

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 662.62:662.75:662.94.069

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-586-600>

Экспериментальные исследования влияния давления воздуха на характеристики распыления водоугольных суспензий

Дмитрий Васильевич Гвоздяков^{1✉}, Андрей Викторович Зенков²,
Владимир Евгеньевич Губин³, Альберт Жанатович Калтаев⁴,
Яна Владимировна Марышева⁵

¹Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия

^{2,3,4,5}Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

¹dim2003@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7866-9180>

²avz41@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7763-3266>

³gubin@tpu.ru

⁴azk2@tpu.ru

⁵marysheva@tpu.ru

Аннотация. Цель – обоснование влияния давления распыляющего агента на характеристики струи после распыления водоугольных суспензий с малыми (по массе) добавками в их состав жидких отходов пиролиза резинотехнических изделий и отработанного моторного масла по результатам экспериментальных исследований. В качестве резинотехнических изделий использовались автомобильные шины. Распыление производилось с помощью пневматической форсунки с внутренним смешением. Исследование изменения размеров капель после распыления исследовавшихся составов топлива выполнено методом IPI (Interferometric Particle Imaging). Определение угла раскрытия струи выполнено при помощи высокоскоростной камеры «Photron». Проведено исследование влияния давления распыляющего агента на характеристики струи после распыления водоугольных топлив с добавлением жидких отходов пиролиза резинотехнических изделий и отработанного моторного масла (от 3 до 12% по массе). Установлено, что снижение давления воздуха приводит к уменьшению угла раскрытия струи распыленной суспензии не более чем на 6%. При этом в струе образуются достаточно крупные капли размером более 600 мкм. Экспериментально доказано, что при использовании устройства распыления с камерой внутреннего смешения суспензии и воздуха большее количество мелких капель образуется при близких значениях давления топлива и воздуха. Число капель при этом больше на 2–9% в сравнении с типичным двухкомпонентным водоугольным топливом (угол раскрытия струи распыленных водоугольных суспензий в данном случае имеет наибольшее значение). Показано, что при использовании форсунки с камерой внутреннего смешения суспензии и распыляющего агента дробление капель топлива осуществляется за счет сил аэродинамического сопротивления окружающей среды. Таким образом, использование форсунки с камерой внутреннего смешения суспензии и воздуха снижает количество возможных механизмов дробления капель топлива после распыления.

Ключевые слова: водоугольное топливо, суспензия, нефтепродукты, распыление, давление, угол раскрытия струи

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке в соответствии с дополнительным соглашением №075-03-2021-138/3 о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (внутренний номер 075-ГЗ/Х4141/687/3).

Для цитирования: Гвоздяков Д. В., Зенков А. В., Губин В. Е., Калтаев А. Ж., Марышева Я. В. Экспериментальные исследования влияния давления воздуха на характеристики распыления водоугольных суспензий // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. С. 586–600. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-586-600>.

Original article

Experimental studies into the effect of air pressure on the atomization characteristics of coal-water slurries

Dmitriy V. Gvozdyakov^{1✉}, Andrey V. Zenkov², Vladimir E. Gubin³,
Albert Zh. Kaltaev⁴, Yana V. Marysheva⁵

¹T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

^{2,3,4,5}National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Corresponding author: Dmitry V. Gvozdyakov, dim2003@tpu.ru

