

Особенности улавливания частиц дисперсной фазы при разделении дымовых газовых потоков перфорированными фильтровальными перегородками

Дмитрий С. Процко	¹	protsko_dmitriy@mail.ru	 0000-0002-1976-0080
Сергей Ю. Панов	¹	su-panov@yandex.ru	 0000-0003-2257-8180
Елена А. Шипилова	¹	elen_ship@list.ru	 0000-0003-1050-036X
Олег М. Белых	²	ranorien@gmail.ru	 0000-0002-2605-3077
Анатолий А. Хвостов	³	khvtol1974@yandex.ru	 0000-0002-3836-9407

¹ Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, 394064, Россия

² ООО "АТОС АЙТИ СОЛЮШЕНС ЭНД СЕРВИСЕЗ", пр-т Труда, 65, Воронеж, 394026, Россия

³ Воронежский государственный технический университет, ул. 20-летия Октября, 84, Воронеж, 394006, Россия

Аннотация. Вектор развития промышленности на современном этапе связан с дальнейшим ростом энергетических потребностей, что связано с модернизацией действующего и разработкой нового энергоэффективного генерирующего оборудования. Значительную долю в энергетическом балансе до сих пор занимают энергетические установки, использующие сжигание топлива и имеющие значительные экологические издержки. Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования механизмов улавливания частиц дымовых газов энергетических установок перфорированными фильтровальными перегородками с целью снижения нагрузки выбросов на атмосферу. Систематизированы и предложены формулы для расчета коэффициента улавливания при действии различных механизмов улавливания частиц. Определена доминирующая роль инерционного механизма улавливания (η_{stk}) в начале процесса фильтрования и эффекта зацепления (η_R) в последующей стадии. Вопросы формирования слоя осадка требуют учета адгезионных свойств материалов (параметр T) и введения эффективного коэффициента Стокса (Stk_{eff}). Отмечена особая роль для увеличения эффективности осаждения частиц дымовых газов при действии электростатического поля (η_E). В перспективе полученные результаты исследований могут быть использованы при разработке и проектировании комбинированных газоочистных аппаратов, использующих совместное действие фильтрования и действия электростатического поля.

Ключевые слова: дымовые газы, механика аэрозолей, электростатическое осаждение, перфорированная решетка, фильтрование

Specificity of separate dispersed phase particles from flue gas flows by perfo-rated filter barrier

Dmitrij S. Protsko	¹	protsko_dmitriy@mail.ru	 0000-0002-1976-0080
Sergey Yu. Panov	¹	su-panov@yandex.ru	 0000-0003-2257-8180
Elena A. Shipilova	¹	elen_ship@list.ru	 0000-0003-1050-036X
Oleg M. Belykh	²	ranorien@gmail.ru	 0000-0002-2605-3077
Anatoliy A. Khvostov	³	khvtol1974@yandex.ru	 0000-0002-3836-9407

¹ N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, Staryh Bolshevikov street, 54a, Voronezh, 394064, Russia

² ATOS IT Solutions and Services, Truda, 65, Voronezh 394026, Russia

³ Voronezh State Technical University, 20 year October street, 84, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The vector of industrial development at the present stage is associated with a further increase in energy needs, which is associated with the modernization of existing and the development of new energy-efficient generating equipment. A significant share in the energy balance is still occupied by power plants that use fuel combustion and have significant environmental costs. The results of a theoretical and experimental study of the mechanisms of trapping flue gas particles of power plants by perforated filter baffles in order to reduce the load of emissions on the atmosphere are presented. Formulas for calculating the trapping coefficient under the action of various particle trapping mechanisms are systematized and proposed. The dominant role of the inertial trapping mechanism (η_{stk}) at the beginning of the filtration process and the gearing effect (η_R) in the subsequent stage is determined. The issues of formation of the sediment layer require taking into account the adhesive properties of materials (parameter T) and the introduction of an effective Stokes coefficient (Stk_{eff}). A special role is noted for increasing the efficiency of deposition of flue gas particles under the action of an electrostatic field (η_E). In the future, the obtained research results can be used in the development and design of combined gas cleaning devices using the combined action of filtration and the action of an electrostatic field.

