

В. В. Харьков (к.т.н., доц.), О. С. Дмитриева (к.т.н., доц.)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ОРОШАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ В ВИХРЕВЫХ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВАХ

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
кафедра «Оборудование пищевых производств»
420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68; e-mail: v.v.kharkov@gmail.com

V. V. Kharkov, O. S. Dmitrieva

EXPERIMENTAL STUDY OF IRRIGATING LIQUID DISPERSION IN VORTEX GAS-LIQUID SEPARATION DEVICES

Kazan National Research Technological University
68, K. Marksa Str., 420015, Kazan, Russia; e-mail: v.v.kharkov@gmail.com

Представлены результаты исследования дисперсного состава орошающей жидкости вихревых сепарационных устройств мокрой очистки газовых выбросов фотометрическим методом с использованием сепарационных устройств с аксиальными и тангенциальными лопаточными завихрителями в широком диапазоне скоростей газа (22–46 м/с) и физико-химических свойств жидкости (вязкость 1–15 мПа·с, поверхностное натяжение 35–70 мН/м). Установлено, что тангенциально-лопаточные завихрители формируют более крупные капли (на 17% больше, чем аксиальные) с менее асимметричным распределением размеров. Повышение скорости газового потока приводит к уменьшению среднего диаметра капель, тогда как вязкость жидкости практически не влияет на дисперсность, в отличие от поверхностного натяжения. Разработаны критериальные зависимости для расчета среднего объемно-поверхностного диаметра капель с погрешностью менее 5%. Отсутствие вторичного диспергирования подтверждает стабильность дисперсной фазы, что упрощает моделирование процессов газоочистки. Полученные данные позволяют оптимизировать конструкцию вихревых сепарационных устройств и режимы их работы для повышения эффективности сепарации.

Ключевые слова: аксиальный завихритель; вязкость жидкости; газожидкостный поток; диаметр Заутера; дисперсный состав; критериальная зависимость; мокрая очистка; орошающая жидкость; поверхностное натяжение; скорость газа; тангенциальный завихритель

This paper presents the results of an experimental study of the dispersed composition of an irrigating liquid in vortex separation devices designed for wet scrubbing of gas emissions. The study was performed using a photometric method with separation devices equipped with axial and tangential vane swirlers over a wide range of gas velocities (22–46 m/s) and liquid physicochemical properties (viscosity 1–15 mPa·s, surface tension 35–70 mN/m). It was found that tangential vane swirlers form larger droplets (17% larger than axial ones) with a less asymmetric size distribution. An increase in gas flow velocity leads to a decrease in the average droplet diameter, while liquid viscosity has practically no effect on dispersion, unlike surface tension. Criterion relationships for calculating the average Sauter mean diameter of droplets with an error of less than 5% were developed. The absence of secondary dispersion confirms the stability of the dispersed phase, which simplifies the modeling of gas cleaning processes. The obtained data allow for the optimization of the design of vortex separation devices and their operating modes to improve separation efficiency.

Key words: axial swirler; criterion relationship; droplet size distribution; gas velocity; gas-liquid flow; irrigating liquid; liquid viscosity; Sauter mean diameter; surface tension; tangential swirler; wet gas cleaning

Дата поступления 04.12.25

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Академии 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).

Одним из перспективных методов мокрой очистки промышленных газовых выбросов является применение вихревых сепарационных устройств, работающих с орошением по принципам скруббера¹⁻³. Их конструкция, основанная на прямоочном движении фаз и центробежной сепарации жидкости, обеспечивает высокую эффективность разделения при скоростях газа 20–30 м/с. Вихревые сепарационные устройства могут использоваться в качестве контактных элементов в многоступенчатых аппаратах (колоннах), включая как одноэлементные, так и многоэлементные конструкции. Благодаря компактности этих элементов их гидродинамические характеристики могут быть изучены в лабораторных условиях без трудоемкого масштабирования. При этом внутри каждого элемента взаимодействие фаз происходит в прямоочке, тогда как в целом колонна работает в противочном режиме, обеспечивая высокую эффективность сепарации. Простота изготовления дополнительно расширяет потенциал их применения в системах очистки промышленных выбросов, что делает данную технологию актуальной для решения экологических задач^{4,5}.