¹dim2003@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7866-9180>

²avz41@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7763-3266>

³gubin@tpu.ru

⁴azk2@tpu.ru

⁵marysheva@tpu.ru

Abstract. The paper studies the effect of atomizing agent pressure on the spray characteristics after spraying coal-water slurry that contains small additives of liquid waste from the pyrolysis of industrial rubber goods and used engine oil. The conducted experiments used automobile tires as the indicated rubber products; spraying was carried out employing an internal mixing pneumatic atomizer. Following the atomization of considered fuels, droplet size changes were studied using the interferometric particle imaging (IPI) technique. The spray angle was determined by means of a Photron high-speed camera. In addition, coal-water slurry containing liquid waste from the pyrolysis of industrial rubber goods and used engine oil (3–12 wt%) was sprayed to study the effect of atomizing agent pressure on the spray characteristics. A decrease in air pressure was found to reduce the spray angle by less than 6%, which resulted in the formation of rather large droplets exceeding 600 µm in size. It is experimentally confirmed that more fine droplets are formed at similar fuel and air pressures when using a spraying device equipped with an internal mixing chamber for slurry and air. The number of droplets, in this case, is 2–9% higher as compared to a typical two-component coal-water slurry fuel, with the spray angle of the sprayed coal slurry having the greatest value. When using an atomizer having an internal mixing chamber for slurry and an atomizing agent, fuel droplet breakup occurs due to the aerodynamic drag forces of the environment. Thus, the use of such atomizers reduces the number of possible breakup mechanisms for sprayed fuel droplets.

Keywords: coal-water fuel, slurry, oil products, spraying, pressure, jet expansion angle

Funding: The work was carried out with the financial support in accordance with the Supplementary Agreement No. 075-03-2021-138/3 on the provision of subsidy from the federal budget for funding the state assignment on public service provision (internal number 075-Г3/Х4141/687/3).

For citation: Gvozdyakov D. V., Zenkov A. V., Gubin V. E., Kaltaev A. Zh., Marysheva Ya. V. Experimental studies into the effect of air pressure on the atomization characteristics of coal-water slurries. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):586-600. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-586-600>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, как правило, в качестве топлива при производстве тепловой и электрической энергии на тепловых электростанциях используются природный газ, уголь, мазут и дизельное топливо [1, 2] (последнее в большинстве случаев в северных районах страны). При этом уголь остается доминирующим источником энергии не только в России, но и в мире [3]. Его доля в общем энергобалансе составляет порядка 38% [3, 4]. Согласно прогнозам Международного Энерге-

тического Агентства⁶, роль угля в мировом топливно-энергетическом балансе в ближайшие десятилетия будет оставаться прежней. Это позволяет сделать вывод о том, что генерация тепловой и электрической энергии на угольных электростанциях будет продолжаться.

Прямое сжигание углей, как известно, например [5, 6], сопровождается масштабными выбросами в атмосферу антропогенных продуктов высокотемпературного сгорания твердых топлив. Это является одной из

⁶World Energy Outlook 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019> (19.03.2021).

причин глобального загрязнения воздушного пространства, и как следствие ухудшения здоровья населения [2, 6]. Продукты сгорания углей (каменные и бурые), широко используемые в качестве основного топлива на тепловых электростанциях не только в России, но и в мире, содержат оксиды серы и азота, металлы, частицы пыли различного состава, газообразные продукты неполного сгорания топлива [7–10]. Наличие таких негативных факторов (с точки зрения экологии), сопровождающих угольную энергетику, сдерживает дальнейшее развитие отрасли, которое невозможно без создания и внедрения новых технологий топливосжигания при производстве тепловой и электрической энергии на тепловых электрических станциях, обеспечивающих безопасность окружающей среды.

Анализ литературных источников [11–14] показал, что в последнее десятилетие в мире становится привлекательным отказ от традиционного высокотемпературного сжигания угля при производстве тепловой и электрической энергии. Одним из перспективных видов топлива с точки зрения экологических показателей являются водоугольные суспензии (ВУС) [14]. Их использование в качестве топлива на тепловых электростанциях может обеспечить ряд преимуществ по критериям энергетики и экономики [15]: малые риски возникновения пожаров и взрывов, широкий спектр доступных компонентов суспензий и их низкая стоимость [14]. Но при этом есть и факторы, характерные для водоугольных суспензий, сдерживающих их широкое и повсеместное внедрение на объектах энергетики. Одним из таких факторов является образование достаточно крупных (500 мкм и более) капель после распыления. Зажигание капель таких топлив после распыления в камерах сгорания паровых и водогрейных котлов может происходить через 30 с и более [16–18]. Помимо этого, достаточно типичные двухкомпонентные водоугольные суспензии обладают низкой теплотой сгорания в сравнении с углем (меньше на 30–50%). Авторами, например [19–21], отмечается высокая целесообразность повышения эффективности процессов распыления многокомпонент-

ных топлив в камерах сгорания паровых и водогрейных котлов с целью снижения средних характерных размеров капель распыляемых топлив.

