение (4) решается численно методом прогонки при

заданных начальных условиях и вычисленных значениях D_{Tqi} и R_{qi} , $i=1,2,\dots,n$. Результаты решения уравнения (4) с учетом неравномерного профиля скорости газа даны ниже.

Результаты решения (The results of the decision)

В качестве примера использована трехканальная модель сепарации мелких капель воды ($d_q = 5$ мкм) из воздуха при средней скорости воздуха $w_T = 6$ м/с и высоте насадки $H = 1,0$ м. Рассматривается симметрическая задача от оси симметрии до стенки (т.е. от $r = 0$, до $r = R$). Каналы имеют одинаковую ширину, равную R/n ($n=3$). Для наглядности принято в канале ($i=1$) у оси симметрии скорость воздуха $w_{1r} = 3$ м/с, в центральном канале ($i=2$) $w_{2r} = 6$ м/с, в канале у стенки ($i=3$) $w_{3r} = 9$ м/с.

Таким образом, коэффициент неравномерности профиля скорости газа в канале у оси симметрии составляет $w_r/w_o = 0,5$, в среднем канале $w_{2r}/w_o = 1,0$ и у стенки $w_{3r}/w_o = 1,5$. Принимается, что насадка распределена в объеме слоя однородно, однако математическая модель позволяет учесть и неоднородность распределения поверхности в аппарате за счет локальной удельной поверхности в каналах.

Результаты решения (4) в виде безразмерных профилей C_i/C_n по высоте каналов даны на рисунках 4 и 5. На рисунке 4 насадка из металлических колец Рашига 50 мм, на рисунке 5 из колец 25 мм. Очевидно, что чем меньше размер элемента насадки, тем более удельная поверхность a_v (кольца 50 мм, $a_v = 110 \text{ м}^2/\text{м}^3$; 25 мм, $a_v = 220 \text{ м}^2/\text{м}^3$;) и происходит более резкое падение профиля концентрации частиц по длине и выше эффективность сепарации. Причем, чем меньше скорость воздуха в канале, тем ниже эффективность разделения аэрозолей. Это связано с зависимостью коэффициента скорости турбулентной миграции u_t мелких капель от скорости газа, т.е. $u_t \sim w_r^4$, что указывает на турбулентно-инерционный механизм переноса. В насадке из колец 50 мм эффективность сепарации в первой зоне (канале, где $w_r = 3$ м/с) эффективность составляет $\eta_1 = 0,118$. Во втором канале при $w_r = 6$ м/с $\eta_2 = 0,585$, и в третьем у стенки при $w_r = 9$ м/с $\eta = 0,852$. Средняя эффективность сепарации при таких неравномерностях составляет $\eta = 0,518$. При равномерном профиле скорости, равным средней скорости в колонне (т.е. $w_r = 6$ м/с) эффективность сепарации как в среднем канале, т.е. $\eta = 0,585$. Отсюда следует, что с учетом неравномерностей средняя эффективность разделения в газосепараторе с кольцами 50 мм снижается на 12% относительных при высоте насадочного слоя $H = 1,0$ м.

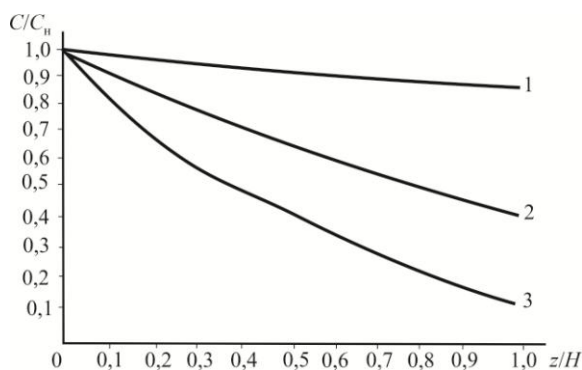


Рис. 4. Профили концентрации аэрозольных частиц воды диаметром 5 мкм ($\rho_{ж} = 10^3 \text{ кг/м}^3$) в воздухе в трех сечениях насадочного газосепаратора с кольцами Рашига 50 мм по высоте слоя: кривые 1 – в центре аппарата ($i=1$); 2 – при $i=2$ и 3 – при $i=3$ (у стенки). Скорости газа в каналах 1 – $w_{1r} = 3$ м/с; 2 – $w_{2r} = 6$ м/с и 3 – $w_{3r} = 9$ м/с