Несмотря на очевидные преимущества и широкое распространение вихревых устройств в технических системах, физические механизмы процесса диспергирования жидкости в их рабочем пространстве остаются недостаточно изученными. Конкретно: неизвестна количественная зависимость дисперсного состава капель от конструктивных параметров устройства (типа завихрителя, его геометрии) и режимных условий (скорость газа, физико-химические свойства жидкости). Это создает серьезные препятствия для точного расчета эффективности газоочистки и оптимизации конструкций таких устройств.

Основным конструктивным параметром вихревых сепарационных устройств является тип завихрителя для газовой фазы. На практике используются два основных типа лопаточных завихрителей: (1) аксиальные, подводящие жидкость вблизи оси над втулкой завихрителя, и (2) тангенциальные, подводящие жидкость вблизи глухого

The work was carried out with the financial support of a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to educational institutions of higher education, scientific and other organizations to support plans for the development of human resources in terms of stimulating their scientific and scientific-pedagogical staff to defend doctoral dissertations and carry out research work (agreement No.10/2025-PD-KNITU dated 12/22/2025).

торца. Поскольку конкретная конструкция завихрителя определяет характер течения жидкости и, как следствие, специфику ее диспергирования в виде струй, капель или пленок, то закономерности диспергирования жидкости отличаются от равновесных в зоне вращающегося капельного слоя⁶⁻⁸.

Исследование дисперсного состава образующихся при диспергировании капель в вихревом сепарационном устройстве приобретает принципиальное значение, поскольку именно средний размер частиц определяет удельную поверхность жидкой фазы. Это ключевой параметр, от которого напрямую зависит площадь межфазного взаимодействия. Отсутствие детальных данных о распределении капель по размерам в контактных элементах существенно ограничивает точность расчетов эффективности сепарационных процессов, происходящих в них, что актуализирует необходимость комплексного изучения закономерностей диспергирования с учетом специфики гидродинамики вихревых течений^{9,10}. Кроме того, данные по дисперсному составу капель позволяют разрабатывать более совершенные конструкции закручивающих и оросительных устройств, а также подбирать наиболее рациональные гидродинамические режимы работы, то есть имеет непосредственное практическое значение для инженерных расчетов аппаратов газожидкостной сепарации.

Для прогнозирования дисперсного состава капель предложено множество математических моделей. В научных работах используются различные функции распределения: нормальное распределение (гауссовское), логарифмически-нормальное, γ , β -распределение, а также распределения Вейбулла (Розина-Раммлера), Нукиямы-Танасавы, Байенса, Беземера-Шварца и др. Например, показатели Нукиямы-Танасавы широко применяются при анализе диспергирования в пневматических форсунках¹¹:

$$\frac{dn}{d\delta_k} = B\delta_k^p e^{-C\delta_k^q}, \quad (1)$$

где n – нормализованное числовое распределение;
 δ_k – диаметр капли;
 B, C, p, q – эмпирические коэффициенты.

Однако применение этих концептуальных моделей к вихревым сепарационным устройствам имеет дополнительные ограничения. Во-первых, коэффициенты распределений (в Нукиямы-Танасавы это параметры B и C) зависят от режимных параметров и физико-химических свойств среды, что резко снижает их универсальность. Во-вторых, распределение часто имеет узкий диапазон применения, связанный с воздействием механизма разрушения в каждом типе устройств. В-третьих, для вихревых устройств с нестационарными полями течения использование полных кривых распределений затруднено из-за высокой чувствительности к условиям эксперимента, что требует новых подходов к описанию дисперсности.

В связи с этими ограничениями для характеристик дисперсного состава капель в вихревых сепарационных устройствах используется интегральный параметр – средний объемно-поверхностный диаметр Заутера (δ_{32}). Этот параметр лучше всего отражает удельную межфазную поверхность – ключевой параметр для расчета массообмена и эффективности сепарации. Для вихревых устройств, где наблюдаются сложные нестационарные поля течений, использование δ_{32} вместо полного распределения особенно оправдано, так как позволяет получить надежную и универсальную характеристику процесса, свободную от недостатков эмпирических моделей распределения ^{12, 13}.