Одним из наиболее практически реализуемых способов повышения эффективности распыления и сжигания водоугольного топлива (ВУТ) может являться добавление в состав суспензии жидких горючих компонент, например, использованных нефтепродуктов. Такими веществами могут служить жидкие отходы переработки резинотехнических изделий (РТИ), в частности, отработавших автомобильных шин, и отработанное моторное масло. Повторное использование таких горючих компонент в настоящее время ограничено и приводит к их накоплению и хранению без возможности безопасной утилизации. Одним из вариантов решения этой проблемы является их использование в качестве добавок (компонент) водоугольных суспензий.

Известно [22–24], что введение в состав водоугольных суспензий третьих компонент, достаточно вязких в сравнении с водой или, например, спиртом, может существенно изменить характеристики струи (размер, скорость и число капель, угол раскрытия струи, дальность) после распыления таких топлив. Согласно [25], обеспечение минимальных характерных размеров капель жидкости после распыления возможно при определенных значениях соотношений давлений жидкости и распыляющего агента. Таким образом, актуальным для развития технологий водоугольных суспензий является проведение экспериментальных исследований влияния давления распыляющего агента на характеристики струи после распыления перспективных водоугольных суспензий.

Целью настоящей работы является обоснование по результатам экспериментальных исследований влияния давления распыляющего агента на характеристики струи после распыления водоугольных суспензий с малыми по массе добавками в их состав жидких отходов пиролиза резинотехнических изделий (автомобильные шины) и отработанного моторного масла. Для достижения сформулированной цели решены следующие задачи:

– исследование влияния давления распыляющего агента (воздух) на характеристики струи после распыления суспензий;

– установление соотношений давления топлива и воздуха, при которых размер и число капель малых размеров (менее 300 мкм) и угол раскрытия струи являются наибольшими.

Следует отметить, что вопросы влияния давления распыляющего агента на характеристики распыления водоугольных топлив в составе с жидкими горючими компонентами в литературных источниках раскрыты недостаточно.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Принципиальная схема приготовления водоугольного топлива представлена на рис. 1. При его подготовке использовался длиннопламенный уголь. Первоначально уголь измельчался в щековой дробилке (размер частиц на выходе не более 30 мм). Далее уголь измельчался в дезинтеграторе и просеивался при помощи вибросита с отбором материала фракцией не более 200 мкм. Мокрый помол осуществлялся в керамическом барабане объемом 3 л (массовое соотношение угля и помольных шаров составляло 1:1, продолжительность мокрого помола – 1 ч).

После этого в полученное водоугольное топливо добавлялась третья компонента в количестве 3, 5, 8 и 12% по массе (количество воды при этом снижалось на соответствующую величину добавки) и осуществлялось дополнительное перемешивание суспензии.

В табл. 1 представлены характеристики использовавшегося угля.

Таблица 1. Характеристики угля
Table 1. Coal characteristics

| Параметр | Длиннопламенный уголь |
|---|-----------------------|
| Зольность A^d , % | 4,1 |
| Выход летучих V^{daf} , % | 40,6 |
| Содержание углерода, % daf | 73,3 |
| Содержание водорода, % daf | 6,5 |
| Суммарная доля кислорода, азота и серы, % daf | 20,2 |
| Влажность, % | 15,0 |

В процессе приготовления водоугольных суспензий использовались вода, жидкие отходы переработки резинотехнических изделий и отработанное моторное масло (ОММ) при температуре 293 К. Их основные свойства представлены в табл. 2. При проведении экспериментов температура топлив составляла 293 К.

