

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 662.62:662.75:662.94.069

EDN: VQYMJG

DOI: 10.21285/1814-3520-2026-3-491-503



Диспергирование водоугольных суспензий путём распыления пневматической форсункой с винтовой закруткой распыляющего газового агента

Д.В. Гвоздяков^{1✉}, А.В. Зенков², Л.И. Мальцев³^{1,2}Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Российская Федерация³Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация

Резюме. Цель – разработка способа управления формой газокapelьного факела при распылении водоугольных суспензий путем создания винтовой закрутки распыляющего агента в пневматической форсунке с внешним смешением. Объектом исследования являлись водоугольные суспензии, приготовленные из отходов обогащения каменного угля по двум технологиям: с кавитационной обработкой в роторном гидродинамическом генераторе и без нее. Эксперименты по распылению проведены на специализированном стенде с использованием пневматической форсунки, модернизированной за счет тангенциальной подачи воздуха в кольцевой канал для создания закрученного потока. Измерение размеров капелъ выполнялось методом интерферометрической визуализации частиц, регистрация скоростей – методом трассерной визуализации. Исследования проведены при расходах суспензии 100 и 200 г/с и избыточном давлении распыляющего агента 0,6 и 0,9 МПа. Установлено, что кавитационная обработка суспензии снижает динамическую вязкость при сдвиговых напряжениях более 50 с⁻¹ и увеличивает содержание частиц размером до 100 мкм на 10 %. При распылении обработанной суспензии средний размер капелъ составляет от 87,8 до 112,3 мкм, что на 29–42 % меньше по сравнению с необработанной. Показано, что при увеличении расхода суспензии со 100 до 200 г/с количество мелких капелъ снижается на 5–18 % в зависимости от давления, при этом возрастает доля крупных фракций. Скорость капелъ обработанной суспензии на 10–15 % выше, чем необработанной. Закрутка распыляющего агента увеличивает угол раскрытия факела с 21,1 до 25,8° при незначительном (на 18 %) увеличении среднего размера капелъ по сравнению с прямой подачей. Предложенная модификация форсунки позволяет управлять геометрией факела при сохранении приемлемого уровня дисперсности, а применение кавитационной обработки значительно улучшает реологические свойства суспензий и характеристики распыления, что важно для эффективного сжигания водоугольных топлив в энергетических установках.

Ключевые слова: диспергирование, водоугольная суспензия, пневматическая форсунка, газокapelьная струя, винтовая закрутка распыляющего агента

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (проект № 126021217042-8).

Для цитирования: Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Мальцев Л.И. Диспергирование водоугольных суспензий путём распыления пневматической форсункой с винтовой закруткой распыляющего газового агента // iPolytech Journal. 2026. Т. 30. № 3. С. 491–503. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-491-503>. EDN: VQYMJG.

POWER ENGINEERING

Original article

Atomization of coal-water slurries using a pneumatic atomizer with helical swirl of the atomizing gas

Dmitry V. Gvozdyakov^{1✉}, Andrey V. Zenkov², Leonid I. Maltsev³^{1,2}National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation³Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

Abstract. This study presents a method for controlling the shape of the spray plume during the atomization of coal-water slurries by introducing helical swirl of the atomizing gas in an external mixing pneumatic atomizer. Coal-water slurries obtained from coal preparation waste were investigated using two processing routes: with and

without treatment in a rotary hydrodynamic cavitation reactor. Atomization experiments were conducted on a dedicated test rig modified to introduce air tangentially into the annular channel, thereby producing a swirling flow. Droplet size was measured using interferometric particle imaging, while droplet velocity was determined by particle tracking velocimetry. The experiments were performed at slurry flow rates of 100 and 200 g/s and atomizing gas pressures of 0.6 and 0.9 MPa (gauge). Cavitation treatment reduced the dynamic viscosity of the slurry at shear rates above 50 s^{-1} and increased the fraction of particles smaller than $100 \text{ }\mu\text{m}$ by 10 %. Atomization of the treated slurry produced average droplet diameters ranging from 87.8 to $112.3 \text{ }\mu\text{m}$, which were 29–42 % smaller than those obtained with the untreated slurry. As the slurry flow rate increased from 100 to 200 g/s, the proportion of fine droplets decreased by 5–18 %, depending on the pressure, whereas the fraction of larger droplets increased. The velocity of droplets obtained from the treated slurry was 10–15 % higher than that of droplets produced from the untreated slurry. The introduced helical swirl of the atomizing gas increased the spray cone angle from 21.1° to 25.8° , while causing only a modest (18 %) increase in average droplet diameter compared with straight gas injection. The proposed atomizer modification provides effective control of spray geometry while maintaining acceptable atomization quality. In addition, cavitation treatment significantly improves the rheological properties of coal-water slurries and their atomization characteristics, which is important for efficient combustion of coal-water fuels in power generation systems.

Keywords: dispersion, coal-water slurry, compressed air atomizer, gas-droplet jet, helical swirl of the atomizing agent

Funding. Thy study was carried out within the framework of a state assignment of the Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (project No. 126021217042-8).

For citation: Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Maltsev L.I. Atomization of coal-water slurries using a pneumatic atomizer with helical swirl of the atomizing gas. *iPolytech Journal*. 2026;30(3):491-503. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-491-503>. EDN: VQYMJG.

ВВЕДЕНИЕ

Методы распыления жидкостей высокоскоростными газовыми потоками находят применение в различных областях техники, включая энергетику, где их используют для сжигания многокомпонентных суспензионных топлив в котлах [1–3].

Актуальность применения новых многокомпонентных топлив обусловлена ростом стоимости традиционных энергоресурсов [4], ужесточением экологических требований [5], а также наличием больших объемов отходов обогащения угля и агропромышленного комплекса, загрязняющих окружающую среду. Их утилизация не только решает экологические задачи, но и позволяет использовать местные вторичные ресурсы для улучшения теплофизических свойств низкосортного топлива. К перспективным видам таких топлив относят водоугольные суспензии (ВУС) с добавками, включающими отходы углеобогащения (фильтр-кек) [6], отработанные нефтепродукты (масла, шламы) [7], древесные опилки [8] и продукты пиролиза древесины [9]. Введение этих компонентов в состав водоугольных топлив (ВУТ) способствует улучшению характеристик воспламенения и горения, а также утилизации отходов [10, 11]. Однако использование новых топлив сопряжено с трудностями, такими как изменение реологических свойств суспензий (вязкости,

плотности, поверхностного натяжения), что требует усовершенствования технологий их приготовления, распыления и сжигания. Несмотря на разработку экспериментальных и численных моделей для исследования горения ВУС [12, 13], проблемы, связанные с диспергированием в реальных условиях, остаются не до конца решенными.

Для распыления суспензионных топлив применяются различные пневматические форсунки, конструкции которых делятся на два основных типа: с внутренним [14] и внешним [15, 16] смешением топлива с распыляющим агентом (РА). Ключевые требования к ним – формирование мелкодисперсного факела и стабильная работа.