Keywords: flue gases, aerosol mechanics, electrostatic deposition, perforated grating, filtration

Для цитирования

Процко Д.С., Панов С.Ю., Шипилова Е.А., Белых О.М., Хвостов А.А. Особенности улавливания частиц дисперсной фазы при разделении дымовых газовых потоков перфорированными фильтровальными перегородками // Вестник ВГУИТ. 2021. Т. 83. № 4. С. 295–301. doi:10.20914/2310-1202-2021-4-295-301

For citation

Protsko D.S., Panov S.Yu., Shipilova E.A., Belykh O.M., Khvostov A.A. Specificity of separate dispersed phase particles from flue gas flows by perfo-rated filter barrier. *Vestnik VGUET* [Proceedings of VSUET]. 2021. vol. 83. no. 4. pp. 295–301. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2021-4-295-301

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Развитие химической промышленности связано с большими затратами энергии, что ставит задачи как рационального использования уже сгенерированной энергии, так и расширение способов ее получения, например через использование нетрадиционных видов топлива.

Современные энергетические установки, использующие в качестве источника энергию сгорания различного вида топлива, характеризуются наличием выбросов в атмосферу продуктов сгорания, представляющих собой сложную аэродисперсную систему (аэрозоль), включающую твердые частицы, отрицательно влияющие на экологическую обстановку в местах размещения установок.

В качестве оборудования очистки газов от твердой дисперсной фазы применяют

аппараты инерционного действия (циклоны, вихревые аппараты), мокрого типа (скрубберы) очистки, а также фильтры различной конструкции (пористые и электрофильтры). Пористые фильтры считаются наиболее эффективными и менее зависящими от изменений параметров дымовых газов и условий эксплуатации [1–4]. Совершенствование фильтровального оборудования идет по пути разработки новых фильтровальных материалов, имеющих уникальные особенности эксплуатации.

Методы

Одним из перспективных фильтровальных материалов для очистки высокотемпературных дымовых газов от твердых частиц являются перфорированные фильтровальные перегородки (рисунок 1), имеющие ряд особенностей применения и действия.

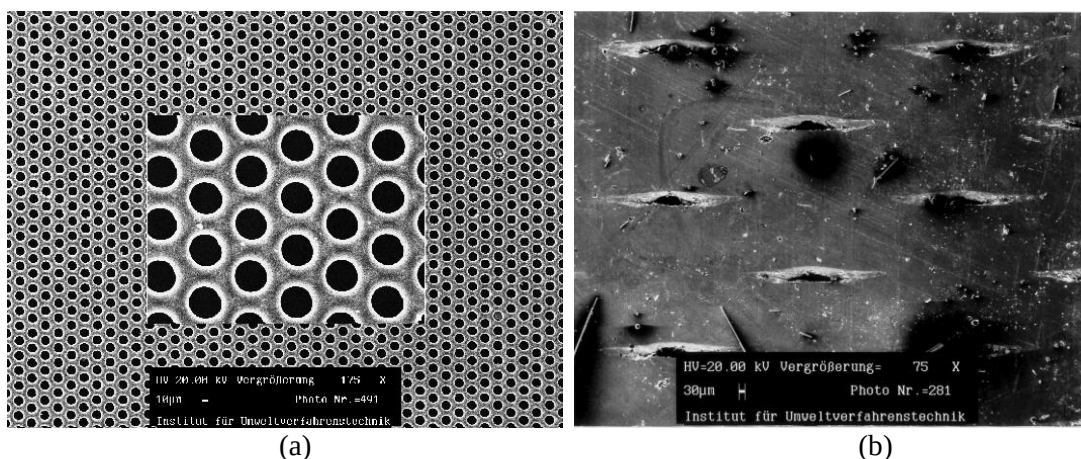


Рисунок 1. Различные формы отверстий перфорированных металлических фильтровальных решеток: (a) – круг, (b) – треугольник

Figure 1. Various shapes of holes of perforated metal filter gratings: (a) – circle, (b) – triangle

В механике аэрозолей степень очистки η рассматривают как функцию нескольких величин эффективности, отражающих действие различных физических эффектов, называемых механизмами улавливания частиц дисперсной фазы [1, 3, 5–8]. Осаждение твердых частиц дымовых газов при их улавливании с помощью фильтровального материала осуществляется под действием механизмов инерции, диффузии, зацепления, гравитационного осаждения, электрических сил и турбулентной миграции (диффузии) [6]:

$$\eta = \eta_{Stk} + \eta_D + \eta_R + \eta_G + \eta_E + \eta_{V_{it}^M} \dots \quad (1)$$

где η_{Stk} – эффективность инерционного действия; η_D – эффективность диффузионного механизма; η_R – эффективность механизма зацепления; η_G – эффективность механизма

гравитационного осаждения; η_E – эффективность действия электростатических сил; $\eta_{V_{it}^M}$ – эффективность действия турбулентной миграции.

