

В. В. Харьков, О. С. Дмитриева, А. Н. Николаев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА УЛАВЛИВАНИЯ ПЫЛИ В ПОЛОМ ВИХРЕВОМ СКРУББЕРЕ

Ключевые слова: дисперсный состав, эффективность, пылеочистка, вихревой аппарат, орошение, скруббер.

Растущие требования к очистке промышленных выбросов обуславливают необходимость создания эффективных методов улавливания твердых частиц. Полые вихревые скрубберы, отличающиеся простотой конструкции и отсутствием подвижных элементов, рассматриваются как альтернатива классическим аппаратам мокрой очистки. Их эксплуатационные характеристики критически зависят от режимных параметров, что требует детального изучения для оптимизации. Особое внимание уделено анализу фракционной эффективности, поскольку способность улавливать мелкодисперсные фракции (менее 5 мкм) определяет экологическую безопасность и защиту оборудования. Целью работы было экспериментально установить закономерности влияния расходов газа и орошающей жидкости на эффективность очистки в полом вихревом скруббере с коэффициентом крутки завихрителя 0,8. Эффективность оценивали по общему и фракционному коэффициенту улавливания частиц каолина. Результаты показали, что общая эффективность превышает 99% уже при достаточном уровне орошения, что связано с увеличением интенсивности взаимодействия частиц с каплями жидкости. Снижение орошения ниже 20 л/ч приводит к заметному снижению эффективности. Фракционный анализ выявил, что частицы крупнее 5 мкм улавливаются с эффективностью >95% даже при малых значениях расхода жидкости, тогда как для фракций мельче 2 мкм расход жидкости является критическим параметром. Снижение расхода газа до 250 м³/ч (скорость < 10 м/с) приводит к снижению общей эффективности по сравнению с режимами устойчивого закрученного потока. Полый вихревой скруббер обеспечивает высокую эффективность очистки в исследованных режимах, позволяя находить баланс между энергозатратами и степенью очистки. Полученные зависимости применимы для проектирования промышленных установок и корректировки их режимов работы при изменении нагрузок.

V. V. Khar'kov, O. S. Dmitrieva, A. N. Nikolaev

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFICIENCY OF DUST CAPTURE PROCESS IN A HOLLOW VORTEX SCRUBBER

Keywords: particle size distribution, efficiency, dust cleaning, vortex device, irrigation, scrubber.

Increasing requirements for the cleaning of industrial emissions necessitate the development of efficient methods for capturing solid particles. Hollow vortex scrubbers, characterized by a simple design and the absence of moving parts, are considered as an alternative to conventional wet gas-cleaning devices; however, their performance is critically dependent on operating parameters, which requires detailed investigation for optimization. Particular attention is paid to the analysis of fractional efficiency, since the ability to capture fine particles smaller than 5 μm determines environmental safety and equipment protection. The aim of this study was to experimentally determine the influence of gas flow rate and irrigating liquid flow rate on the cleaning efficiency of a hollow vortex scrubber with a swirler twist coefficient of 0.8. The efficiency was evaluated using overall and fractional capture efficiencies for kaolin dust. The results showed that the overall capture efficiency exceeds 99% at a sufficient level of irrigation due to increased intensity of particle-droplet interaction, whereas a reduction in the irrigating liquid flow rate below 20 l/h leads to a noticeable decrease in efficiency. Fractional analysis revealed that particles larger than 5 μm are captured with efficiencies exceeding 95% even at low irrigation rates, while for particles smaller than 2 μm the irrigating liquid flow rate becomes a critical parameter. A decrease in the gas flow rate to 250 m³/h (gas velocity below 10 m/s) results in reduced overall efficiency compared to operating regimes with a stable swirling flow. The hollow vortex scrubber demonstrates high cleaning efficiency under the investigated operating conditions, allowing a balance between energy consumption and separation efficiency to be achieved, and the obtained relationships can be applied in the design of industrial gas-cleaning systems and in the adjustment of their operating regimes under variable load conditions.