Fig. 4. Profiles of the concentration of aerosol water particles with a diameter of 5 microns ($\rho_j = 10^3 \text{ kg/m}^3$) in the air in three sections of a nozzle gas separator with Raschig rings of 50 mm in layer height: curves 1 – in the center of the apparatus ($i=1$); 2 – at $i=2$ and 3 – at $i=3$ (at the wall). Gas velocities in channels 1 – $w_{1g} = 3$ m/s; 2 – $w_{2g} = 6$ m/s and 3 – $w_{3g} = 9$ m/s

*Источник (Source): Fei Zhang, Youyu Lu, Shaoyan Zhu, Funian Han, Guanghua Wen, Ping Tang, Zibing Hou. Mathematical model and numerical investigation of the influence of spray drying parameters on granule sizes of mold powder. Particuology Volume 85, February 2024, Pages 280-295

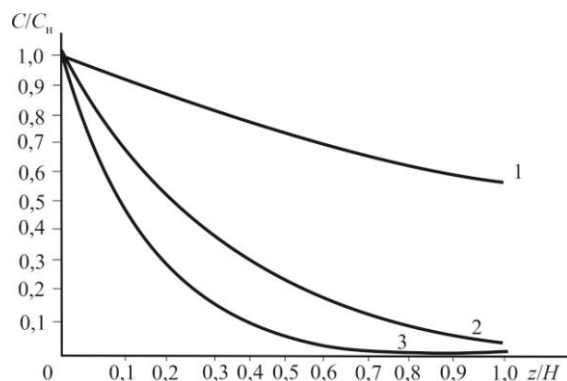


Рис. 5. Профили концентрации частиц по высоте слоя для насадки из колец Рашига 25 мм – кривые 1 – в центре аппарата; при $i = 1$; 2 – при $i = 2$ и 3 – $i = 3$. Скорость газа 1 – $w_{1r} = 3$ м/с; 2 – $w_{2r} = 6$ м/с и 3 – $w_{3r} = 9$ м/с

Fig. 5. Profiles of particle concentration by layer height for a nozzle made of Raschig rings of 25 mm – curves 1 – in the center of the apparatus; at $i = 1$; 2 – at $i = 2$ and 3 – $i = 3$. Gas velocity 1 – $w_{1g} = 3$ m/s; 2 – $w_{2g} = 6$ m/s and 3 – $w_{3g} = 9$ m/s

*Источник (Source): Fei Zhang, Youyu Lu, Shaoyan Zhu, Funian Han, Guanghua Wen, Ping Tang, Zibing Hou. Mathematical model and numerical investigation of the influence of spray drying parameters on granule sizes of mold powder. Particuology Volume 85, February 2024, Pages 280-295

В аппарате с насадкой 25 мм при $H = 1,0$ м эффективность в каналах составляет $\eta_1 = 0,488$; $\eta_2 = 0,970$; $\eta_3 = 0,9998$. Средняя эффективность с учетом неравномерностей $\eta = 0,819$, при равномерном профиле скорости $\eta = 0,970$, т.е. снижение составляет 18 %. Средняя эффективность сепарации, с учетом неравномерностей также зависит от высоты насадочного слоя.

На рисунке 6 представлены результаты расчета при высоте слоя от 0,5 до 2,0 м. Установлено, что для насадки 50 мм при $H = 2,0$ м снижение эффективности составляет около 33%, при $H = 0,5$ м – около 5%. Для насадки 25 мм снижение эффективности сепарации от 11% ($H = 2,0$ м) до 18% ($H = 0,5$ м).