Основной проблемой при практическом применении вихревых сепарационных устройств является отсутствие количественных данных о влиянии конструктивных параметров (тип и размер завихрителя), режимных условий (скорость газа) и физико-химических свойств жидкости (вязкость, поверхностное натяжение) на дисперсный состав капель. Это ограничивает возможность точно рассчитать эффективность газоочистки и оптимизировать конструкции таких устройств для различных промышленных применений. Целью настоящей работы является экспериментальное определение дисперсного состава капель орошаемой жидкости в вихревых сепарационных устройствах с аксиальными и тангенциальными завихрителями в широком диапазоне рабочих параметров (скорость газа 22–46 м/с, вязкость жидкости 1–15 мПа·с, поверхностное натяжение 35–70 мН/м) для разработки критериальных моделей расчета среднего объемно-поверхностного диаметра капель. Новизна работы заключается в получении новых количественных критериальных зависимостей конкретно для вихревых сепарационных устройств двух основных типов.

Экспериментальная часть

Для анализа факторов, влияющих на качество диспергирования орошающей жидкости в вихревых сепарационных устройствах, было выполнено экспериментальное исследование на системе воздух-вода с двумя типами завихрителей потока газа:

- аксиально-лопаточный завихритель диаметром 100 мм с плоскими направляющими лопастями, у которого коэффициент крутки потока составлял 0.195 при втулочном отношении 0.4 (рис. 1а);
- тангенциально-лопаточный завихритель диаметром 80 мм и высотой 100 мм, у которого коэффициент крутки находился в пределах 0,54 (рис. 1б).

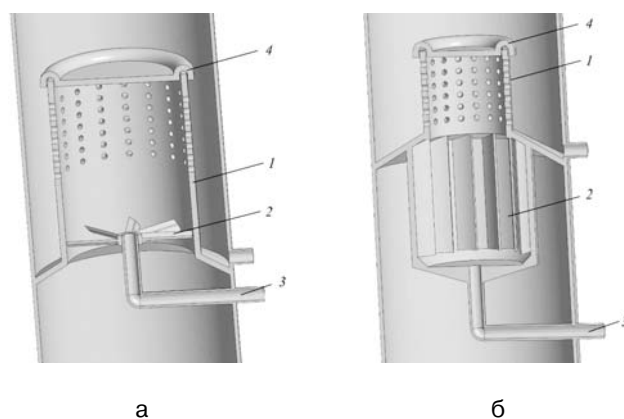


Рис. 1. Газожидкостные сепарационные устройства: а – с аксиально-лопаточным завихрителем; б – с тангенциально-лопаточным завихрителем потока газа (продольный разрез): 1 – корпус; 2 – лопаточный завихритель; 3 – узел подвода жидкости; 4 – комбинированный узел сепарации жидкости и газа

Данные значения коэффициентов крутки были выбраны на основе анализа промышленных аналогов и обеспечивали интенсивное вихреобразование, необходимое для эффективного диспергирования и сепарации в исследуемом диапазоне скоростей.

Скорость воздушного потока в щелях завихрителей изменялась в диапазоне от 22 до 46 м/с, а соотношение массовых расходов жидкой и газовой фаз было равно 1.0 кг/кг. Вязкость жидкости регулировалась в пределах 1–15 мПа·с путем добавления глицерина в воду, а поверхностное натяжение изменялось от 35 до 70 мН/м за счет введения поверхностно-активных веществ. При этом изменение плотности жидкости не превышало 5%. Выбранные диапазоны параметров охватывают типичные рабочие жидкости для мокрой газоочистки: вязкость 1–15 мПа·с соответствует водным растворам от чистой воды до вязких абсорбентов; поверхностное натяжение 35–70 мН/м охватыва-

ет жидкости от дистиллированной воды до водных растворов поверхностно-активных веществ, используемых в скрубберах для повышения смачиваемости пыли. Все эксперименты проводились при постоянной температуре рабочих сред 20 ± 0.5 °C, что обеспечивало воспроизводимость результатов.

Для экспериментального определения среднего объемно-поверхностного диаметра в условиях высокودинамичных вихревых течений применялся фотометрический метод прямого анализа дисперсного состава. В качестве фотометрического инструмента применялась система цифровой съемки с импульсной светодиодной (LED) подсветкой, а источника освещения – высокоинтенсивный светодиодный осветитель CaviLux Smart UHS с длительностью импульса до 10 нс и мощностью светового потока 200 Вт, что обеспечивало четкую фиксацию быстро движущихся капель без размытия. Регистрация изображений проводилась с помощью цифровой камеры Nikon Z6 Kit (максимальное разрешение 6048×4024), оснащенной макрообъективом Nikkor Z 24-70 f/4 S). Для исключения влияния внешнего освещения съемка осуществлялась в затемненной камере с полной синхронизацией по импульсу подсветки.