Введение

Промышленные предприятия являются источником значительных газовых выбросов, содержащих как газообразные, так и дисперсные (пыль, аэрозоли) загрязняющие примеси. Обеспечение экологической безопасности требует эффективной очистки этих выбросов перед сбросом в атмосферу. Особую сложность представляет обработка больших объемов газов, характерных для энергетики, металлургии, химической и других отраслей промышленности [1].

Для очистки от газообразных примесей применяется широкий спектр методов: абсорбция, адсорбция, конденсация, каталитическое, термическое и другие виды обезвреживания. Однако многие из них имеют

существенные ограничения [2–4]. Конденсация эффективна лишь при высоких концентрациях легко конденсируемых паров. Адсорбция, идеальная для тонкой очистки, требует сложной и энергозатратной регенерации сорбента. Каталитические методы, обеспечивая высокую степень очистки, отличаются дороговизной и сложностью оборудования. Термическое обезвреживание экономически оправдано только при возможности утилизации выделяющегося тепла.

Для улавливания твердых и жидких частиц используются аппараты сухой очистки (пылесадительные камеры, циклоны), фильтры, электрофильтры и аппараты мокрой очистки (скрубберы). Сухие методы, как правило, пригодны лишь для грубой

предварительной очистки [5]. Фильтры, обеспечивая высокую эффективность, имеют невысокую производительность и требуют регенерации [6]. Электрофильтры, хотя и сочетают высокую степень очистки с умеренными эксплуатационными затратами, отличаются высокими капитальными вложениями, металлоемкостью и чувствительностью к режиму [7].

Мокрая очистка (пылеулавливание) признается одним из самых эффективных и перспективных методов. Она позволяет проводить комплексную очистку от твердых, жидких и газообразных примесей, отличается простотой конструкции и возможностью изготовления на месте эксплуатации. Однако традиционно применяемые мокрые скрубберы (насадочные, барботажные и противоточные распыливающие) имеют фундаментальный недостаток: низкую допустимую скорость газового потока (обычно не более 1,0–1,5 м/с) [8]. Это вытекает из противоточного принципа их работы и при превышении скорости приводит к захлебыванию, уносу жидкости и падению эффективности. Как следствие, для очистки больших объемов газа требуются аппараты колоссальных габаритов, создающие проблемы при изготовлении, транспортировке и монтаже. Более скоростные аппараты, такие как скрубберы Вентури, ограничены малой производительностью из-за технологических сложностей с равномерным орошением больших сечений [9, 10].

Таким образом, главной проблемой газоочистки для крупнотоннажных производств является создание аппарата, сочетающего высокую эффективность мокрого пылеулавливания с высокой пропускной способностью по газу, что позволило бы резко уменьшить габариты и металлоемкость оборудования.

Перспективным классом аппаратов для решения этой проблемы являются аппараты вихревого типа [11, 12]. Их принцип действия основан на прямоточном движении газа и жидкости в сочетании с центробежной сепарацией жидкости за счет закрутки потока. Это снимает ограничение по скорости, характерное для противоточных аппаратов, и позволяет вести процесс при средних скоростях газа 20–30 м/с. Высокая скорость определяет малые габариты аппаратов. К дополнительным преимуществам относятся малая металлоемкость, низкие удельные энергозатраты и простота изготовления. Вихревые аппараты можно условно разделить на многоступенчатые и полые. Полые вихревые аппараты не имеют внутренних ступеней и перегородок. Жидкость подается непрерывно по высоте аппарата, образуя объемный факел распыла, а закрученный газовый поток взаимодействует с каплями по всей высоте рабочей зоны. Это увеличивает относительный объем зоны контакта. Критическим преимуществом полых аппаратов является их сравнительно низкое гидравлическое сопротивление, обусловленное отсутствием сужений и расширений.