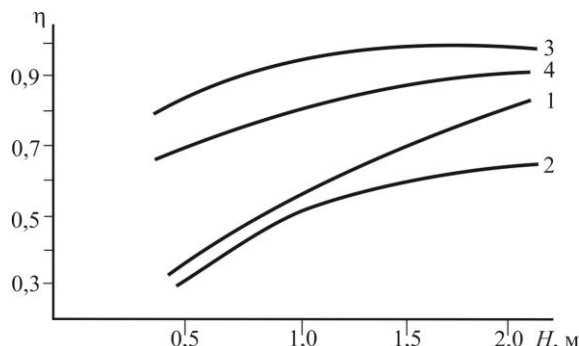


Рис. 6. Зависимость эффективности сепарации аэрозолей ($d_p = 5$ мкм) от высоты насадочного слоя. 1, 2 – кольца Рашига 50 мм; 3, 4 – 25 мм. 1, 3 – равномерное распределение газа; 2, 4 – неравномерный профиль скорости: в зоне у стенки $w_m / w_0 = 1,5$ в центре $w_m / w_0 = 0,5$. Средняя скорость газа $w_r = 6$ м/с

Fig.6 Dependence of aerosol separation efficiency on the height of the packing layer. 1.2 – Raschig rings of 50 mm; 3.4 – 25 mm. 1-3 – uniform distribution of gas; 2.4 – uneven velocity profile: in the zone near $w_m / w_0 = 1,5$ the wall in the center $w_m / w_0 = 0,5$. Average gas velocity $w_r = 6$ m/s

*Источник (Source): Fei Zhang, Youyu Lu, Shaoyan Zhu, Funian Han, Guanghua Wen, Ping Tang, Zibing Hou. Mathematical model and numerical investigation of the influence of spray drying parameters on granule sizes of mold powder. Particuology Volume 85, February 2024, Pages 280-295

Таким образом, установлено, что при неравномерном профиле скорости газа снижение эффективности процесса также зависит и от высоты слоя насадки. Повышенная скорость газа в пристенной области аппарата (рис. 1-2) может быть вызвана как неравномерной подачей газа в нижней части аппарата, а также главным образом пониженной порозностью насадки у стенки. Отсюда следует, что в пристенной области удельная поверхность меньше, чем средняя по всему объему, что можно учесть за счет источника массы в правой части уравнения (4). Тогда эффективность сепарации будет ниже чем представлено в расчетах. Учет такого вида неоднородностей является

отдельным предметом исследований.

Заключение (Conclusions)

В результате выполненных исследований с применением разработанной поликанальной математической модели в виде системы одномерных дифференциальных уравнений массопереноса частиц, установлено влияние неоднородного профиля скорости аэрозольной системы в хаотичной насадке на эффективность очистки газов от жидких аэрозольных частиц. Получено, что снижение эффективности разделения зависит не только от неоднородного профиля скорости газа, но и от размера элементов хаотичной насадки, а также от высоты слоя. При увеличении размера насадки влияние неравномерностей усиливается, как и при повышении высоты хаотичного слоя. Так максимальное снижение эффективности процесса разделения на 33% установлено для колец 50 мм при высоте слоя 2 метра. Для насадки из колец 25 мм снижение эффективности в два раза меньше. Разработанная математическая модель и методика расчета может применяться при проектировании или модернизации газосепараторов и скрубберов – охладителей насадочного типа.