Для определения дисперсного состава в каждом опыте измеряли диаметры приблизительно 20 тыс. капель в диапазоне от 50 до 550 мкм. Предварительный анализ характера кривых распределения показал, что доля капель диаметром менее 50 мкм не превышает 1–3 % от общей массы орошаемой жидкости, поэтому их исключение из рассмотрения не влияет на точность определения диаметра Заутера. Капли размером более 550 мкм встречались единично ($< 0.5\%$ от общего числа) и также не учитывались. Обработка изображений выполнялась с использованием программы ImageJ (Wayne Rasband) с алгоритмами машинного обучения для автоматического распознавания и анализа размера и формы капель. Для валидации алгоритма распознавания капли использовались эталонные микросферы диаметром 100, 200 и 300 мкм. Разработанный алгоритм показал погрешность не более 3% при распознавании сферических частиц. Для минимизации ошибки, связанной с возможным отклонением формы капель от сферической, в алгоритм обработки был включен критерий округлости (> 0.9). Капли, не удовлетворяющие этому критерию, исключались из анализа. Каждый режим исследовался в трехкратной повторности с вычислением среднего арифметического и доверительного интервала (доверительная вероятность 0.95).

Результаты и их обсуждение

Получены дифференциальные кривые распределения капель жидкости по размерам на системе «воздух–вода» в вихревых устройствах: с аксиально-лопаточными (рис. 2а) и тангенциально-лопаточными (рис. 2б) завихрителями потока газа. Для всех исследованных режимных параметров наблюдается одномодальное распределение среднего (объемно-поверхностного) диаметра с максимумом в области 0.15–0.22 мм для аксиально-лопаточных завихрителей и 0.20–0.26 мм – для тангенциально-лопаточных. Как и предполагалось, повышение скорости газа в живом сечении завихрителя приводит к уменьшению среднего диаметра капель, что характеризуется смещением моды влево для обоих типов завихрителей.

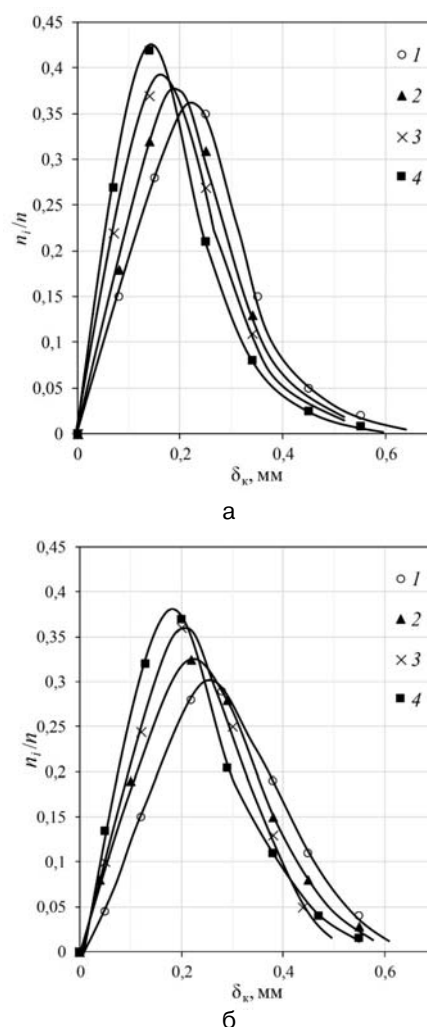


Рис. 2. Распределения капель орошающей жидкости в вихревом устройстве: а – с аксиально-лопаточным завихрителем; б – с тангенциально-лопаточным завихрителем при скорости газа $W_{гз}$, м/с; 1 – 22; 2 – 30; 3 – 38; 4 – 46

Сравнительный анализ различных конструкций вихревых сепарационных устройств показывает, что тангенциально-лопаточные завихрители обеспечивают большее значение модального диа-

метра в среднем на 17% при сопоставимых скоростях газа. Кривые распределения размеров капель для аксиально-лопаточных завихрителей демонстрируют более выраженную асимметрию (коэффициент асимметрии 0.8–1.2) по сравнению с тангенциальными (0.5–0.7). Более выраженная асимметрия распределения обусловлена неравномерностью поля скоростей вблизи оси завихрителя, где подводится жидкость. При аксиальном подводе жидкая фаза попадает в область с более высокими локальными скоростями газа, приводящими к дополнительному распаду капли на периферии. В тангенциальных завихрителях подвод жидкости осуществляется в закрученный поток вблизи стенки, где поле скоростей более однородно, что приводит к формированию капель большего размера и более узкому распределению их размеров.