Эффективность очистки в полых вихревых аппаратах обеспечивается комбинацией нескольких механизмов сепарации. Отделение содержащихся в газе частиц происходит как за счет их осаждения на стенке под действием центробежных сил, так и за счет инерционного осаждения на поверхности капель

распыленной жидкости. При подаче части жидкости непосредственно во внутреннюю область тангенциально-лопаточного завихрителя возникает дополнительный механизм очистки: инерционное осаждение частиц на капли происходит во вращающемся слое жидкости вблизи лопаток завихрителя, что повышает вероятность столкновения и улавливания частиц, особенно мелкодисперсных фракций [13]. Данный комплексный механизм работы требует детального изучения для оптимизации конструкции и режимов эксплуатации.

Таким образом, полые вихревые скрубберы представляют собой перспективное направление для решения задач мокрого пылеулавливания. Однако их широкое промышленное внедрение сдерживается недостаточной изученностью процессов, особенно в аппаратах с тангенциально-лопаточными завихрителями. В связи с этим возникает необходимость экспериментального исследования влияния режимных параметров на эффективность таких аппаратов.

Целью работы являлось экспериментальное исследование влияния расходов газа и орошающей жидкости на общую и фракционную эффективность улавливания пыли каолина в полном вихревом скруббере с тангенциально-лопаточным завихрителем. В задачи входило получение зависимостей эффективности от режимных параметров, анализ фракционной эффективности для частиц различного размера, сравнение экспериментальных данных с расчетной моделью и определение оптимальных условий работы аппарата.

Методика исследования

Исследовался одноступенчатый полый вихревой скруббер с нисходящим прямотоком фаз и центральным оросителем (рис. 1).

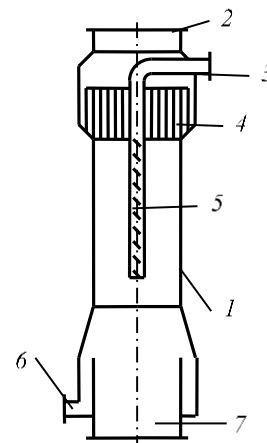


Рис. 1 – Полый вихревой скруббер: 1 – корпус; 2, 7 – патрубки входа и выхода газа; 3, 6 – патрубок ввода и отвода жидкости; 4 – тангенциальный плосколопаточный завихритель; 5 – ороситель

Fig. 1 – Hollow vortex scrubber: 1 – body; 2, 7 – gas inlet and outlet pipes; 3, 6 – liquid inlet and outlet pipes; 4 – tangential flat-blade swirler; 5 – irrigator

Скруббер состоит из корпуса, тангенциального плосколопаточного завихрителя, установленного в

верхней части корпуса и предназначенного для закручивания газового потока, и центрального оросителя. Жидкость истекает через перфорации оросителя в виде пленок, которые дробятся потоком газа. Закрученный в завихрителе поток газовой смеси активно взаимодействует со струями и каплями жидкости в объеме аппарата, где и протекает процесс сепарации пыли. Вращательное движение газожидкостного потока и возникающее при этом поле центробежной силы обеспечивают качественную сепарацию очищенного газа от частиц каолина, капель промывной жидкости. Для снижения вторичного уноса жидкости из аппарата, возможна установка сепарационной сетки с диаметром, меньшим диаметра корпуса аппарата. Через отверстия в сетке жидкость проникает в кольцевой зазор между сеткой и корпусом аппарата и стекает в бункер для сбора жидкости.

Для экспериментального исследования процесса очистки воздуха от пыли была собрана лабораторная установка на основе полого вихревого скруббера (рис. 2).