Рассмотрим основные механизмы улавливания частиц дисперсной фазы при разделении дымовых газовых потоков перфорированными фильтровальными перегородками.

Силы инерции являются проявлением доминирующего механизма осаждения твердых частиц из потока дымовых газов на перфорированных перегородках [9]. На рисунке 2 показано сравнение действия этого физического эффекта для одиночного волокна тканевого фильтра и отверстий перфорированного фильтровального материала моделирующее характер течения во внешней и внутренней гидродинамических областях [10].

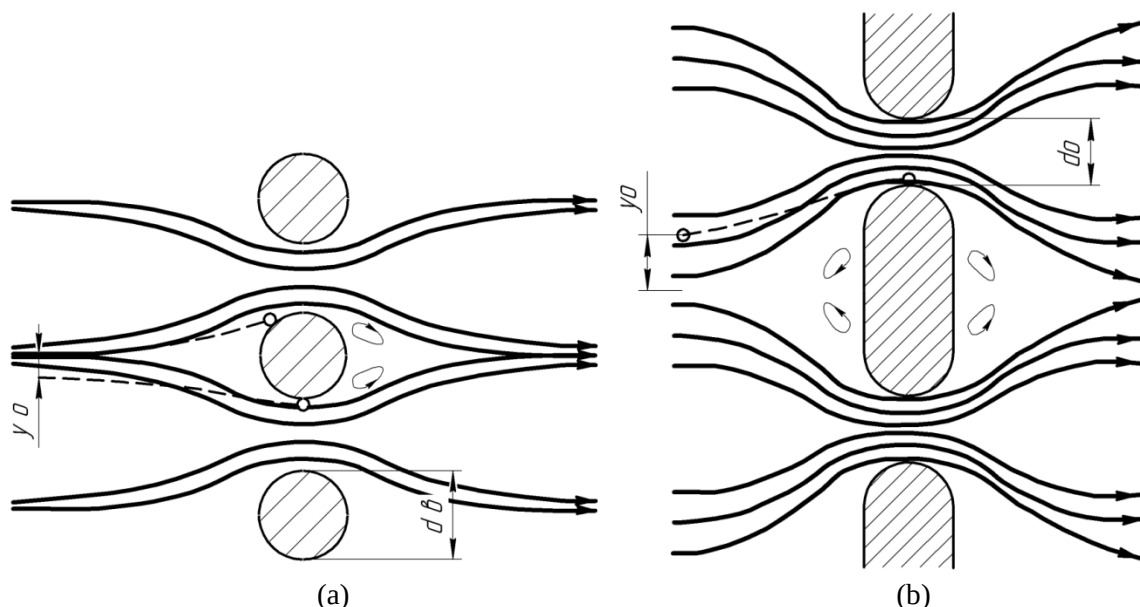


Рисунок 2. Особенности течения потока аэрозоля через тканевый фильтр (а) и через перфорированную перегородку (b)

Figure 2. Features of the aerosol flow flow through a fabric filter (a) and through a perforated partition (b)

Схема показывает различие между линиями тока газа и траектории движущейся твердой частицы. При обтекании волокна при приближении к нему линии тока расширяются, при тчении же через отверстие линии тока стягиваются до диаметра отверстия. При этом происходит частичное торможение потока, частицы не могут строго следовать линии тока за счет инерции собственной массы, они смещаются и, если они находятся в границах, так называемой предельной траектории y_0 , осаждаются на поверхности волокна или перегородки.

Параметр y_0 показывает предельное расстояние между частицами и определяет траекторию, по которой происходит соприкосновение между поверхностью частицы и поверхностью осаждения.

Для оценки влияния отдельных механизмов улавливания на общую степень осаждения в теории механики аэрозолей используют ряд безразмерных коэффициентов, которые для перфорированных металлических фильтровальных перегородок были приведены к соответствующему виду.

Вероятность столкновения частиц дисперсной фазы с поверхностью осаждения определяется параметром инерционного осаждения, характеризующимся критерием Стокса

$$Stk = (d_p^2 v_o \rho_p) / (\mu_g d_o) \quad (2)$$

где d_p – условный диаметр частиц дисперсной фазы, м; ρ_p – плотность частиц, кг/м³; d_o – диаметр отверстия, м; v_o – скорость газового потока при прохождении через отверстие, м/с; μ_g – динамическая вязкость газа, Па·с.