Отличительной чертой форсунки [15] является использование высокоскоростного РА. Истекая из конического щелевого сопла, РА формирует сходящийся поток (рис. 1), струи которого, сталкиваясь, создают осевое течение и возвратную кумулятивную струю. Подаваемая под давлением ВУС образует осесимметричную струю, которая при встрече с кумулятивной газовой струей внутри диффузора трансформируется в газожидкостный поток, движущийся вдоль его стенок. Последующее взаимодействие этого потока с высокоэнергетическим газом из щелевого канала приводит к их смешению и образованию тороидального вихря. Данные процессы, наряду с высокой скоростью

газа, обеспечивают интенсивное диспергирование топлива. Однако существенным недостатком данной форсунки на некоторых режимах является формирование узкого и чрезмерно протяженного факела, что особенно критично в малоразмерных горелочных устройствах промышленных и маломощных котлов.

Целью настоящей работы является повышение эффективности работы форсунки и разработка способа управления формой газокапельного факела путем винтовой закрутки РА, а также проведение экспериментальных исследований процессов диспергирования водоугольных суспензий и их распыления пневматической форсункой с закруткой РА.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Модифицированная пневматическая форсунка. В пневматической форсунке [15] (рис. 1) газ РА подводится в кольцевой канал через два или более патрубков, установленных вдоль оси канала.

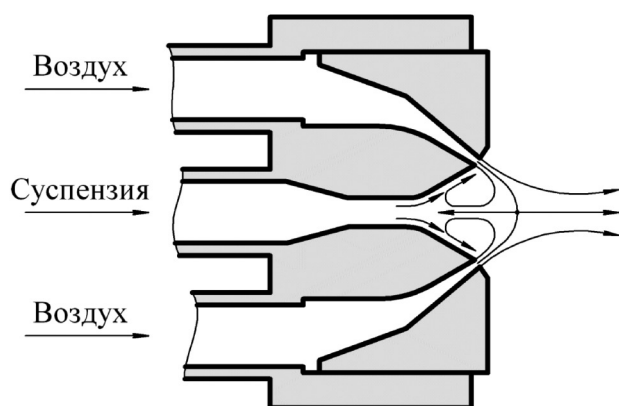


Рис. 1. Схема пневматической форсунки [15]
Fig. 1. Compressed air atomizer diagram [15]

В патенте [15] предлагается в форсунке создать винтовую закрутку потока РА, выходящего из щелевого газового сопла, путем установки винтового завихрителя перед выходом из кольцевого газового канала.

В данной работе использован другой способ закрутки, когда газовый распылительный агент вводится в кольцевой канал перед щелевым соплом по двум (или более) патрубкам с осями, установленными под углом к оси симметрии канала (например, под прямым), тангенциально к его внешней границе [15]. На рис. 2 схематично представлена схема такой реализации закрутки РА в форсунке.

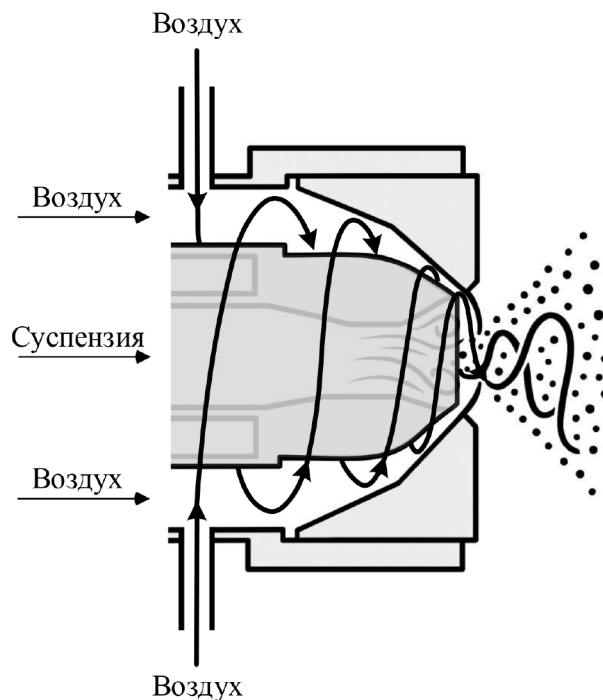


Рис. 2. Схема пневматической форсунки [15] с тангенциальной подачей распыляющего агента
Fig. 2. Diagram of a compressed air atomizer [15] with tangential feed of the atomizing agent

Вышеуказанное решение имеет следующие преимущества перед способом закрутки РА [15]: вблизи сопла, в области высоких температур (более 1000°C) в условиях камер сгорания отсутствуют дополнительные элементы, отвечающие за нормальную безотказную работу форсунки, нет дополнительных гидравлических сопротивлений.

Материалы и технология приготовления образцов. С целью приготовления образцов ВУС для экспериментальных исследований по распылению использовались мелкодисперсные отходы обогащения каменного угля, взятого на ОФ «Северная», г. Березовский Кемеровской обл. Среднее значение зольности трех проб угля составило 5,7 %. Низшая теплота сгорания: пробы угля по бомбе равна 22100 кДж/кг; ВУС 10500 кДж/кг.

Согласно первой технологии, приготовление ВУС включает два основных этапа: дозированное смешивание воды с измельченным углем и последующую кавитационную обработку (КО) полученной смеси на роторном гидродинамическом генераторе кавитаций (РГДГК). В результате процесса в РГДГК [17] достигается доизмельчение угольной массы, гомогенизация состава и химическая активация топлива. Вторая технология приго-

товления ВУС основана на смешивании измельченного угля и воды при помощи миксера (без КО). Таким образом, при проведении исследований использовались два вида ВУС.

Методика определения гранулометрического состава водоугольных суспензий.

Содержание массы частиц данного размера в угольной массе суспензии определялось при помощи лазерного дифракционного анализатора SALD-210V. Для определения гранулометрического состава ВУС в данном случае был применен способ, основанный на последовательной промывке образцов суспензий на ситах с убывающими размерами ячеек. В данной работе использовались сита с размерами ячеек: 900, 630, 315, 140, 80, 63, 40, 20 мкм. По результатам измерений построены графики интегрального распределения суммарной массы частиц угля по размерам, и в том числе определяется массовая доля всех частиц размером менее минимального размера ячейки использованного ряда сит.

Методика определения вязкости суспензии. При практическом использовании

ВУС более важной характеристикой суспензии представляется динамическая вязкость, которая определяется напряжением и величиной скорости сдвига и может непосредственно характеризовать поведение ВУС в тех или иных состояниях. В данной работе динамическая вязкость измерялась с помощью вискозиметра «Реотест-2».

Согласно [18], при измерении вязкости с помощью ротационного вискозиметра может возникать погрешность из-за некачественного контроля температуры (около 3–4 %). Данная погрешность была минимизирована путем контроля температуры в помещении и поддержания ее с помощью внешнего обогревателя $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$. Погрешность измерений вискозиметра Реотест-2 составляет до 3 %.