Литература

1. Бирюков А.Б., Лебедев А.Н., Каминский К.Д. Использование комбинированных устройств глубокого охлаждения дымовых газов на водогрейных котлах системы ЖКХ // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. 2024. № 1. С. 69-81.
2. Платонов Н.И. Расчет теплообмена между газом и свободной жидкостной пленкой в контактом теплообменнике // Теплоэнергетика. 2008. № 3. С. 18-23.
3. Алешин В.И., Рубан В.С., Сазоненко В.М. Ресурсосберегающие способы охлаждения сжимаемого газа // Известия вузов. 2020. Пищевая технология. №1 (373) с. 73-77.
4. Хайбулов Р.А. Исследование гидродинамических характеристик контактного устройства массообменного аппарата с направленным вводом газа // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2024. № 1(20) с. 231-238.
5. Широков В.А., Орлова М.Н. Методика расчета эффективности использования теплоты продуктов сгорания природного газа в контактных теплообменниках // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2023. №1 (310) с. 50-54.
6. Покрышкин К.В. и др. Современные схемы конечного охлаждения коксового газа // Кокс и химия. 2024. №8. с.26-35.
7. Бахронов Х.Ш., Ганиева С.У. Ход развития аппаратов для очистки газов от пыли // Journal of agvanes in engineering technology. 2022. №2. с. 33-38.
8. Орлов А.О., Чернушевич Е.Э., Макамович С.С., Лепетило С.И. Очистка дымовых газов от оксида азота и угольной пыли // Современные достижения научно-технического прогресса. 2023. №2(7). С.14-18.
9. Маслובитов М.В., Козлов Д.А., Булгаков Д.М., Рязанцева А.В. Методы очистки от угольной пыли уходящих газов на ТЭЦ // Тенденции развития науки и образования. 2021. № 73-3. С. 104-109.
10. Karimov L., Qo'choarov B. Resistan coefficients the apparatus with mesh wet cleaning of gust gases // Fergana Polytechie Instute. 2023. № 1-5 (106). С. 8-13.
11. D. Dorhjie, D. Pereponov, T. Aminev, A. Gimazov, D. Khamidullin, D. Kuporosoov, M. Tarkhov1, A. Rykov, I. Filippov, E. Mukhina, E. Shilov, P. Grishin and A. Cheremisin. Kinetics of Phase Separation and Saturation Profile of Gas Condensates: a Microfluidic and Numerical Analysis // European Association of Geoscientists & Engineers 85th EAGE Annual Conference & Exhibition (including the Workshop Programme), Jun 2024, Volume 2024, p.1 – 5.
12. Fei Zhang, Youyu Lu, Shaoyan Zhu, Funian Han, Guanghua Wen, Ping Tang, Zibing Hou. Mathematical model and numerical investigation of the influence of spray drying parameters on granule sizes of mold powder. Particuology Volume 85, February 2024, Pages 280-295
13. Vasył Mykhailiuk, Michał Zasadzień, Mikhailo Liakh, Ruslan Deineha, Yurii Mosora and Oleh Faflei. Analysis of the Possibility of Modeling Gas Separators using Computational Fluid Dynamics // Management Systems in Production Engineering Volume 32 (2024): Issue 1 (March 2024)
14. Lele Yang a, Xiaodong Chen a, Chengyu Huang a, Sen Liu b, Bo Ning c, Kai Wang b A review of gas-liquid separation technologies: Separation mechanism, application scope, research status, and development prospects // Chemical Engineering Research and Design. Volume 201, January 2024, Pages 257-274.
15. O. Liaposhchenko et al., "Improvement of Parameters for the Multi-Functional Oil-Gas Separator of "HEATER-TREATER" Type," 2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), Tokyo, Japan, 2019, pp. 66-71.

16. Эффективность прямоугольного сепаратора в зависимости от оформления элементов внутри аппарата / А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева, В. Л. Нгуен // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2018. – Т. 10, № 1(37). – С. 74-81.
17. Сравнение технических характеристик мультивихревого сепаратора с циклонами различных модификаций / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, Р. Я. Биккулов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 117-127.
18. Сокол, Б. А., Чернышев А. К., Баранов. Д. А. Насадки массообменных колонн : – Москва : Галилея-принт, 2009. – 358 с.
19. Контактные насадки промышленных тепломассообменных аппаратов: монография / А. М. Каган, А. Г. Лаптев, А. С. Пушнов, М. И. Фарахов / под ред. А. Г. Лаптева. – Казань: Отечество, 2013. – 454 с.
20. Витковская, Р. Ф. Аэродинамика и тепломассообмен насадочных аппаратов / Р. Ф. Витковская, А. С. Пушков, С. Шинкунас. — Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 288 с.
21. Лаптев А. Г., Башаров М. М., Лаптева Е. А. Математические модели и методы расчетов тепломассообменных и сепарационных процессов в двухфазных средах : – Казань : КГЭУ; Старый Оскол : ТНТ, 2021. – 288 с.
22. Медников, Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей: монография / Е. П. Медников. – Москва : Наука, 1980. – 176 с.
23. Сугак, Е. В., Войнов Н. А., Николаев Н. А. Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами // Сибирская аэрокосмическая акад., Сибирский гос. технологический ун-т, Казанский гос. технологический ун-т. - 2-е изд. - Казань : Отечество, 2009. - 222 с.
24. Снижение потерь масла в компрессорных установках при охлаждении и перекачивании природного газа. Часть 1. Описание технологической схемы и математическая модель процесса / Т. Ф. Кадыров, А. А. Касьяненко, А. Г. Лаптев [и др.] // Газовая промышленность. – 2023. – № 9(854). – С. 72-80.
25. Лаптев, А.Г. Гидромеханические процессы в аппаратах химической технологии. учебно-справочное пособие для вузов / А.Г. Лаптев – Санкт-Петербург: Лань, 2024 – 592 с.
26. Laptev A.G., Lapteva E.A., Basharov M.M. Separation and energy efficiency of packed apparatuses for purifying gases from aerosols // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2017. Т. 51. № 5. С. 639-646.