Для отверстий с формой сечения отличной от круга вводится понятие гидравлического диаметра d_z (рисунок 1б)

$$d_z = 4S/\Pi \quad (3)$$

где S – площадь сечения отверстия, Π – смоченный периметр.

По мере накопления осадка на поверхности фильтра осаждаемые частицы удерживаются за счет сил аутогезии (рисунок 3).

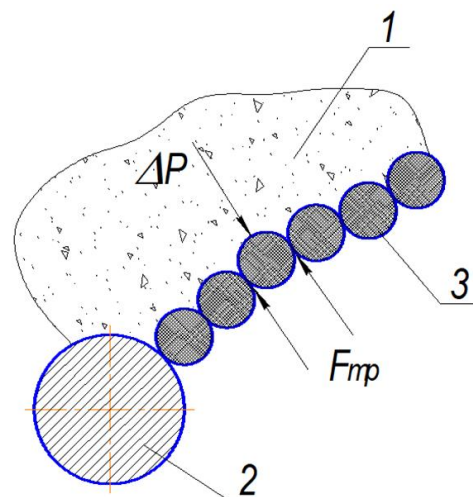


Рисунок 3. Схема напряженного состояния слоя осадка твердых частиц у поверхности фильтровального материала: 1 – поверхностный слой осажденных частиц; 2 – элемент фильтровального материала; 3 – свод из частиц

Figure 3. Diagram of the stress state of the solid particle sediment layer at the surface of the filter material: 1 – a surface layer of deposited particles; 2 – an element of the filter material; 3 – a vault of particles

Расчетное уравнение аутогезионной прочности осадка твердых частиц на поверхности фильтровального материала имеет вид [11]:

$$T = F_{TP} \cdot F(\varepsilon) \cdot Y \cdot \operatorname{tg} \gamma, \quad (4)$$

где F_{TP} – сила трения; $F(\varepsilon)$ – площадь контакта зацепления (зависит от вида упаковки частиц); Y – коэффициент текучести; γ – угол трения частицы.

При этом

$$F_{TP} = \Delta P \cdot \pi d_q^2 / 4, \quad (5)$$

где ΔP – перепад давления на осадке; d_q – диаметр частицы, м.

Величины Y и γ определяются при построении линий предела текучести для конкретной пыли [12].

При этом вводится эффективный коэффициент Стокса

$$Stk_{eff} = T \cdot Stk. \quad (6)$$

Коэффициент осаждения за счет инерционных сил при учете адгезионных сил может быть определен [13]

$$\eta_{Stk} = \frac{Stk_{eff}^{3,55}}{Stk_{eff}^{3,55} + 1,67}. \quad (7)$$

Перфорированная металлическая фольга обладает гладкой поверхностью и равномерной структурой, которые обеспечивают осаждение пыли на поверхности материала, в отличие от фетровых или тканевых фильтровальных материалов, для которых характерно осаждение пыли в толще материала (глубинная фильтрация) с непрерывно меняющимся расположением и размером пор.

На рисунке 4 показана кинетика изменения остаточной концентрации твердых частиц в газе Z_{ϕ} после прохождения фильтровальной перегородки.

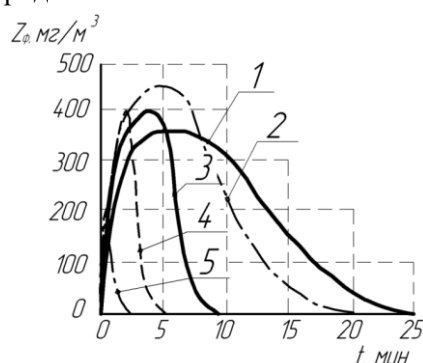


Рисунок 4. Кинетическая зависимости выходной концентрации твердых частиц при различной скорости фильтрации (диаметр отверстий перегородка $d=80$ мкм): 1 – 0,0075 м/с, 2 – 0,01 м/с, 3 – 0,0125 м/с, 4 – 0,015 м/с, 5 – 0,02 м/с

Figure 4. Kinetic dependence of the output concentration of solid particles at different filtration rates (diameter of the partition holes $d = 80$ microns): 1 – 0.0075 m/s, 2 – 0.01 m/s, 3 – 0.0125 m/s, 4 – 0.015 m/s, 5 – 0.02 m/s

Из графиков видно, что за короткий промежуток времени на поверхности фильтровальной перегородки из осажженных частиц образуется элементарный слой – слой автофильтра, представляющий из себя по сути вспомогательную фильтровальную перегородку. В этих условиях доминирующую роль приобретает ситовой эффект, являющийся частным случаем механизма зацепления.