Методика измерения размера капель и их скоростей в струе. Экспериментальное определение характеристик газокapельных струй проводилось на специализированном стенде, представленном на рис. 3, где ВУТ распылялось в цилиндрическую камеру диаметром 1,5 м и длиной 6 м. Данная установ-

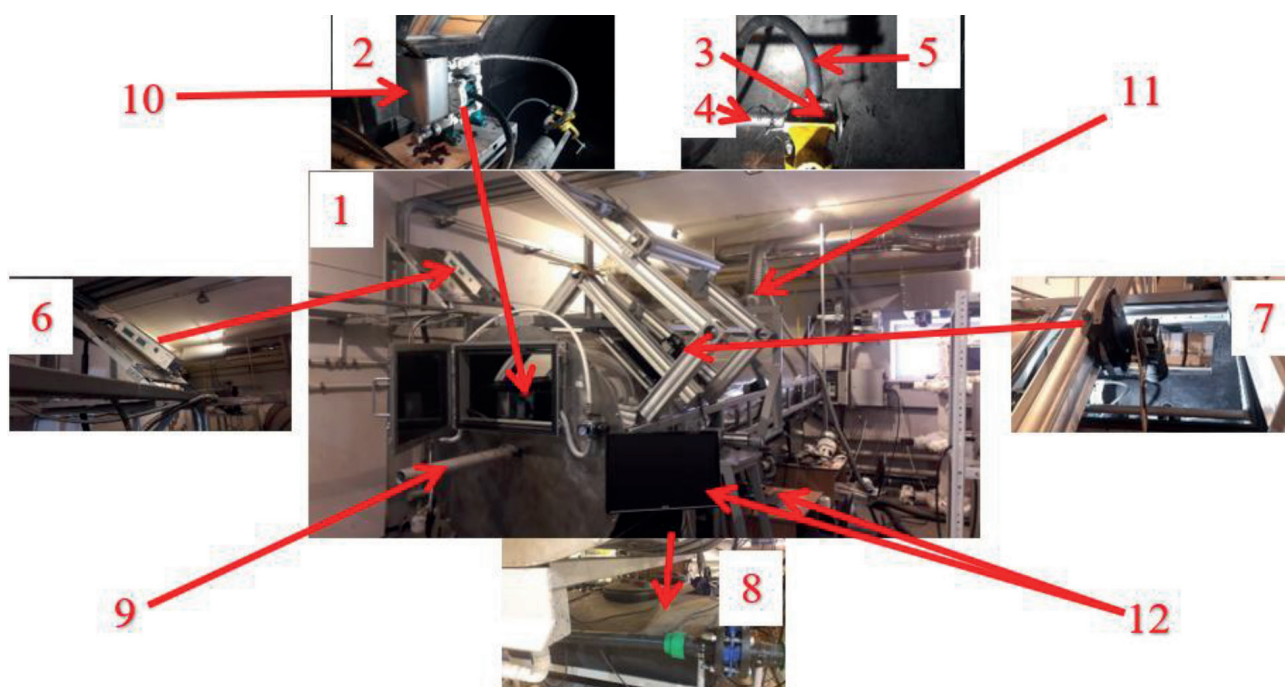


Рис. 3. Исследовательский стенд: 1 – внешний вид; 2 – насос для подачи водоугольных топлив; 3 – форсунка; 4 – линия подачи водоугольных топлив; 5 – линия подачи распыляющего агента; 6 – лазер (Beamtech Vlite-200); 7 – кросскорреляционная камера (ImperX Bobcat B2020); 8 – емкость временного хранения отработанного водоугольного топлива; 9 – направляющая крепления форсунки; 10 – емкость для водоугольных топлив; 11 – вытяжная вентиляция; 12 – компьютер и дублирующий монитор

Fig. 3. Research stand: 1 – external appearance; 2 – coal-water fuel feed pump; 3 – air atomizer; 4 – coal-water fuel feed line; 5 – atomizing agent feed line; 6 – laser (Beamtech Vlite-200); 7 – cross-correlation chamber (ImperX Bobcat B2020); 8 – temporary storage tank for spent coal-water fuel; 9 – air atomizer mounting guide; 10 – coal-water fuel tank; 11 – exhaust ventilation; 12 – computer and backup monitor

ка позволяет исследовать параметры распыления жидких и сухих топлив, а также проводить анализ работы форсунок, используемых в энергетических установках. Исследования осуществлялись на стенде [19]. Пневматическая форсунка размещалась в центре на продольной оси аэродинамического имитатора камеры сгорания котла.

Размер капель ВУС после распыления измеряли методом интерферометрической визуализации частиц IPI (Interferometric Particle Imaging). Этот метод применим для определения мгновенных пространственных распределений размеров капель в диапазоне от 10 до 1000 мкм. Скоростные характеристики капель регистрировались с помощью метода трассерной визуализации PIV (Particle Image Velocimetry) [20]. На рис. 5 схематически показана область струи, в которой осуществлялась регистрация размеров и скоростей капель.

Известно, что источниками погрешности метода PIV могут выступать:

- локальный градиент скорости;
- размер, концентрация и смещение капель;
- оптические эффекты и т.д. [20].

Однако погрешность данной техники измерения профилей скорости не превышает 8 % [21].

По различным оценкам погрешность метода IPI в идеальном случае может составлять 1,5–2 % [22]. Оценка данной погрешности авторами составила 2 %.

Алгоритм расчета случайных погрешностей разработан в соответствии с математическим аппаратом теории ошибок [23, 24].

Метод IPI отличается универсальностью, поскольку применим для анализа как сферических, так и капель произвольной формы. В случае непрозрачных капель, к которым относятся частицы ВУС, фиксируется исключительно свет, отраженный от их поверхности. Следствием этого является концентрация информации о форме капли в рассеянном излучении, которое регистрируется при определенном угле рассеяния. Этот собранный свет несет в себе достаточные данные для определения размера капли, поскольку существует прямая зависимость между частотой интерференционных полос и диаметром капли.

Регистрация капель:

- для определения размеров осуществлялась в области 226–350 мм, расположенной на продольной оси струи на расстоянии 225 мм от сопла форсунки;
- скоростей осуществлялась в области 0–350 мм, расположенной на продольной оси струи.