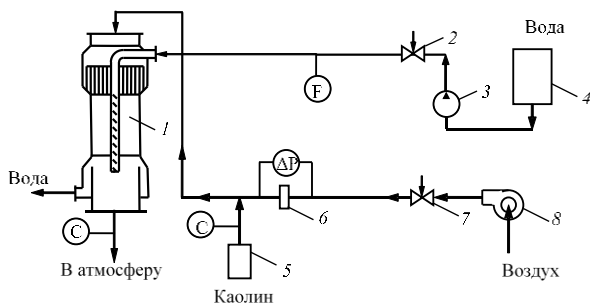


Рис. 2 – Принципиальная схема лабораторной установки: 1 – аппарат; 2, 7 – вентили; 3 – насос; 4 – емкость с водой; 5 – дозатор; 6 – диафрагма; 8 – вентилятор; датчики: F – расход; C – концентрация; ΔP – перепад давления

Fig. 2 – Basic diagram of the laboratory setup: 1 – apparatus; 2, 7 – valves; 3 – pump; 4 – water tank; 5 – dust feeder; 6 – orifice plate; 8 – fan; sensors: F – flow rate; C – concentration; ΔP – pressure drop

Исследование эффективности очистки газа от твердых частиц в полом вихревом скруббере диаметром 100 мм и с высотой рабочей зоны 400 мм проводилось на примере очистки воздуха от пыли каолина. Исследование проводилось при среднерасходной скорости газа в аппарате 10–25 м/с, что соответствовало устойчивому режиму их работы, когда кинетической энергии газового потока было достаточно для полного транспортирования жидкой фазы по аппарату. Расход дисперсной фазы варьировался от 0 до 250 л/ч при изменении величины удельной нагрузки аппарата по жидкости в диапазоне от 0 до 2,08 кг/кг. Коэффициент крутки завихрителя во всех опытах составлял 0,8, начальная запыленность воздуха составляла от 2 до 16 г/м³. Исходная воздушная смесь формируется на всасывающей линии со стороны вентилятора высокого давления типа ВВД, каолин подается в исходный поток струей сжатого воздуха из газового баллона. Расход воздуха измеряется с помощью диафрагмы и контролируется по показаниям

дифманометра, расход жидкости измеряется ротаметром. Запыленный газ отбирали из газохода заборной трубкой и фильтровали через фильтр АФА-ВП-10. Анализ дисперсного состава порошка каолина производился микроскопическим методом путем непосредственного подсчета числа частиц заданного размера [14].

Эффективность улавливания частиц оценивалась отношением количества осажденных частиц к общему содержанию частиц в газе на входе в аппарат

$$E = (c_n - c_k) / c_n, \quad (1)$$

где c_n , c_k – начальная и конечная концентрация частиц пыли, г/м³.

Экспериментально определялись как значения общей эффективности пылеулавливания, так и фракционной эффективности, т.е. способность аппарата осуществлять селективную очистку газа от частиц заданного класса размеров.

Расчет фракционной эффективности улавливания производится по формуле [15]

$$E_\phi = (m_n - m_y) / m_n, \quad (2)$$

где m_n , m_y – массы фракции пыли заданного размера, поступающей (табл. 1) и уносимой из аппарата, кг.

Таблица 1 – Результаты исследования дисперсного состава исходных порошков каолина

Table 1 – Results of the study on the particle size distribution of the original kaolin powders

Граничные размеры фракции частиц, мкм	Средний размер частиц фракции, мкм	Число частиц	Массовая доля частиц, %
50–32	41	10	19,55
32–20	26	84	41,21
20–12	16	204	23,45
12–8	10	318	8,95
8–5	6,5	562	4,33
5–3	4	1246	2,24
3–1	2	1112	0,25
< 1	0,6	5801	0,16

Значения m_n , m_y определяются по дисперсным составам пыли каолина на входе и выходе аппарата во время эксперимента микроскопическим методом при непосредственном подсчете по фотоснимкам, полученным на электронном микроскопе Olympus BX53, оснащенный цифровой камерой Olympus LC30. Для улучшения качества анализа приготавливается суспензия с использованием стабилизатора 0,3% пирофосфата натрия Na₄P₂O₇ для снижения агломерации частиц, который добавляется в навеску порошка каолина около 1 г, диспергированного в 100 мл дистиллированной воды. Из этой суспензии отбиралось несколько капель на предметное стекло, которое сверху закрывалось покровным стеклом толщиной 0,17 мм. Для получения достоверных результатов производилось фотографирование не менее 10 полей при каждом увеличении. При этом число подсчитываемых частиц составляло не менее 5 тысяч (табл. 1).