Особенностью перфорированных металлических перегородок является возможность наложения электрического заряда на перегородку и совмещение фильтрации с электрической очисткой. При этом осаждение твердых частиц под действием электростатического заряда растет с увеличением размера частиц и уменьшением скорости их движения и состоит из трех этапов [14–20]:

- электризация и зарядка частиц дымовых газов;
- движение частиц дымовых газов под действием электростатического поля;
- осаждение частиц дымовых газов под действием электростатического поля.

При электростатическом осаждении частицы приобретают в течение всего периода прохождения дымовых газов.

По механизму приобретения заряда выделяют следующие способы зарядки частиц [15]:

- зарядка частиц путем поляризации в электрическом поле между разнополюсными электродами (индукционная зарядка);
- зарядка частиц при осаждении на их поверхности заряженных ионов газов (ионная зарядка).

Ионная зарядка основана на совместном действии механизма ударной ионизации в поле коронного разряда и диффузии ионов на поверхности частиц [1–3, 12, 13], что наиболее эффективно для частиц дымовых газов с радиусом $r < 1$ мкм. При этом основной источник заряда на частицах зависит от величины напряженности электрического поля и поляризации частицы [1,9].

Решение дифференциального уравнения относительного движения частиц позволяет определить момент времени t_0 , через которое частицы, находящиеся друг от друга на расстоянии ρ_0 соприкоснутся:

$$t_0 = \frac{\pi \mu_z \rho_0^5}{10 E^2 r^5} \approx \frac{5 \cdot 10^{-4} \rho_0^5}{E^2 r^5}. \quad (8)$$

где μ_z – кинематическая вязкость дымовых газов; ρ_0 – расстояние между частицами, м; r – радиус частиц дымовых газов, м; E – напряженность электрического поля, Н / Кл.

Таким образом, можно сделать вывод, что механизм движения частиц дымовых газов в электростатическом поле заключается в сближении частиц под действием диффузии на такое расстояние, на котором электрические силы достигают заметной величины, после чего движение частиц приобретает упорядоченный характер.

В корпусе аппарата размещена металлическая перфорированная перегородка, на поверхности которой при движении через неё дымового потока осаждаются твердые частицы. Осаждение состоит из двух стадий: подхода частиц к поверхности и после осаждения удержания их на поверхности перегородки.

Наиболее приемлемым из всех видов электростатического взаимодействия является эффект поляризации при наложении внешнего электростатического поля на перегородку (рисунок 5).

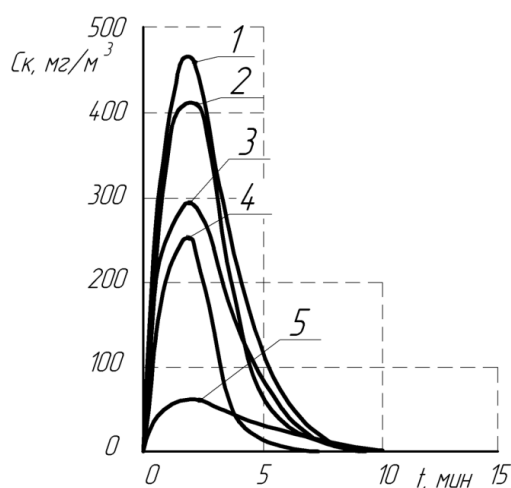


Рисунок 5. Кинетическая зависимости выходной концентрации твердых частиц при различном входном напряжении (диаметр отверстий перегородки $d_o=80$ мкм): 1 – без напряжения 2 – $U=25$ кВ, 3 – $U=30$ кВ, 4 – $U=35$ кВ, 5 – $U=50$ кВ

Figure 5. Kinetic dependence of the output concentration of solid particles at different input voltage (diameter of the partition holes $d_o = 80$ microns): 1 – without voltage 2 – $U=25$ kV, 3 – $U=30$ kV, 4 – $U=35$ kV, 5 – $U=50$ kV

Графики, представленные на рисунке 5 показывают, что увеличение параметров электростатического поля способствуют увеличению эффекта осаждения в несколько раз.