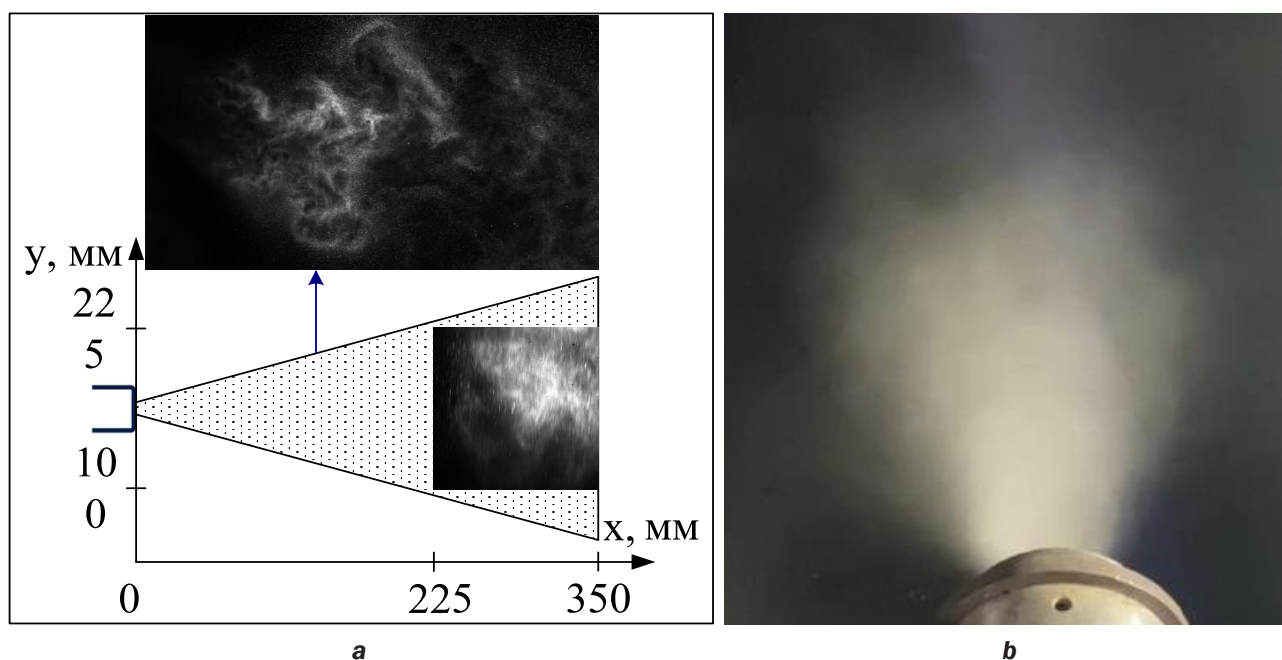


Рис. 4. Область регистрации струи: а – принципиальная схема; б – типичное изображение газокпельной струи водоугольной суспензии

Fig. 4. Jet detection area: a – schematic diagram; b – typical image of a gas-droplet jet of a coal-water slurry

Экспериментальные исследования характеристик газокапельных струй выполнены при следующих параметрах распыления (табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для проведения экспериментов были приготовлены две партии образцов ВУС: а) с кавитационной обработкой и б) без обработки. Отношение жидкое/твердое в образцах ВУС составляет 50/50. Подготовка образцов состоялась за 30 дней до испытаний и к моменту начала экспериментов суспензии частично расслоились: образцы партии а) – незначительно и партии б) – существенно. Поэтому перед проведением экспериментов образцы (в течение 2 мин) взбалтывались миксером до визуально и тактильно наблюдаемого однородного состояния.

С целью исключения засорения насоса и форсунки в процессе распыления, а также демонстрации характеристик исходного материала, суспензии пропускались через сито с размером ячейки 1×1 мм. После фильтрации двух равных по массе порций а) и б) на ситах остаются достаточно крупные (более 1 мм) сгустки частиц угля. Ниже на фото (рис. 5)

показаны эти частицы. Как видим, суспензии, прошедшие кавитационную обработку, содержат меньше сгустков угля и меньшее количество сгустков угля, размеры которых заметно меньше.

Гранулометрический состав суспензий.

Гранулометрический состав ВУС, описанных выше, определялся путем рассева образцов суспензий, прошедших обработку на РГДГК при разных значениях времени обработки, включая ноль (то есть, без обработки). На рис. 6 показаны результаты измерений в виде интегральных распределений.

Зависимости (см. рис. 6) иллюстрируют, что содержание суммарной массы частиц размером до 100 мкм после обработки на РГДГК в течение 14 с возрастает примерно на 10 %. Увеличение времени обработки до 40 с и более в диапазоне изменения размеров частиц от 10 мкм до 1 мм мало влияет на перераспределение частиц по размерам.

Вязкость. На рис. 7 показаны зависимости динамической вязкости угольных суспензий от времени обработки ВУС на РГДГК при больших и малых значениях скоростей сдвига. Как видим, при скоростях сдвига больше 20 (1/с) кавитационная обработка ВУС даже при малых временах обработки приводит к

Таблица 1. Экспериментальные исследования характеристик газокапельных струй

Table 1. Experimental studies of gas-droplet jet characteristics

Расход водоугольной суспензии, г/с	Избыточное давление распыляющим агентом, МПа
100	0,6
200	0,6
100	0,9
200	0,9



a



b

Рис. 5. Отфильтрованная масса угольного продукта образца водоугольной суспензии: а – до кавитационной обработки; б – после кавитационной обработки

Fig. 5. Filtered mass of coal product of a coal-water slurry sample: a – before cavitation treatment; b – after cavitation treatment

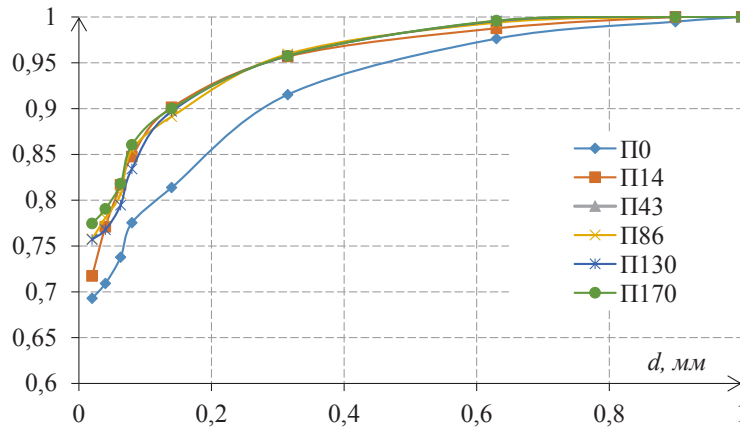


Рис. 6. Гранулометрический состав водоугольной суспензии при различных значениях времени ее обработки на роторном гидродинамическом генераторе кавитации

Fig. 6. Particle size distribution of coal-water slurry at different values of its processing time on a rotary hydrodynamic cavitation generator