Результаты и обсуждение

Результаты экспериментов по оценке общей эффективности пылеулавливания полого вихревого скруббера представлены на рис. 3, из которого видно, что общая эффективность аппарата достаточно высокая, существенно зависит от количества жидкости L , подаваемой на орошение. Это подтверждает определяющую роль инерционного осаждения частиц на каплях жидкости в процессе пылеочистки. Зависимость демонстрирует рост общей эффективности с увеличением расхода орошающей жидкости. При малых значениях L (до 50 л/ч) эффективность резко возрастает, что объясняется увеличением количества капель жидкости, взаимодействующих с запыленным газом. При дальнейшем росте L общая эффективность стабилизируется, что свидетельствует о достижении оптимального режима орошения, при котором практически все частицы улавливаются.

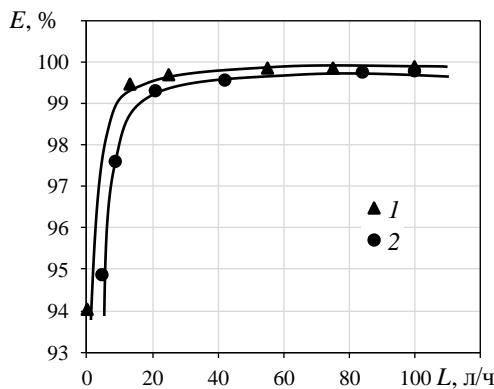


Рис. 3 – Общая эффективность улавливания частиц каолина полого вихревого скруббера, $K = 0,8$; $G, \text{ м}^3/\text{ч}$: 1 – 420, 2 – 250

Fig. 3 – Overall efficiency of kaolin particle capture by a hollow vortex scrubber, $K = 0.8$; $G, \text{ m}^3/\text{h}$: 1 – 420, 2 – 250

Уменьшение расхода газа может быть критичным, особенно для улавливания твердых частиц мелких фракций, кинетической энергии недостаточно для полного транспортирования орошающей жидкости по аппарату и приводит к ослаблению центробежного поля. Для компенсации этого эффекта, следует выбрать аппараты с увеличенным коэффициентом крутки завихрителя, таким образом степень очистки газа от пыли возрастет.

Эксперименты показали, что фракционная эффективность очистки газа в полом вихревом скруббере существенно зависит от характерного размера частиц пыли при повышенных расходах газа ($G = 500 \text{ м}^3/\text{ч}$). Эффективность пылеулавливания увеличивается с увеличением диаметра частиц, асимптотически приближаясь к некоторым предельным значениям (рис. 4).

Эти предельные значения возрастают с увеличением соотношений массовых расходов жидкости и газа. Из графика видно, что эффективность осаждения частиц с диаметром более 5 мкм уже практически

не меняются. Тот факт, что эффективности инерционного осаждения крупных частиц не достигают 100%, связан с неполным перекрытием поперечного сечения аппарата каплями распыленной жидкости, когда соотношение расходов жидкости и газа не превышает $L/G < 2$. Как и общая, фракционная эффективность также возрастает с увеличением расхода орошающей жидкости и степени крутки потока. Однако увеличение расхода орошающей жидкости более 100 л/ч является нецелесообразным.