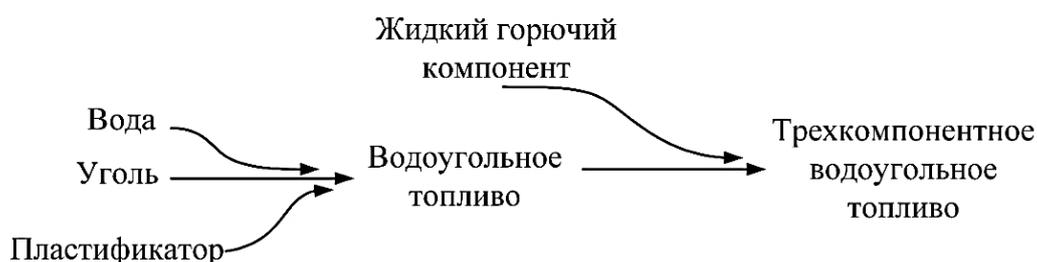


Рис. 1. Этапы подготовки топливной суспензии
Fig. 1. Stages of slurry fuel preparation

Таблица 2. Характеристики жидких компонентов водоугольных суспензий
Table 2. Characteristics of coal-water slurry liquid components

| Компонент | Плотность, кг/м ³ | Динамическая вязкость, мПа·с | Коэффициент поверхностного натяжения, мН/м |
|--|------------------------------|------------------------------|--|
| Отработанное моторное масло | 905 | 1225 | 73,5 |
| Отходы переработки резинотехнических изделий | 929 | 1190 | 73,1 |
| Вода | 998 [1] | 890 [2] | 72,75 |

Известно, что в состав водоугольных топлив принято добавлять поверхностно-активные вещества, обеспечивающие стабильность суспензий. Анализ результатов исследований [26] по проблемам ВУТ показал, что NaOH допустимо использовать в качестве присадки-пластификатора водоугольных суспензий. Данный компонент стабилизирует однородность состава приготовленного топлива, препятствует его расслоению, является доступным и недорогим материалом. При проведении экспериментальных исследований гидроксид натрия применялся в качестве присадки-пластификатора водоугольных суспензий в количестве не более 1% по массе.

Высокоскоростная регистрация струи (размеры капель, их концентрация и угол раскрытия) распыленных водоугольных топлив выполнена методом Interferometric Particle Imaging (IPI) согласно [27, 28]. Обработка изображений осуществлялась при помощи программного обеспечения ActualFlow, разработанного компанией «Сигма-Про» (г. Новосибирск) [27, 28]. Определение угла раскрытия струи выполнено при помощи высокоскоростной камеры фирмы «Photron». Следует отметить, что известно несколько способов определения угла раскрытия струи. Так, в [29] отмечается, что нет единой мето-

дики для определения этой величины. Некоторые исследователи для определения геометрии струи используют прямую линию, проходящую через верхнюю часть контура струи [30, 31]. В [32, 33] предлагается использовать прямую подгонку с применением линейной регрессионной посадки на распылительной кромке. Значение угла (θ) раскрытия установлено после обработки не менее 20 снимков каждого состава. Значение усредненной величины угла раскрытия струи определялось по формуле:

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_i}{n},$$

здесь θ_i – значение угла раскрытия струи на i -м изображении; n – общее число изображений.

Погрешность измерений с учетом возможных источников погрешности (таких как локальный градиент скорости, смещение капле, оптические эффекты и т.д.) не превышала 2% аналогично [27, 28]. В момент подсвечивания области исследования импульсом лазера осуществлялись фото- и видеорегистрация струи. Принципиальная схема стенда для регистрации капельной струи водоугольных топлив после распыления представлена на рис. 2.