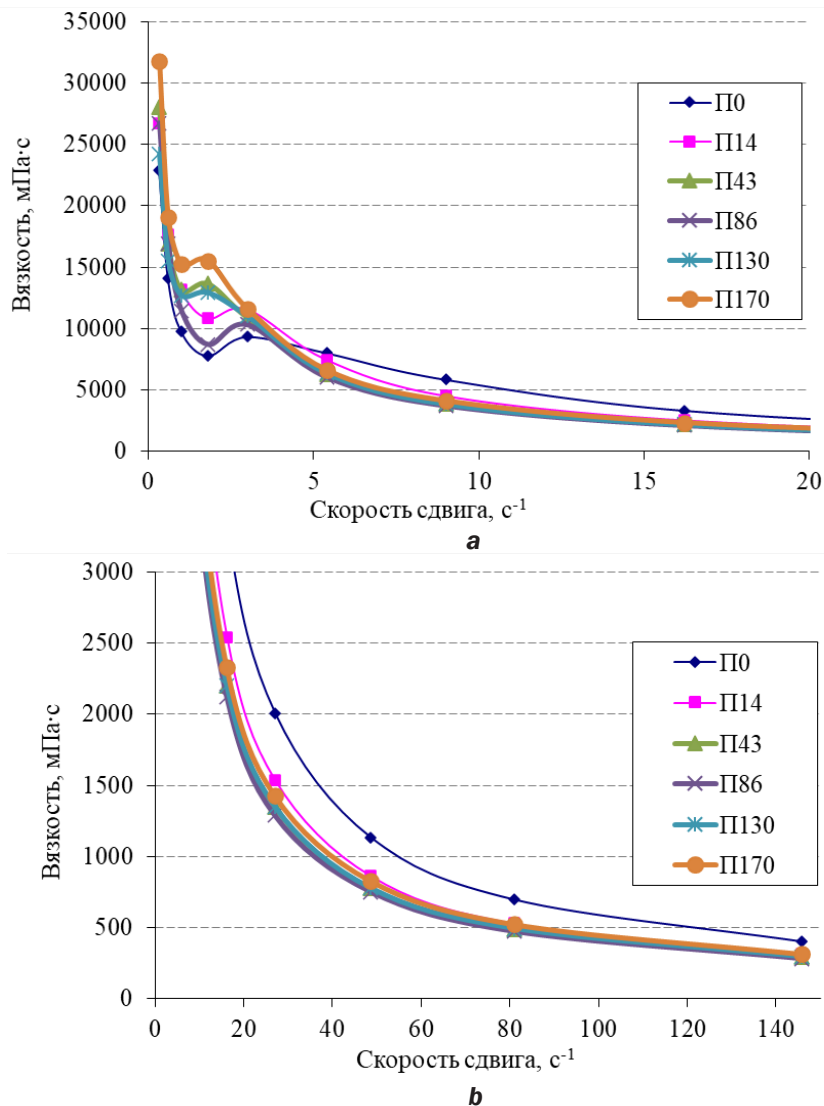


Рис. 7. Динамическая вязкость суспензий в зависимости от скорости сдвига и времени обработки на роторном гидродинамическом генераторе кавитации: а – при малых значениях; б – при больших значениях

Fig. 7. Dynamic viscosity of slurries depending on the shear rate and processing time on a rotary hydrodynamic cavitation generator: a – at low values; b – at high values

существенному снижению динамической вязкости ВУС. Увеличение времени обработки суспензий на РГДГК свыше 15–20 с влияет на вязкость мало.

Необходимо отметить, что при $\tau < 20$ (1/с) динамическая вязкость ВУС резко увеличивается, при этом в случае $\tau < 6$ (1/с) ее обработка на РГДГК приводит к большему увеличению вязкости в сравнении с необработанной суспензией.

Такие изменения динамической вязкости суспензии с постоянным содержанием дисперсной массы объясняются эффектом увеличения удельной свободной поверхности твердой фракции в результате уменьшения размера частиц угля после обработки на РГДГК.

Получить достоверные экспериментальные данные значений динамической вязкости суспензии без КО не удалось. При проведении измерений в аналогичных с ВУС с КО условиях наблюдалось проскальзывание шпинделя вискозиметра. Обусловлено это тем, что суспензия без КО существенно неоднородна.

Измерение размера и скорости капель в струе. Экспериментальные исследования процессов фрагментации струи ВУС в области исследования позволили установить влияние параметров распыления и свойств суспензии на структуру струи и ее гранулометрический состав. На рис. 8 представлен фрагмент результатов регистрации (на ма-

трице кросскорреляционной камеры) газокапельной струи ВУС и в процессе обработки этого снимка при помощи программного обеспечения ActualFlow [13].

В табл. 2 представлены результаты измерения характерных размеров и скоростей капель ВУС после КО, а в табл. 3 – без КО. Ниже в табл. 2, 3 указаны режимы с характерными значениями расходов ВУС G_1 и G_2 , 100 и 200 г/с, давления воздуха в газовой камере форсунки P_1 и P_2 , 0,6 (расход воздуха 0,1 м³/с) и 0,9 (расход воздуха 0,15 м³/с) МПа соответственно. Удельные расходы воздуха на распыление ВУС составили 1,0 и 0,75 м³/кг.

Экспериментально установлено, что после распыления ВУС, подверженной кавитационной обработке, при избыточном давлении РА 0,6 МПа и увеличении расхода суспензии от 100 до 200 г/с, общее количество капель ВУС размером менее 90 мкм снижается на 12 %. Число капель суспензии – размером от 91 до 150 мкм и более 151 мкм – увеличивается на 12 и 33 % соответственно. При росте избыточного давления распыляющего агента в газовой камере форсунки до 0,9 МПа и увеличении расхода суспензии до значения, соответствующего G_2 , количество капель ВУС размером менее 90 мкм снижается на 9 %. Рост числа капель суспензии размером от 91 до 150 мкм, более 151 мкм при таком изменении давления воздуха составляет 7 и 48 %.

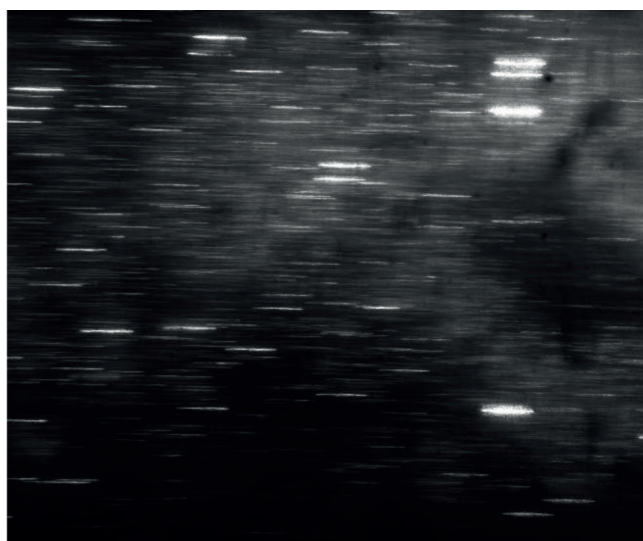
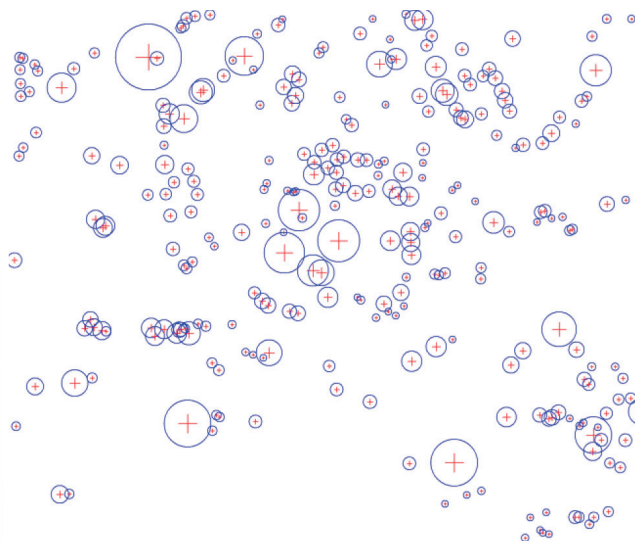
**a****b**

Рис. 8. Образы капель суспензии (пример): а – на матрице кросскорреляционной камеры; б – в процессе обработки
Fig. 8. Images of slurry droplets (example): a – on cross-correlation chamber matrix; b – during processing