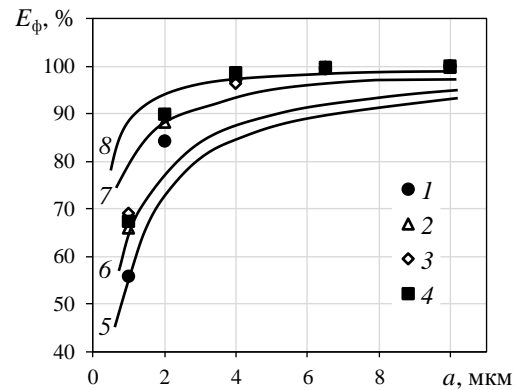


Рис. 4 – Фракционная эффективность улавливания частиц каолина полого вихревого скруббера, $K = 0,8$; $G = 500 \text{ м}^3/\text{ч}$; $L, \text{ л/ч}$: 1, 5 – 50; 2, 6 – 100; 3, 7 – 150; 4, 8 – 168; точки – эксперимент; линии – расчет [16]

Fig. 4 – Fractional efficiency of kaolin particle capture by a hollow vortex scrubber, $K = 0.8$; $G = 500 \text{ m}^3/\text{h}$; $L, \text{ l/h}$: 1, 5 – 50; 2, 6 – 100; 3, 7 – 150; 4, 8 – 168; points – experiment; lines – calculation [16]

Увеличение скорости газа приводит к некоторому увеличению эффективности осаждения частиц, но это увеличение очень незначительно. В частности, увеличение скорости газа на входе в завихритель с 10 до 25 м/с приводит к росту эффективности не более чем на 8%.

На рисунках 4 и 5, посвященных эффективности пылеулавливания кроме данных эксперимента нанесены в виде сплошной линии результаты расчета фракционной и общей эффективности полого вихревого скруббера по модели пылеулавливания, представленной в предыдущем исследовании [16]. Выявлено влияние скорости газа как фактора, определяющего как базовую эффективность (за счет центробежных сил), так и чувствительность к орошению. Установлены оптимальные диапазоны $L/G = 0,5-1,5$ для достижения эффективности 98–99,7% при скоростях 17,5–25 м/с, происходит оптимизация размера капель и их распределения в объеме исследуемого аппарата (рис. 5).

Полученные экспериментальные данные по эффективности создают основу для сравнительной оценки конкурентоспособности полого вихревого скруббера относительно других типов мокрых пылеуловителей при проектировании систем очистки.

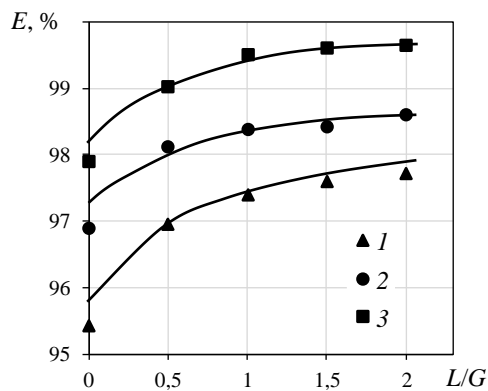


Рис. 5 – Сравнение опытных и расчетных значений эффективности очистки воздуха от пыли в полом вихревом скруббере, $K = 0,8$; W , м/с: 1 – 10, 2 – 17,5; 3 – 25; точки – эксперимент; линии – расчет [16]

Fig. 5 – Comparison of experimental and calculated values of air dust removal efficiency in a hollow vortex scrubber, $K = 0.8$; W , m/s: 1 – 10, 2 – 17.5; 3 – 25; points – experiment; lines – calculation [16]