Также при уменьшении скорости W_{ax} в два раза происходит уменьшение максимальной доли фракции капель приблизительно на 9% для аксиально-лопаточного завихрителя и на 15% для тангенциально-лопаточного (рис. 2).

Образованные капли характеризуются высокой степенью сферичности, стабильностью формы в рабочей зоне устройства и отсутствием вторичного распада. Это подтверждается отсутствием полимодальности распределений, что свидетельствует о достижении равновесного состояния, при котором силы поверхностного натяжения уравнивают аэродинамическое воздействие.

Исследование влияния физических характеристик жидкой фазы на ее дисперсность показало (рис. 3), что при увеличении вязкости в 15 раз средний объемно-поверхностный диаметр капли практически не изменяется для обоих типов завихрителей (в пределах погрешности измерений), в том числе и при увеличении скорости газа в 1.44 раза (для аксиального завихрителя). То есть в исследуемых устройствах преобладает инерционный режим распада капель над вязкостным.

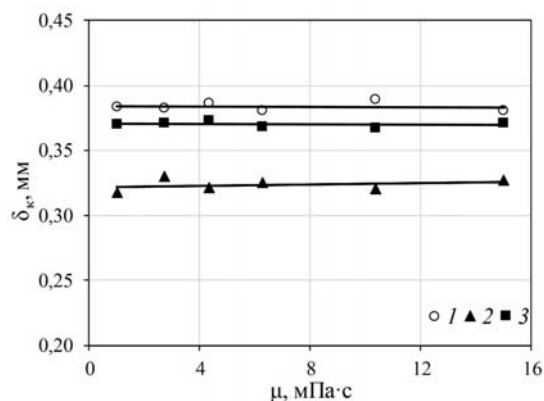


Рис. 3. Зависимость среднего диаметра капли от вязкости жидкости для аксиально-лопаточного завихрителя: 1 – $W_{ax} = 32$ м/с; 2 – $W_{ax} = 46$ м/с; и тангенциально-лопаточного завихрителя: 3 – $W_{ax} = 32$ м/с

В то же время изменение поверхностного натяжения жидкости от 35 до 70 мН/м оказывает существенное влияние на диаметр капли по Заутеру, что представлено на рис. 4. Выявлено, что как для аксиальных, так и для тангенциальных лопаточных завихрителей двукратное увеличение поверхностного натяжения σ приводит к росту среднего диаметра капель и смещению кривой распределения в область больших размеров.

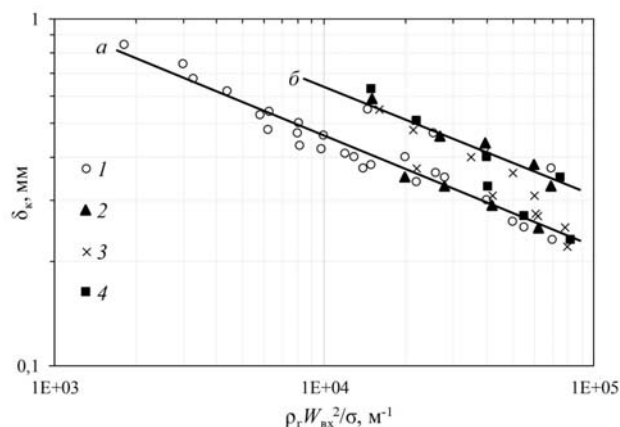


Рис. 4. Зависимость среднего диаметра капель орошаемой жидкости δ_k в вихревых орошаемых устройствах с аксиально-лопаточными (а) и тангенциально-лопаточными (б) завихрителями от поверхностного натяжения жидкости σ , мН/м: 1 – 70; 2 – 58; 3 – 46; 4 – 35

Экспериментальные данные были систематизированы и представлены в виде критериальных зависимостей. Для вихревых орошаемых устройств с аксиально-лопаточными завихрителями была получена зависимость вида:

$$\frac{\delta_{32}}{D} = 0.054 \left(\frac{\rho_g W_{ax}^2 D}{\sigma} \right)^{-0.35}, \quad (2)$$

а с тангенциально-лопаточными завихрителями:

$$\frac{\delta_{32}}{D} = 0.066 \left(\frac{\rho_g W_{ax}^2 D}{\sigma} \right)^{-0.35}, \quad (3)$$

где D – диаметр устройства, м;
 ρ_g – плотность газа, кг/м³;
 W_{ax} – скорость газа в живом сечении завихрителя, м/с;
 σ – поверхностное натяжение капли, мН/м.