При рассмотрении отдельной фракции, характеризующейся примерно одинаковым размером частиц дымовых газов, если концентрация частиц равномерна распределена по всему сечению аппарата, скорость газа u_0 и скорость движения частиц, приобретаемая в результате

воздействия электрического поля, (скорость дрейфа) v постоянны, и если вторичный унос осевших частиц отсутствует, то можно получить уравнение эффективности электростатического улавливания [1, 3]:

$$\eta_{эл} = 1 - \exp\left(-\frac{vl}{u_0 h}\right) \quad (9)$$

где l – длина зоны осаждения, м; v и u_0 – скорость соответственно дрейфа частиц и потока очищаемого газа, м/с, соответственно; h – расстояние между частицами.

В реальных газовых гетерогенных системах происходит изменение концентраций частиц дисперсной фазы по профилю движения потока в сечении аппарата, определяющееся различием скоростей частиц и фактической скорости потока.

Далее проводится суммирование эффективностей от действия рассмотренных механизмов улавливания.

Выше описанный подход отражает расчет эффективности осаждения частиц одного размера или одной фракции. Для реальных дымовых и пылегазовых потоков, характеризующихся полидисперсностью приводится интегральное значение полной эффективности улавливания [5, 13], которую можно верифицировать замерами концентраций на входе и выходе из фильтра.

$$\eta = \int \Sigma \eta_i \cdot f(r) dr \quad (10)$$

где $\Sigma \eta_i$ – суммарная эффективность действия механизмов улавливания определенной фракции частиц; $f(r)$ – функция плотности распределения частиц по фракциям.

Заключение

1. Доминирующим механизмом осаждения частиц дымовых газов является инерционный механизм. Конструктивные особенности перфорированных перегородок позволяют более полно использовать преимущества данного физического эффекта.

2. Притяжение частиц дымовых газов в поле действия электростатического поля повышает эффективность осаждения и способствует более быстрому формированию автофильтра.

3. Механизмы инерции и электростатического осаждения оказывают наибольшее влияние в начальный период процесса фильтрования, до формирования слоя автофильтра. В дальнейшем основным механизмом осаждения частиц дисперсной фазы является ситовой механизм.

Литература

- 1 Ешжанов А.А., Волненко А.А., Жумадуллаев Д.К., Абжапбаров А.А. и др. Промышленные испытания и внедрение аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой в производстве монохромата натрия // Технические науки: проблемы и решения. 2019. С. 132-138.
- 2 Бочкарев, В.В. Теоретические основы технологических процессов охраны окружающей среды. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 318 с.
- 3 Усманова Р.Р., Заиков Г.Е. Разработка рекомендаций по проектированию, промышленному использованию и технико-экологической оценке газопромывателя // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. №. 4.
- 4 Усманова Р.Р. Опыт промышленного внедрения технологии комбинированной двухступенчатой очистки газовых выбросов // Актуальные проблемы естественных наук. 2020. С. 419-426.
- 5 Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., Линь Н.В. Улавливание частиц из дымовых газов прямоугольными сепараторами // Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т. 20. №. 15.
- 6 Лаптев А.Г., Исхаков А.Р. Эффективность очистки газов от тонкодисперсной фазы в распыливающих газосепараторах // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. №. 13.
- 7 Усманова Р.Р., Жернаков В.С. Имитационное моделирование и исследование факторов, влияющих на аэродинамические показатели процесса газоочистки // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2014. №. 1 (43).
- 8 Николаев В.Н., Кондратьев В.В. Технологическое решение интенсификации процессов газоудаления и газоочистки алюминиевого производства // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. №. 7 (66).
- 9 Шипилова Е.А., Хворостян А.В. Влияние механизмов осаждения частиц аэрозоля на управление процессом регенерации зернистых фильтров // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. 2015. №1 (5). С. 23–26.
- 10 Зинуров В.Э., Мубаракшина Р.Р., Антонов М.А. Повышение эффективности процессов газоочистки от твердых частиц // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники. 2020. С. 193-197.
- 11 Wu X., Wu K., Zhang Y., Hong Q. et al. Comparative life cycle assessment and economic analysis of typical flue-gas cleaning processes of coal-fired power plants in China // Journal of cleaner production. 2017. V. 142. P. 3236-3242. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.146
- 12 Karmakar M.K., Chandra P., Chatterjee P.K. A review on the fuel gas cleaning technologies in gasification process // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2015. V. 3. №. 2. P. 689-702. doi: 10.1016/j.jece.2015.02.011
- 13 Schwarz A.D., Meyer J., Dittler A. Interaction of water droplets with soluble filter cakes in gas cleaning applications // Separation and Purification Technology. 2021. V. 259. P. 118128. doi: 10.1016/j.seppur.2020.118128
- 14 Müller M. Integration of hot gas cleaning at temperatures above the ash melting point in IGCC // Fuel. 2013. V. 108. P. 37-41. doi: 10.1016/j.fuel.2011.04.016
- 15 Courson C., Gallucci K. Gas cleaning for waste applications (syngas cleaning for catalytic synthetic natural gas synthesis) // Substitute Natural Gas from Waste. Academic Press, 2019. P. 161-220. doi: 10.1016/B978-0-12-815554-7.00008-8
- 16 Loipersböck J., Weber G., Rauch R., Hofbauer H. Developing an adsorption-based gas cleaning system for a dual fluidized bed gasification process // Biomass Conversion and Biorefinery. 2021. V. 11. №. 1. P. 85-94. doi: 10.1007/s13399-020-00999-1
- 17 Rene E.R., Veiga M.C., Kennes C. Combined biological and physicochemical waste-gas cleaning techniques // Journal of Environmental Science and Health, Part A. 2012. V. 47. №. 7. P. 920-939. doi: 10.1080/10934529.2012.667289
- 18 Rapagna S. et al. Integration of biomass gasification and hot gas cleaning processes // Chemical Engineering Transactions. 2018. V. 67. P. 661-666. doi: 10.3303/CET1867111
- 19 Asadullah M. Biomass gasification gas cleaning for downstream applications: A comparative critical review // Renewable and sustainable energy reviews. 2014. V. 40. P. 118-132. doi: 10.1016/j.rser.2014.07.132
- 20 Hu Y., Yan J. Characterization of flue gas in oxy-coal combustion processes for CO₂ capture // Applied Energy. 2012. V. 90. №. 1. P. 113-121. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.03.005