Заключение

1. Экспериментальные данные подтверждают работоспособность конструкции полого вихревого скруббера в исследованном диапазоне параметров.
2. Увеличение расхода жидкости приводит к росту количества капель, взаимодействующих с частицами каолина. Это усиливает захват пыли за счет столкновений и коагуляции, что приводит к росту общей эффективности процесса улавливания каолина. Увеличение расхода жидкости более 100 л/ч не дает значительного прироста эффективности, так как почти все частицы задерживаются. Более того, избыточный расход может привести к агломерации капель, снижающей активную поверхность взаимодействия, при этом рост гидравлического сопротивления может привести к нарушению устойчивости гидродинамического режима.
3. Для всех расходов жидкости фракционная эффективность растет с увеличением размера частиц. Увеличение параметра L повышает количество капель, что усиливает захват частиц всех фракций. Крупные частицы ($a > 5$ мкм) улавливаются эффективнее из-за большей инерционности и сильного воздействия центробежной силы. Улавливание мелких частиц ($a < 2$ мкм) менее эффективно, поскольку их динамика в потоке в большей степени определяется вязкими силами, а не инерцией.
4. Снижение расхода газа до 250 м³/ч нарушает устойчивый режим работы полого вихревого скруббера, что приводит к снижению общей эффективности улавливания по сравнению с исходным режимом ($G = 420$ м³/ч). Для сохранения высокой эффективности при низких расходах газа потребуется, увеличить коэффициент крутки завихрителя, а также оптимизация расхода жидкости, чтобы обеспечить устойчивое распыление при меньших скоростях газа.

Благодарности

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ (соглашение № 10/2025-ПД-КНИТУ от 22.12.2025).

Acknowledgments

This work was carried out with the support of a grant provided by the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to higher education institutions, scientific and other organizations, aimed at supporting the development plans for human resources potential by encouraging their scientific and academic staff to defend doctoral dissertations and conduct research activities (Agreement No. 10/2025-PD-KNRTU dated 12/22/2025).

Литература

1. С.Г. Альмухаметова, *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, S6, 35–44 (2019). DOI: 10.25018/0236-1493-2019-4-6-35-44.
2. A.V. Dmitriev, V.E. Zinurov, O.S. Dmitrieva, *E3S Web of Conferences*, **126**, 00007 (2019). DOI: 10.1051/e3sconf/201912600007.
3. В.В. Семенов *Процессы и аппараты защиты окружающей среды*. В 4-х книгах. Книга 1. Пылеочистка. Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. 228 с.
4. Х.Ш. Бахронов, С.У. Ганиева, *Journal of Advances in Engineering Technology*, **2**, 33–38 (2022). DOI: 10.24412/2181-1431-2022-2-33-38.
5. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, М.О. Уткин, *Вестник технологического университета*, **22**, 10, 68–71 (2019).
6. W. Hoefflinger, *Process Safety and Environmental Protection*, **197**, 106950 (2025). DOI: 10.1016/j.psep.2025.106950.
7. S. Hu, Y. Gao, F. Hu, G. Feng, C. Liu, J. Li, *Process Safety and Environmental Protection*, **153**, 311–319 (2021). DOI: 10.1016/j.psep.2021.07.029.
8. Г.И. Мадаминава, *Universum: технические науки*, **103**, 10-4, 46–52 (2022).
9. T. Wei, R. Zhu, B. Zhang, L. Zhu, S. Fan, H. Luo, Z. Li, B. Bu, Z. Li, X. Li, F. Gao, *Journal of Cleaner Production*, **538**, 147427 (2026). DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.147427.
10. A.M. Silva, J.C.F. Teixeira, S.F.C.F. Teixeira, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **48**, 1, 59–67 (2009). DOI: 10.1016/j.cep.2008.02.001.
11. V. Zinurov, V. Kharkov, E. Pankratov, A. Dmitriev, *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, **12**, 4, 336–346 (2022). DOI: 10.46604/ijeti.2022.9568.
12. В.И. Петров, И.Ф. Фатихов, А.Г. Сизов, А.С. Никитин, *Вестник Казанского технологического университета*, **16**, 22, 258–260 (2013).
13. А.Н. Николаев, Н.М. Нуртдинов, В.В. Харьков, *Вестник технологического университета*, **18**, 3, 294–296 (2015).
14. А.М. Жемчужный, А.В. Долгалев, *Интернет-вестник ВолгГАСУ*, **13**, 3, 5 (2010).
15. А.Г. Ветошкин, *Процессы и аппараты пылеочистки*. Пенза: ПГУ, 2005. 210 с.
16. Л.Р. Сабирзянова, А.А. Уриев, В.В. Харьков, А.Н. Николаев, *Вестник технологического университета*, **20**, 8, 50–52 (2017).