Авторы публикации

Лаптева Елена Анатольевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6811-6219>. Email: grivka100@mail.ru

Сеймур Ульви Оглы Аласгарли – аспирант кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» (ИЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. ORCID <https://orcid.org/0009-0003-4393-2756>. Email: sem_aleskerli@mail.ru

Клочкова Валентина Александровна – аспирант, инженер 1 категории кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» (ИЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. ORCID <https://orcid.org/0009-0003-6560-9757> Email: klochkova.valentinka@mail.ru

References

1. Biryukov A.B., Lebedev A.N., Kamensky K.D. Application of combined devices for deep cooling of flue gases on hot water boilers of the housing and communal services system // Bulletin of Donetsk National University. Series G: Technical Sciences. 2024. No. 1. pp. 69-81.
2. Platonov N.I. Calculation of heat and mass transfer between a gas and a free liquid film in a contact heat exchanger// Thermal power engineering. 2008. No. 3. pp. 18-23.
3. Aleshin V.I., Ruban V.S., Sazonenko V.M. Resource-saving methods of cooling compressed gas// News of universities. 2020. Food technology. No.1 (373) pp. 73-77.
4. Khaibulov R.A. Investigation of the hydrodynamic characteristics of the contact device of a mass transfer apparatus with directional gas input // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. 2024. No. 1(20) pp. 231-238.