References

- 1 Eshzhanov A.A., Volnenko A.A., Zhumadullaev D.K., Abzhapbarov A.A. et al. Industrial testing and implementation of an apparatus with a combined regularly weighed nozzle in the production of sodium monochromate. Technical sciences: problems and solutions. 2019. pp. 132-138. (in Russian).
- 2 Bochkarev V.V. Theoretical foundations of technological processes of environmental protection. Tomsk, Publishing House of the Tomsk Polytechnic University, 2012. 318 p. (in Russian).
- 3 Usmanova R.R., Zaikov G.E. Development of recommendations for the design, industrial use and technical and environmental assessment of the gas scrubber. Bulletin of the Kazan Technological University. 2015. vol. 18. no. 4. (in Russian).
- 4 Usmanova R.R. Experience of industrial implementation of the technology of combined two-stage purification of gas emissions. Actual problems of natural sciences. 2020. pp. 419-426. (in Russian).
- 5 Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S., Lin N.V. Capturing particles from flue gases by rectangular separators. Bulletin of the Kazan Technological University. 2017. vol. 20. no. 15. (in Russian).
- 6 Laptev A.G., Iskhakov A.R. Efficiency of gas purification from finely dispersed phase in spraying gas separators. Bulletin of the Kazan Technological University. 2015. vol. 18. no. 13. (in Russian).
- 7 Usmanova R.R., Zhernakov V.S. Simulation modeling and research of factors influencing the aerodynamic performance of the gas cleaning process. Bulletin of the Samara State Aerospace University named after. Academician SP Korolev (National Research University). 2014. no. 1 (43). (in Russian).
- 8 Nikolaev V.N., Kondratiev V.V. Technological solution for the intensification of gas removal and gas cleaning processes in aluminum production. Bulletin of the Irkutsk State Technical University. 2012. no. 7 (66). (in Russian).