References

1. S.G. Almuhametova, *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*, S6, 35–44 (2019). (In Russ). DOI: 10.25018/0236-1493-2019-4-6-35-44.
2. A.V. Dmitriev, V.E. Zinurov, O.S. Dmitrieva, *E3S Web of Conferences*, **126**, 00007 (2019). DOI: 10.1051/e3sconf/201912600007.
3. V.V. Semenov *Processy i apparaty zashchity okruzhaya-yushchej sredy*. V 4-hknigah. Kniga 1. Pyleochistka. Vologda: Infra-Inzheneriya, 2025. 228 s. (In Russ).
4. H.Sh. Bahronov, S.U. Ganieva, *Journal of Advances in Engineering Technology*, **2**, 33–38 (2022). (In Russ). DOI: 10.24412/2181-1431-2022-2-33-38.
5. A.V. Dmitriev, V.E. Zinurov, O.S. Dmitrieva, M.O. Utkin, *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, **22**, 10, 68–71 (2019). (In Russ).
6. W. Hoeflinger, *Process Safety and Environmental Protection*, **197**, 106950 (2025). DOI: 10.1016/j.psep.2025.106950.
7. S. Hu, Y. Gao, F. Hu, G. Feng, C. Liu, J. Li, *Process Safety and Environmental Protection*, **153**, 311–319 (2021). DOI: 10.1016/j.psep.2021.07.029.
8. G.I. Madaminova, *Universum: tekhnicheskie nauki*, 103, 10-4, 46–52 (2022) (In Russ).
9. T. Wei, R. Zhu, B. Zhang, L. Zhu, S. Fan, H. Luo, Z. Li, B. Bu, Z. Li, X. Li, F. Gao, *Journal of Cleaner Production*, **538**, 147427 (2026). DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.147427.
10. A.M. Silva, J.C.F. Teixeira, S.F.C.F. Teixeira, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **48**, 1, 59–67 (2009). DOI: 10.1016/j.cep.2008.02.001.
11. V. Zinurov, V. Kharkov, E. Pankratov, A. Dmitriev, *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, **12**, 4, 336–346 (2022). DOI: 10.46604/ijeti.2022.9568.
12. V.I. Petrov, I.F. Fatihov, A.G. Sizov, A.S. Nikitin, *Herald of Kazan Technological University*, **16**, 22, 258–260 (2013) (In Russ).
13. A.N. Nikolaev, N.M. Nurtdinov, V.V. Khar'kov, *Herald of Technological University*, **18**, 3, 294–296 (2015) (In Russ).
14. A.M. Zhemchuzhnyj, A.V. Dolgalev, *Internet-vestnik VolgGASU*, 13, 3, 5 (2010) (In Russ).
15. A.G. Vetoshkin, *Processy i apparaty pyleochistki*. Penza: PGU, 2005. 210 s. (In Russ).
16. L.R. Sabirzyanova, A.A. Uriev, V.V. Khar'kov, A.N. Nikolaev, *Herald of Technological University*, **20**, 8, 50–52 (2017) (In Russ).

©**В. В. Харьков** – к.т.н., доцент кафедры Оборудования пищевых производств (ОПП), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, v.v.kharkov@gmail.com; **О. С. Дмитриева** – к.т.н., доцент кафедры ОПП КНИТУ, ja_deva@mail.ru, **А. Н. Николаев** – д.т.н., заведующий кафедрой ОПП КНИТУ, andr_nik_nik@rambler.ru.

©**V. V. Khar'kov** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Department of Food Production Equipment (FPE), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, v.v.kharkov@gmail.com; **O. S. Dmitrieva** – PhD (Technical sci.), Associate Professor, the FPE department, KNRTU, ja_deva@mail.ru, **A. N. Nikolaev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Head of the FPE department, KNRTU, andr_nik_nik@rambler.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 23.01.26.

Дата принятия рукописи в печать – 27.02.26.