Таблица 2. Размер и скорости капель водоугольной суспензии с кавитационной обработкой
Table 2. Size and velocity of coal-water slurry droplets with cavitation treatment

Размер, мкм	ВУС после КО		ВУС после КО	
	Режим: G_1, P_1	Режим: G_2, P_2	Режим: G_1, P_1	Режим: G_2, P_2
<90 мкм, %	61,8	54,2	64,5	58,6
91–150 мкм, %	23,8	26,8	27,4	29,4
>151 мкм, %	14,3	19	8,1	12
Среднее, мкм	96,2	112,3	87,8	95,3
Средняя скорость, м/с	45,9	35,6	46,5	38,4
<40 м/с, %	43,80	54,20	42,20	53,30
41–60 м/с, %	26,90	24,50	28,00	22,70
61–80 м/с, %	22,40	17,20	22,60	20,80
>80 м/с, %	6,90	4,10	7,20	3,20

Анализ результатов показал, что после распыления ВУС (после КО) при давлении РА 0,6 МПа средняя скорость капель суспензии в струе при ее расходе G_1 и G_2 составляет 46 и 36 м/с, соответственно. После распыления ВУС (после КО) и давлении РА 0,9 МПа средняя скорость капель суспензии в струе при ее расходе G_1 и G_2 составляет 46 и 38 м/с.

Результаты исследований изменения дисперсного состава газодожельной струи ВУС без КО иллюстрируют аналогичную (табл. 2) зависимость. При избыточном давлении РА 0,6 МПа и увеличении расхода суспензии от 100 г/с до 200 г/с количество капель ВУС размером менее 90 мкм снижается на 18 %. Количество капель суспензии размером от 91 до 150 мкм и более 151 мкм увеличивается на 8 и 15 % соответственно. При росте избыточного давления распыляющего агента в газовой камере форсунки до 0,9 МПа и увеличении расхода суспензии до значения,

соответствующего G_2 , количество капель ВУС размером менее 90 мкм снижается на 5 %. Рост числа капель суспензии размером от 91 до 150 мкм и более 151 мкм составляет 2 и 22 % соответственно.

После распыления ВУС (без КО) и давлении РА 0,6 МПа средняя скорость капель суспензии в струе при ее расходе G_1 и G_2 составляет 41 и 36 м/с. После распыления ВУС (без КО) и давлении РА 0,9 МПа средняя скорость капель суспензии в струе при ее расходе G_1 и G_2 составляет 42 и 36 м/с соответственно.

Дополнительно была также исследована прямая подача распыляющего агента (без закрутки воздуха в газовой камере форсунки) на форсунку при давлении воздуха 0,6 МПа и расходе кавитационно-обработанной ВУС 200 г/с (G_2). Полученные результаты дали возможность провести сравнительный анализ двух режимов диспергирования

Таблица 3. Размер и скорость капель водоугольной суспензии без кавитационной обработки
Table 3. Size and velocity of coal-water slurry droplets without cavitation treatment

Размер, мкм	Водоугольная суспензия без кавитационной обработки			
	Режим			
	G_1, P_1	G_2, P_2	G_1, P_1	G_2, P_2
<90 мкм, %	34,5	28,4	30,1	28,6
91–150 мкм, %	51,3	55,3	57,2	55,9
>151 мкм, %	14,2	16,3	12,7	15,5
Среднее, мкм	154,4	164,3	138,2	157,6
Средняя скорость, м/с	41,2	36,2	42,3	35,7
<40 м/с, %	41,30	50,80	43,50	51,40
41–60 м/с, %	28,70	25,60	24,60	20,80
61–80 м/с, %	20,80	19,40	20,50	18,30
>80 м/с, %	9,20	4,20	11,40	9,50

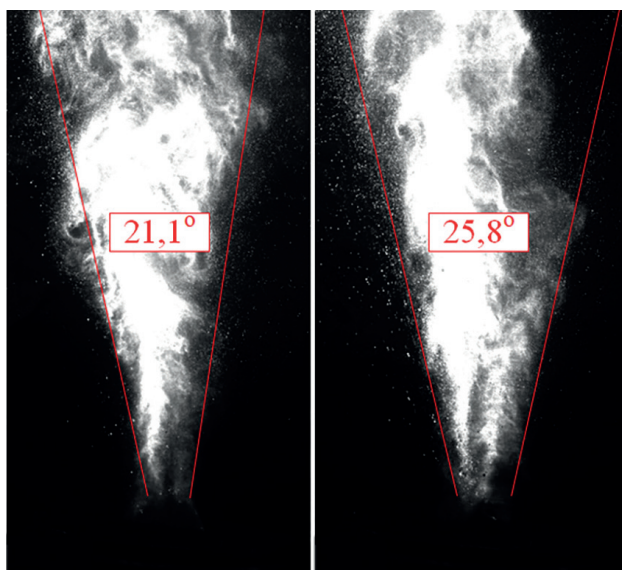
**a****b**

Рис. 9. Угол раскрытия струи: а – при прямой подаче воздуха; б – подача воздуха с завихрением

Fig. 9. Jet expansion angle: a – direct air supply; b – air supply with swirl

суспензии: с прямой подачей РА и с его закруткой в газовой камере форсунки. Так, средний размер капель ВУС при прямой подаче распыляющего агента составил 103,6 мкм, что на 8 % меньше, чем при тангенциальной подаче воздуха. Такое отличие объясняется тем, что при прямой подаче воздуха большая часть его энергии тратится на дробление капель ВУС. В случае с закруткой РА часть его энергии расходуется на закрутку потока и торможение за счет окружающего воздуха. Поэтому средний размер капель незначительно отличается. При этом, при прямой подаче РА, его удельный расход существенно выше (в среднем на 30 %) в сравнении с тангенциальной подачей РА на форсунку и составляет 2 м³/кг и 1,5 м³/кг при давлении воздуха в газовой камере форсунки Р₁ и Р₂, 0,6 (расход воздуха 0,1 м³/с) и 0,9 (расход воздуха 0,15 м³/с) МПа, соответственно. Таким образом, при использовании форсунки с закруткой РА расходуется меньше воздуха

при незначительном отличии среднего размера капель в струе.

Анализ изменения угла раскрытия струи в зависимости от способа подачи РА показал незначительные отличия. В целом значение угла раскрытия струи в случае с завихрением РА составило 25,8°. С прямой подачей РА угол раскрытия струи составил 21,1°.

На рис. 9 показаны кадры процессов распыления, иллюстрирующие угол раскрытия струи.

На практике увеличение угла раскрытия струи приведет к образованию большего объема топливовоздушной смеси, что может позволить повысить эффективность сжигания суспензии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований изменения дисперсного состава показали, что количество капель топлива размером менее 90 мкм при тангенциальной подаче воздуха снижается на 18 %, в сравнении с прямой подачей распыляющего агента. При росте избыточного давления распыляющего агента до 0,9 МПа количество капель суспензии размером <90 мкм снижается незначительно, а количество капель суспензии размером >151 мкм составляет 22 %, в сравнении с прямой подачей распыляющего агента. При прямой подаче распыляющего агента его удельный расход существенно выше (в среднем на 30 %) в сравнении с тангенциальной подачей распыляющего агента. Установлено, что угол раскрытия факела отличается незначительно (не более 4°). Таким образом, проведенные исследования подтверждают гипотезу о возможности изменения формы факела форсунки с внешним смешением с помощью тангенциального подвода к ней воздуха, что позволит повысить ее эффективность, особенно в малоразмерных горелочных устройствах промышленных и маломощных котлов.