Отклонение опытных данных от расчетных значений среднего диаметра капель не превышало 5%.

Сравнение кривых распределения, а также значений средних диаметров капель, полученных при одинаковых условиях в устройствах с аксиальными и тангенциальными лопаточными завихрителями, показывает, что для тангенциальных устройств капли орошающей жидкости крупнее,

что объясняется более низким уровнем скорости газа вблизи глухого торца завихрителя. Следует отметить, что при диспергировании орошающей жидкости получаются достаточно крупные капли, полная сепарация которых в вихревом устройстве не вызывает сомнений.

Данные зависимости позволяют определить степень диспергирования капель в вихревых сепарационных устройствах, что необходимо для нахождения площади межфазной поверхности и последующей оценки эффективности процессов мокрой газоочистки. Разработанные критериальные модели позволяют инженерам оптимизировать конструкции вихревых сепарационных устройств для промышленных приложений. Например, для очистки газа с высокой концентрацией частиц необходимо увеличить удельную поверх-

ность капель (выбрать режим с высокой скоростью газа и низким поверхностным натяжением), в то время как для сохранения орошения следует предпочесть тангенциальные завихрители. Кроме того, независимость диаметра капли от вязкости позволяет использовать более вязкие абсорбенты без изменения конструкции аппарата.

Таким образом, выбранный метод проведения эксперимента обеспечил комплексный анализ процесса диспергирования жидкости в вихревых сепарационных устройствах. Полученные критериальные зависимости и установленные закономерности позволяют проводить целенаправленный инженерный расчет и оптимизацию вихревых устройств для задач мокрой очистки газовых выбросов в различных отраслях промышленности.

Литература

1. Makhmudov M.J., Yuldashev T.R. Cleaning of Industrial Emissions from Gas and Dispersive Particles // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. – 2023. – V.16, №2. – Pp.198-210.
2. Чагин О.В., Блиничев В.Н., Колобов М.Ю. Эффективность процесса мокрого пылеулавливания в аппаратах с различными типами контактных устройств // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2021. – №2(66). – С.89-93.
3. Дмитриева О.С., Харьков В.В., Николаев А.Н. Экспериментальное исследование очистки промышленных газов от пыли в вихревом скруббере // Экология и промышленность России. – 2025. – Т.29, №6. – С.4-10.
4. Акулич А.В., Лустенков В.М., Акулич А.А. Эффективные способы и вихревые аппараты для очистки пылегазовых выбросов от мелкодисперсных частиц // Вестник Могилевского государственного университета продовольствия. – 2018. – №1(24). – С.75-81.
5. Николаев А.Н., Нуртдинов Н.М., Харьков В.В. Эффективность инерционного осаждения частиц на каплях жидкости в полых вихревых аппаратах при очистке выбросов пищевых производств // Вестник технологического университета. – 2015. – Т.18, №3. – С.294-296.
6. Быков В.Н., Лаврентьев Т.Е. Разрушение пленки жидкости, стекающей с кромки пластины в сputном потоке газа // Инженерно-физический журнал. – 1976. – Т.31, №6. – С.1074-1078.
7. Даскал Ю.И. Метод расчета дисперсности двухфазного потока с учетом распада капель // Известия вузов. Энергетика. – 1983. – №5. – С.65-69.
8. Kharkov V.V. Mathematical modelling of thermolabile solutions concentration in vortex chamber // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V.980. – P.012006.
9. Николаев А.Н., Дмитриева О.С., Харьков В.В. Определение дисперсного состава капель во вращающемся капельном слое вихревого сепарационного устройства // Вестник технологического университета. – 2024. – Т.27, №6. – С.90-93.