- 9 Shipilova E.A., Khvorostyan A.V. Influence of aerosol particles deposition mechanisms on the control of the process of regeneration of granular filters. Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Information technologies in building, social and economic systems. 2015. no. 1 (5). pp. 23–26. (in Russian).
- 10 Zinurov V.E., Mubarakshina R.R., Antonov M.A. Improving the efficiency of gas cleaning processes from solid particles. Problems and prospects for the development of electric power industry and electrical engineering. 2020. pp. 193-197. (in Russian).
- 11 Wu X., Wu K., Zhang Y., Hong Q. et al. Comparative life cycle assessment and economic analysis of typical flue-gas cleaning processes of coal-fired power plants in China. Journal of cleaner production. 2017. vol. 142. pp. 3236-3242. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.146
- 12 Karmakar M.K., Chandra P., Chatterjee P.K. A review on the fuel gas cleaning technologies in gasification process. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2015. vol. 3. no. 2. pp. 689-702. doi: 10.1016/j.jece.2015.02.011
- 13 Schwarz A.D., Meyer J., Dittler A. Interaction of water droplets with soluble filter cakes in gas cleaning applications. Separation and Purification Technology. 2021. vol. 259. pp. 118128. doi: 10.1016/j.seppur.2020.118128
- 14 Müller M. Integration of hot gas cleaning at temperatures above the ash melting point in IGCC. Fuel. 2013. vol. 108. pp. 37-41. doi: 10.1016/j.fuel.2011.04.016
- 15 Courson C., Gallucci K. Gas cleaning for waste applications (syngas cleaning for catalytic synthetic natural gas synthesis). Substitute Natural Gas from Waste. Academic Press, 2019. pp. 161-220. doi: 10.1016/B978-0-12-815554-7.00008-8
- 16 Loipersböck J., Weber G., Rauch R., Hofbauer H. Developing an adsorption-based gas cleaning system for a dual fluidized bed gasification process. Biomass Conversion and Biorefinery. 2021. vol. 11. no. 1. pp. 85-94. doi: 10.1007/s13399-020-00999-1
- 17 Rene E.R., Veiga M.C., Kennes C. Combined biological and physicochemical waste-gas cleaning techniques. Journal of Environmental Science and Health, Part A. 2012. vol. 47. no. 7. pp. 920-939. doi: 10.1080/10934529.2012.667289
- 18 Rapagna S. et al. Integration of biomass gasification and hot gas cleaning processes. Chemical Engineering Transactions. 2018. vol. 67. pp. 661-666. doi: 10.3303/CET1867111
- 19 Asadullah M. Biomass gasification gas cleaning for downstream applications: A comparative critical review. Renewable and sustainable energy reviews. 2014. vol. 40. pp. 118-132. doi: 10.1016/j.rser.2014.07.132
- 20 Hu Y., Yan J. Characterization of flue gas in oxy-coal combustion processes for CO₂ capture. Applied Energy. 2012. vol. 90. no. 1. pp. 113-121. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.03.005

Сведения об авторах

Дмитрий С. Протоко инструктор практического обучения, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, 54А, Воронеж, 394064, Россия, protsko_dmitriy@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1976-0080>

Сергей Ю. Панов д.т.н., профессор, кафедра 206 математики, Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, 394064, Россия, su-panov@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2257-8180>

Елена А. Шипилова к.т.н., доцент, кафедра 206 математики, Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, 394064, Россия, elen_ship@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-1050-036X>

Олег М. Бельх руководитель группы разработки, SAP ABAP, ООО "АТОС АЙТИ СОЛЮШЕНС ЭНД СЕРВИСЕЗ", Проспект Труда, 65, Воронеж, 394026, Россия, ranorien@gmail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2605-3077>

Анатолий А. Хвостов д.т.н., профессор, кафедра прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет, ул. 20-летия Октября, 84, Воронеж, 394006, Россия, khvtol1974@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3836-9407>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Dmitrij S. Protoko practical training instructor, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Staryh Bolshevikov street, 54a, Voronezh, 394064, Russia, protsko_dmitriy@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1976-0080>

Sergey Yu. Panov Dr. Sci. (Engin.), professor, 206 department of mathematics, N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, Staryh Bolshevikov street, 54a, Voronezh, 394064, Russia, su-panov@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2257-8180>

Elena A. Shipilova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, 206 department of mathematics, N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, Staryh Bolshevikov street, 54a, Voronezh, 394064, Russia, elen_ship@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-1050-036X>

Oleg M. Belykh head of development team, SAP ABAP, "ATOS IT Solutions and Services", Prospekt Truda, 65, Voronezh 394026, Russia, ranorien@gmail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2605-3077>

Anatoliy A. Khvostov Dr. Sci. (Engin.), professor, applied mathematics and mechanics department, Voronezh State Technical University, 20 year October street, 84, Voronezh, 394036, Russia, khvtol1974@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3836-9407>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 22/10/2021	После редакции 15/11/2021	Принята в печать 01/12/2021
Received 22/10/2021	Accepted in revised 15/11/2021	Accepted 01/12/2021