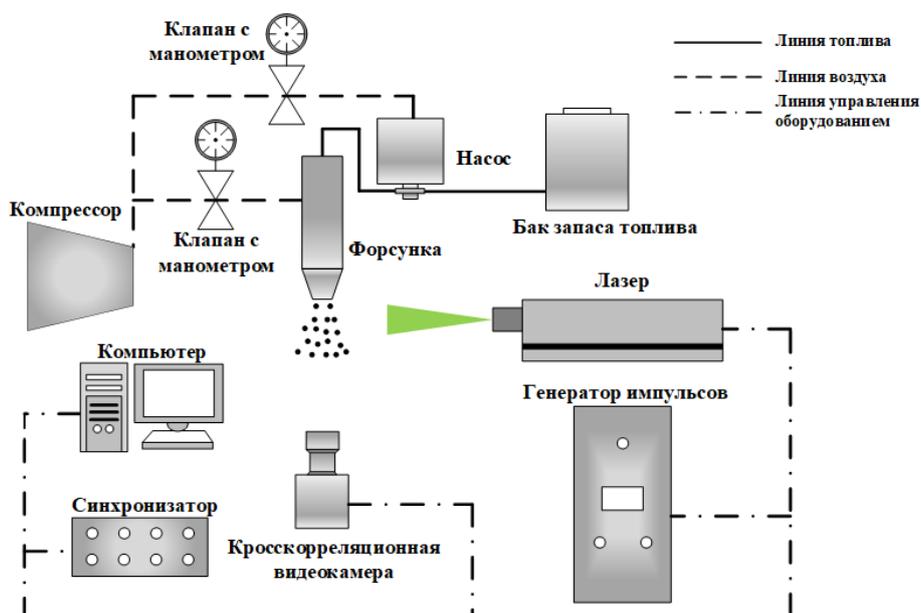


Рис. 2. Принципиальная схема стенда
Fig. 2. Schematic diagram of the test bench

Для каждого исследовавшегося состава водоугольной суспензии выполнено не менее 5 измерений. При обработке полученных результатов суммарное распределение капель топлива ($\sum n_i$) на всех изображениях нормировалось к их общему числу $\sum K$ (идентифицированные капли):

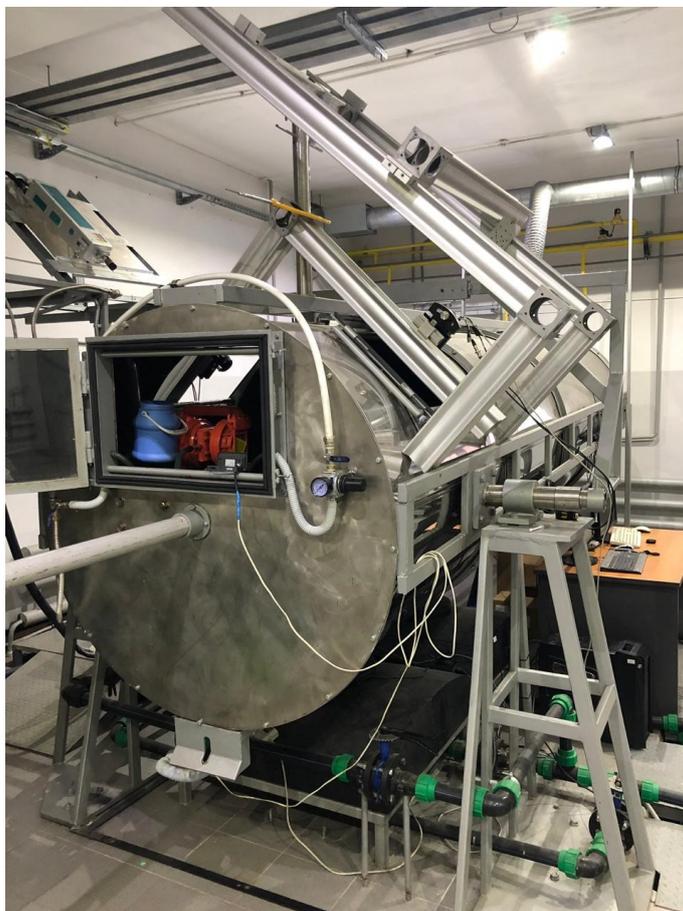
$$N = \frac{\sum n_i}{\sum K} \cdot 100\%.$$