References

1. Makhmudov M.J., Yuldashev T.R. [Cleaning of industrial emissions from gas and dispersive particles]. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, 2023, vol.16, no.2, pp.198-210.
2. Chagin O.V., Blinichev V.N., Kolobov M.Yu. *Effektivnost' protsessa mokrogo pyleulavlivaniya v apparatakh s razlichnymi tipami kontaknykh ustroystv* [Effectiveness of the wet dust collection process in apparatus with various types of contact devices]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regionalnoe prilozhenie* [Modern science-intensive technologies. Regional application], 2021, no.2(66), pp.89-93.
3. Dmitrieva O.S., Kharkov V.V., Nikolaev A.N. *Ekspperimental'noye issledovaniye ochistki promyshlennykh gazov ot pyli v vikhrevom skrubbere* [Experimental study of industrial dust gas cleaning using vortex scrubber]. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2025, vol.29, no.6, pp.4-10.
4. Akulich A.V., Lustenkov V.M., Akulich A.A. [Effective methods and vortex apparatus for cleaning dust-gas emissions from fine particles]. *Vestnik Mogilevskogo gosudarstvennogo universiteta prodovolstviya* [Bulletin of Mogilev State University of Food], 2018, no.1(24), pp.75-81. (In Russian)
5. Nikolaev A.N., Nurtdinov N.M., Kharkov V.V. *Effektivnost' inertsiionnogo osazhdeniya chastits na kaplyakh zhidkosti v polykh vikhrevykh apparatakh pri ochistke vybrosov pishchevykh proizvodstv* [Efficiency of inertial particle deposition on liquid droplets in hollow vortex apparatus for food production emissions purification]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Technological University], 2015, vol.18, no.3, pp.294-296.
6. Bykov V.N., Lavrentyev T.E. *Razrusheniye plenki zhidkosti, stekayushchey s kromki plastiny v sputnom potoke gaza* [Destruction of a liquid film flowing from a plate edge in a co-current gas flow]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], 1976, vol.31, no.6, pp.1074-1078.
7. Daskal Yu.I. *Metod rascheta dispersnosti dvukhfaznogo potoka s uchetom raspada kapel'* [Method for calculating the dispersity of a two-phase flow taking into account droplet breakup]. *Izvestiya vuzov*.

10. Дмитриева О.С., Харьков В.В., Николаев А.Н. Дисперсный состав жидкой фазы вихревого сепарационного устройства // Вестник технологического университета. – 2024. – Т.27, №5. – С.54-58.
11. Semiao V., Andrade P., Carvalho M. da G. Spray characterization: Numerical prediction of Sauter mean diameter and droplet size distribution // *Fuel*. – 1996. – V.75, №15. – Pp.1707-1714.
12. Зуев Ю.В. Математическая модель для расчета параметров факела распыла пневматической форсунки // Тепловые процессы в технике. – 2018. – Т.10, №5-6. – С.228-237.
13. Овчинников А.А., Харьков В.В. Описание структуры закрученных потоков в вихревых камерах // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т.17, №23. – С.322-325.
8. Kharkov V.V. [Mathematical modelling of thermolabile solutions concentration in vortex chamber]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol.980, pp.012006.
9. Nikolaev A.N., Dmitrieva O.S., Kharkov V.V. *Opredeleniye dispersnogo sostava kapel' vo vrashchayushchemsya kapel'nom sloye vikhrevogo separatsionnogo ustroystva* [Determination of droplet size distribution in a rotating droplet layer of a vortex separation device]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Technological University], 2024, vol.27, no.6, pp.90-93.
10. Dmitrieva O.S., Kharkov V.V., Nikolaev A.N. *Dispersnyi sostav zhidkoy fazy vikhrevogo separatsionnogo ustroystva* [Dispersed composition of the liquid phase of a vortex separation device]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Technological University], 2024, vol.27, no.5, pp.54-58.
11. Semiao V., Andrade P., Carvalho M.da G. [Spray characterization: Numerical prediction of Sauter mean diameter and droplet size distribution]. *Fuel*, 1996, vol.75, no.15, pp.1707-1714.
12. Zuev Yu.V. *Matematicheskaya model' dlya rascheta parametrov fakela raspyla pnevmaticheskoy forsunki* [Mathematical model for calculating spray torch parameters of a pneumatic nozzle]. *Teplovyie protsessy v tekhnike* [Heat Processes in Engineering], 2018, vol.10, no.5-6, pp.228-237.
13. Ovchinnikov A.A., Kharkov V.V. *Opisaniye struktury zakruchennykh potokov v vikhrevykh kamerakh* [Description of the structure of swirled flows in vortex chambers]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2014, vol.17, no.23, pp.322-325.