Список источников

1. Мурко В.И., Карпенко В.И., Баранова М.П., Бухмиров В.В., Темлянцева Е.Н. Особенности сжигания композиционных водоугольных топлив // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2024. № 3. С. 5–12. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2024.3.005-012>. EDN: QBISII.
2. Jiang B., Li J., Chen D., Wang Li., Yang W. Synthesis and performance of sulfonated poly(styrene-alt-maleic anhydride) for coal-water slurry: the effect of structure on slurryability and stability // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2024. Vol. 685. P. 133154. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133154>. EDN: EBYZGA.
3. Zaostrovsky A.N., Murko V.I. Production and use of highly reactive water-coal fuel // Coke and Chemistry. 2023. Vol. 66. Iss. 9. P. 458–464. <https://doi.org/10.3103/s1068364x23701120>. EDN: QFLISJ.

4. Hille E. Europe's energy crisis: are geopolitical risks in source countries of fossil fuels accelerating the transition to renewable energy? // *Energy Economics*. 2023. Vol. 127. P. 107061. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107061>. EDN: DGQMPM.
5. Cherwoo L., Gupta I., Flora G., Verma R., Kapil M., Arya Sh.K., et al. Biofuels an alternative to traditional fossil fuels: a comprehensive review // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2023. Vol. 60. P. 103503. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103503>. EDN: XYHBUB.
6. Zhang K., Zhang Y., Zhou L., Li H., Shi W., Cheng X., et al. Experimental and theoretical insight into the effect of a novel composite dispersant on the properties of coal pitch water slurry // *Fuel*. 2024. Vol. 365. P. 131281. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131281>. EDN: KAIKH.
7. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Fragmentation of heated droplets of coal-water slurries containing petrochemicals // *Applied Thermal Engineering*. 2021. Vol. 195. P. 117190. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117190>. EDN: IUZHW.
8. Dorokhov V.V., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Anthropogenic emissions from coal-water slurry combustion: Influence of component composition and registration methods // *Environmental Research*. 2023. Vol. 223. P. 115444. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115444>. EDN: PBVXL.
9. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Kaltaev A.Zh. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liquid pyrolysis products of wood waste // *Energy*. 2022. Vol. 257. P. 124813. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124813>. EDN: LDMDWE.
10. Wang J., Wang Sh., Liu J., Chen C., Chen Y., Zheng X. Eco-friendly utilization of waste oil for preparing coal water slurry: additive suitability and dispersion mechanism // *Fuel*. 2023. Vol. 333. P. 126314. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126314>. EDN: ZMCEOI.
11. Sharma S.K., Jones A.R. Radiative transfer characteristics of clouds of atomised coal water slurry drops in a furnace // *Fuel*. 2002. Vol. 81. Iss. 1. P. 59–63. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00115-6](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00115-6).
12. Gaber C., Wachter P., Hochenauer C., Demuth M. Experimental investigation and demonstration of pilot-scale combustion of oil-water emulsions and coal-water slurry with pronounced water contents at elevated temperatures with the use of pure oxygen // *Fuel*. 2020. Vol. 282. P. 118692. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118692>. EDN: OQIIZR.
13. Alekseenko S.V., Dekterev A.A., Maltsev L.I., Kuznetsov V.A. Implementation of a three-stage scheme for the co-combustion of pulverized coal and coal-water slurry in an industrial boiler to reduce NOx emissions // *Process Safety and Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers*. 2023. Vol. 169. Part B. P. 313–327. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.034>. EDN: CSTGUY.
14. Deng Jianxin, Ding Zeliang, Zhou Houming, Tan Yuanqiang. Performance and wear characteristics of ceramic, cemented carbide, and metal nozzles used in coal–water–slurry boilers // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2009. Vol. 27. Iss. 5. P. 919–926. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2009.05.007>.
15. Патент № 2346756, Российская Федерация, С1, В05В 7/08. Пневматическая форсунка / Л.И. Мальцев; заявители и патентообладатели Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; Общество с ограниченной ответственностью Агентство «Городок». № 2007118139/12. Заявл. 15.05.2007; опубл. 20.02.2009. EDN: NRWQNP.
16. Shadrin E.Y., Anufriev I.S., Butakov E.B., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Maltsev L.I., et al. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner // *Fuel*. 2021. Vol. 303. P. 121182. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121182>. EDN: CZSNWN.
17. Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Мальцев Л.И., Поджаров Ю.С. Влияние кавитационной обработки на свойства водоугольных суспензий с добавками пирогенетической жидкости // *iPolytech Journal*. 2023. Т. 27. № 2. С. 297–309. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-297-309>. EDN: XKCIZP.
18. Mansour A., Chigier N. Air-blast atomization of non-Newtonian liquids // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 1995. Vol. 58. Iss. 2-3. P. 161–194. EDN: APMHEB.
19. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V. The effect of coal-water slurries spraying method on the characteristics of gas-droplet jets // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2026. Vol. 172. P. 110546. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2026.110546>. EDN: XQVHGQ.
20. Anufriev I.S., Shadrin E.Y., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Sharypov O.V. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 163. P. 114400. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114400>. EDN: EEVATZ.
21. Khashehchi M., Harun Z. Accuracy of tomographic particle image velocimetry data on a turbulent round jet // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2019. Vol. 77. P. 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.03.005>.
22. König G., Anders K., Frohn A. A new light-scattering technique to measure the diameter of periodically generated moving droplets // *Journal of Aerosol Science*. 1986. Vol. 17. Iss. 2. P. 157–167.
23. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / пер. с англ. Е.Г. Коваленко; под ред. Н.П. Бусленко. М.: Мир, 1972. 381 p.
24. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Ленинград: Наука, 1968. 96 p.
25. Alekseenko S.V., Kuznetsov V.A., Mal'tsev L.I., Dekterev A.A., Chernetskii M.Y. Analysis of combustion of coal-water fuel in low-power hot-water boiler via numerical modeling and experiments // *Journal of Engineering Thermophysics*. 2019. Vol. 28. Iss. 2. P. 177–189. <https://doi.org/10.1134/S1810232819020024>. EDN: QJHHPT.
26. Shlegel N.E., Tkachenko P.P., Strizhak P.A. Influence of viscosity, surface and interfacial tensions on the liquid droplet collisions // *Chemical Engineering Science*. 2020. Vol. 220. P. 115639. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115639>. EDN: IPYZPJ.