5. Shirokov V.A., Orlova M.N. Methodology for calculating the efficiency of using the heat of natural gas combustion products in contact heat exchangers // Environmental protection in the oil and gas complex. 2023. No.1 (310) pp. 50-54.
6. Pokryshkin K.V. et al. Modern schemes of final cooling of coke oven gas // Coke and chemistry. 2024. No.8. pp.26-35.
7. Bakhronov H.Sh., Ganieva S.U. The course of development of devices for cleaning gases from dust // Journal of agvanes in engineering technology. 2022.No.2. pp. 33-38.
8. Orlov A.O., Chernushevich E.E., Makamovich S.S., Lepetilo S.I. Purification of flue gases from nitrogen oxide and coal dust // Modern achievements of scientific and technical progress. 2023. No.2(7). pp.14-18.
9. Maslobitov M.V., Kozlov D.A., Bulgakov D.M., Ryazantseva A.V. Methods of cleaning exhaust gases from coal dust at CHP plants // Trends in the development of science and education. 2021. No. 73-3. pp. 104-109.
10. Karimov L., Qo'choarov B. Resistan coefficients the apparatus with mesh wet cleaning of gust gases // Fergana Polytechie Instute. 2023. № 1-5 (106). C. 8-13.
11. D. Dorhjie, D. Pereponov, T. Aminev, A. Gimazov, D. Khamidullin, D. Kuporosoov, M. Tarkhov1, A. Rykov, I. Filippov, E. Mukhina, E. Shilov, P. Grishin and A. Cheremisin. Kinetics of Phase Separation and Saturation Profile of Gas Condensates: a Microfluidic and Numerical Analysis // European Association of Geoscientists & Engineers 85th EAGE Annual Conference & Exhibition (including the Workshop Programme), Jun 2024, Volume 2024, p.1 – 5.
12. Fei Zhang, Youyu Lu, Shaoyan Zhu, Funian Han, Guanghua Wen, Ping Tang, Zibing Hou. Mathematical model and numerical investigation of the influence of spray drying parameters on granule sizes of mold powder. Particuology Volume 85, February 2024, Pages 280-295
13. Vasyl Mykhailiuk, Michał Zasadzień, Mikhaïlo Liakh, Ruslan Deineha, Yurii Mosora and Oleh Faflei. Analysis of the Possibility of Modeling Gas Separators using Computational Fluid Dynamics // Management Systems in Production Engineering Volume 32 (2024): Issue 1 (March 2024)
14. Lele Yang a, Xiaodong Chen a, Chengyu Huang a, Sen Liu b, Bo Ning c, Kai Wang b A review of gas-liquid separation technologies: Separation mechanism, application scope, research status, and development prospects // Chemical Engineering Research and Design. Volume 201, January 2024, Pages 257-274.
15. O. Liaposhchenko et al., "Improvement of Parameters for the Multi-Functional Oil-Gas Separator of "HEATER-TREATER" Type," 2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), Tokyo, Japan, 2019, pp. 66-71.
16. The efficiency of a rectangular separator depending on the design of the elements inside the apparatus / A.V. Dmitriev, V. E. Zinurov, O. S. Dmitrieva, V. L. Nguyen // Bulletin of the Kazan State Energy University. - 2018. – Vol. 10, No. 1(37). – pp. 74-81.
17. Comparison of the technical characteristics of a multi-vortex separator with cyclones of various modifications / V. E. Zinurov, A.V. Dmitriev, R. Ya. Bikkulov [et al.] // Izvestia of higher educational institutions. Energy problems. – 2023. – Vol. 25, No. 3. – pp. 117-127.
18. Sokol, B. A., Chernyshev A. K., Baranov. D. A. Nozzles of mass transfer columns : – Moscow : Galilee-print, 2009. – 358 p.
19. Contact nozzles of industrial heat and mass transfer devices: monograph / A.M. Kagan, A. G. Laptev, A. S. Pushnov, M. I. Farakhov / edited by A. G. Laptev. – Kazan: Fatherland, 2013. – 454 p.
20. Vitkovskaya, R. F. Aerodynamics and heat and mass transfer of nozzle devices / R. F. Vitkovskaya, A. S. Pushkov, S. Shinkunas. — St. Petersburg : Lan, 2019. – 288 p.
21. Laptev A. G., Basharov M. M., Lapteva E. A. Mathematical models and calculation methods of heat and mass transfer and separation processes in two-phase media : – Kazan : KGEU; Stary Oskol : TNT, 2021. – 288 p.
22. Mednikov, E. P. Turbulent transport and aerosol deposition: monograph / E. P. Mednikov. – Moscow : Nauka, 1980. – 176 p.
23. Sugak, E. V., Voynov N. A., Nikolaev N. A. Purification of gas emissions in devices with intensive hydrodynamic regimes // Siberian Aerospace Academy, Siberian State Technological University, Kazan State Technological University - 2nd ed. - Kazan : Fatherland, 2009. - 222 p.
24. Reduction of oil losses in compressor units during cooling and pumping of natural gas. Part 1. Description of the technological scheme and mathematical model of the process / T. F. Kadyrov, A. A. Kasyanenko, A. G. Laptev [et al.] // Gas industry. – 2023. – № 9(854). – Pp. 72-80.
25. Laptev, A.G. Hydromechanical processes in chemical technology devices. educational reference manual for universities / A.G. Laptev – St. Petersburg: Lan, 2024 – 592 p.
26. Laptev A.G., Lapteva E.A., Basharov M.M. Separation and energy efficiency of packed apparatuses for purifying gases from aerosols // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2017. T. 51. № 5. C. 639-646.

Authors of the publication

Elena A. Lapteva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6811-6219> Email: grivka100@mail.ru

Seymur Ulvi Ogly Alasgarli – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4393-2756> Email: sem_aleskerli@mail.ru

Valentina A. Klochkova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6560-9757> Email: klochkova.valentinka@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **26.11.2024 г.**

Отредактировано **06.12.2024 г.**

Принято **17.01.2025 г.**