References

1. Murko V.I., Karpenok V.I., Baranova M.P., Bukhmirov V.V., Temlyantseva E.N. Features of combustion of composite coal-water fuel. *Vestnik of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2024;3:5-12. (In Russ.). <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2024.3.005-012>. EDN: QBISIL.
2. Jiang B., Li J., Chen D., Wang Li., Yang W. Synthesis and performance of sulfonated poly (styrene-alt-maleic anhydride) for coal-water slurry: the effect of structure on slurriability and stability. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2024;685:133154. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133154>. EDN: EBYZGA.
3. Zaostrovsky A.N., Murko V.I. Production and use of highly reactive water-coal fuel. *Coke and Chemistry*. 2023;66(9):458-464. <https://doi.org/10.3103/s1068364x23701120>. EDN: QFLISJ.
4. Hille E. Europe's energy crisis: are geopolitical risks in source countries of fossil fuels accelerating the transition to renewable energy? *Energy Economics*. 2023;127:107061. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107061>. EDN: DGQMPM.
5. Cherwoo L., Gupta I., Flora G., Verma R., Kapil M., Arya Sh.K., et al. Biofuels an alternative to traditional fossil fuels: a comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2023;60:103503. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103503>. EDN: XYHBUB.
6. Zhang K., Zhang Y., Zhou L., Li H., Shi W., Cheng X., et al. Experimental and theoretical insight into the effect of a novel composite dispersant on the properties of coal pitch water slurry. *Fuel*. 2024;365:131281. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131281>. EDN: KAIKHX.
7. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Fragmentation of heated droplets of coal-water slurries containing petrochemicals. *Applied Thermal Engineering*. 2021;195:117190. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117190>. EDN: IUZVHW.
8. Dorokhov V.V., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Anthropogenic emissions from coal-water slurry combustion: Influence of component composition and registration methods. *Environmental Research*. 2023;223:115444. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115444>. EDN: PBVVLX.
9. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Kaltaev A.Zh. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liquid pyrolysis products of wood waste. *Energy*. 2022;257:124813. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124813>. EDN: LDMDWE.
10. Wang J., Wang Sh., Liu J., Chen C., Chen Y., Zheng X. Eco-friendly utilization of waste oil for preparing coal water slurry: additive suitability and dispersion mechanism. *Fuel*. 2023;333:126314. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126314>. EDN: ZMCEOI.
11. Sharma S.K., Jones A.R. Radiative transfer characteristics of clouds of atomised coal water slurry drops in a furnace. *Fuel*. 2002;81(1):59-63. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00115-6](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00115-6).
12. Gaber C., Wachter P., Hochenauer C., Demuth M. Experimental investigation and demonstration of pilot-scale combustion of oil-water emulsions and coal-water slurry with pronounced water contents at elevated temperatures with the use of pure oxygen. *Fuel*. 2020;282:118692. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118692>. EDN: OQIIZR.
13. Alekseenko S.V., Dekterev A.A., Maltsev L.I., Kuznetsov V.A. Implementation of a three-stage scheme for the co-combustion of pulverized coal and coal-water slurry in an industrial boiler to reduce NOx emissions. *Process Safety and Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers*. 2023;169(B):313-327. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.034>. EDN: CSTGUY.
14. Deng Jianxin, Ding Zeliang, Zhou Houming, Tan Yuanqiang. Performance and wear characteristics of ceramic, cemented carbide, and metal nozzles used in coal-water-slurry boilers. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2009;27(5):919-926. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2009.05.007>.
15. Maltsev L.I. *Compressed air atomiser*. Patent RF, no. 2346756; 2009. (In Russ.). EDN: NRWQNP.
16. Shadrin E.Y., Anufriev I.S., Butakov E.B., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Maltsev L.I., et al. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner. *Fuel*. 2021;303:121182. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121182>. EDN: CZSNWN.
17. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Maltsev L.I., Podzharov Yu.S. Influence of cavitation treatment on the properties of coal-water slurries with pyrogenetic liquid and characteristics of their atomization by a pneumatic nozzle. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):297-309. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-297-309>. EDN: XKCIZP.
18. Mansour A., Chigier N. Air-blast atomization of non-Newtonian liquids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 1995;58(2-3):161-194. EDN: APMHEB.
19. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V. The effect of coal-water slurries spraying method on the characteristics of gas-droplet jets. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2026;172:110546. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2026.110546>. EDN: XQVHGQ.
20. Anufriev I.S., Shadrin E.Y., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Sharypov O.V. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet. *Applied Thermal Engineering*. 2019;163:114400. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114400>. EDN: EEVATZ.
21. Khashehchi M., Harun Z. Accuracy of tomographic particle image velocimetry data on a turbulent round jet. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2019;77:61-72. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.03.005>.
22. König G., Anders K., Frohn A. A new light-scattering technique to measure the diameter of periodically generated moving droplets. *Journal of Aerosol Science*. 1986;17(2):157-167.

23. Schenck H. Theories of engineering experimentation. New York; St. Louis; San Francisco; Toronto; London; Sydney. (Russ. ed: *Teoriya inzhenernogo eksperimenta*. Moscow: Mir; 1972, 381 p.)
24. Zaidel A.N. *Elementary estimates of measurement errors*. Leningrad: Nauka; 1968, 96 p. (In Russ.).
25. Alekseenko S.V., Kuznetsov V.A., Mal'tsev L.I., Dekterev A.A., Chernetskii M.Y. Analysis of combustion of coal-water fuel in low-power hot-water boiler via numerical modeling and experiments. *Journal of Engineering Thermophysics*. 2019;28(2):177-189. <https://doi.org/10.1134/S1810232819020024>. EDN: QJHHPT.
26. Shlegel N.E., Tkachenko P.P., Strizhak P.A. Influence of viscosity, surface and interfacial tensions on the liquid droplet collisions. *Chemical Engineering Science*. 2020;220:115639. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115639>. EDN: IPYZPJ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гвоздяков Дмитрий Васильевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент Научно-образовательного центра
И.Н. Бутакова,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, Российская Федерация,
г. Томск, просп. Ленина, 30 а
✉ dim2003@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7866-9180>

Зенков Андрей Викторович,
кандидат технических наук,
доцент Научно-образовательного центра
И.Н. Бутакова,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, Российская Федерация,
г. Томск, просп. Ленина, 30 а
avz41@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7763-3266>

Мальцев Леонид Иванович,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
Институт теплофизики
им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Российская Федерация,
г. Новосибирск, просп. Академика
Лаврентьева, 1
maltzev@itp.nsc.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4699-8289>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry V. Gvozdyakov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Butakov
Research Center,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30a, Lenin pr., Tomsk 634050, Russian Federation
✉ dim2003@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7866-9180>

Andrey V. Zenkov,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Butakov
Research Center,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30a, Lenin pr., Tomsk 634050, Russian Federation
avz41@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7763-3266>

Leonid I. Maltsev,
Dr. Sci. (Eng.),
Chief Researcher,
Kutateladze Institute of Thermophysics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
1, Academician Lavrentiev pr., Novosibirsk 630090,
Russian Federation
maltzev@itp.nsc.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4699-8289>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 24.11.2025 г.; одобрена после рецензирования 16.02.2026 г.; принята к публикации 09.12.2025 г.

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 24.11.2025; approved after reviewing 16.02.2026 ; accepted for publication 09.12.2025.