Экспериментальные исследования характеристик струи распыленных ВУТ выполнены в аэродинамическом имитаторе камеры сгорания энергетического котла (рис. 3). Подача водоугольной суспензии осуществлялась из емкости-накопителя топлива при помощи мембранного насоса с пневматическим приводом. В качестве распыляющего агента суспензии использовался воздух (температура 293 К), нагнетаемый компрессором на пневматическую форсунку. Струя распыленного

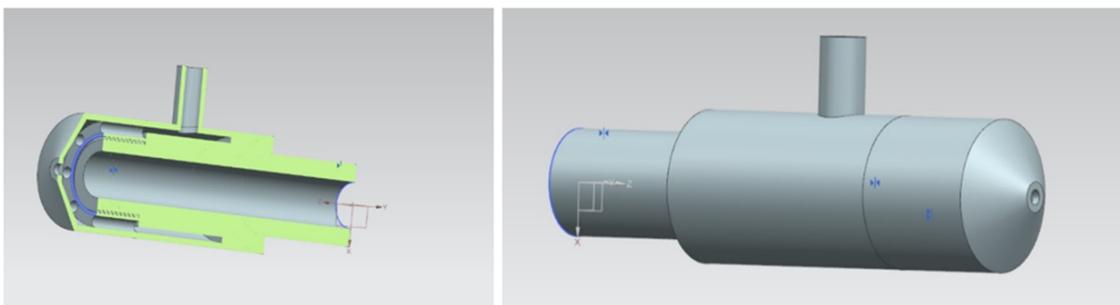
топлива подсвечивалась лазерным ножом (лазер Beamtech Vlite-200 с двойным импульсом), ориентированным по продольной оси факела.

При проведении экспериментов использовалась форсунка с камерой внутреннего смешения топлива и воздуха аналогично [25] для распыления суспензионного топлива, выполненная из нержавеющей стали. Она состоит из трех частей: корпуса с входными каналами для топлива и распыляющего агента, а также двух съемных головок. Способ соединения корпуса и головок – резьбовой. Продольный разрез форсунки представлен на рис. 4.

Время проведения эксперимента для каждого состава составляло 100–120 с. Такой интервал времени является достаточным для формирования стабильной структуры струи. Размеры области исследования составляли в продольном направлении струи



**Рис. 3. Общий вид экспериментального стенда
Fig. 3. General view of the experimental test bench**



| Параметр | Значение |
|---|----------|
| Внешний диаметр форсунки d_1 , мм | 20 |
| Диаметр входного канала топлива d_2 , мм | 8 |
| Диаметр входного канала воздуха d_3 , мм | 4 |
| Высота канала подачи воздуха в камеру смешения d_4 , мм | 2 |
| Диаметр выходного устья форсунки d_5 , мм | 3 |

Рис. 4. Устройство распыления водоугольных суспензий
Fig. 4. Device for coal-water slurry spraying

0,1 м, перпендикулярно оси 0,05 м. Эксперименты выполнены в хорошо воспроизводимых условиях при температуре окружающей среды 293 К и относительной влажности 65%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изменение угла раскрытия струи после распыления водоугольного топлива.
На рис. 5–7 показаны результаты высокоско-

ростной визуализации исследовавшихся процессов в виде фотографий. На представленных изображениях углы раскрытия струи водоугольных топлив после распыления обозначены линиями красного цвета. Представленные результаты иллюстрируют влияние значения давления воздуха на значение величины θ для всех исследовавшихся составов суспензий и типичного двухкомпонентного водоугольного топлива.

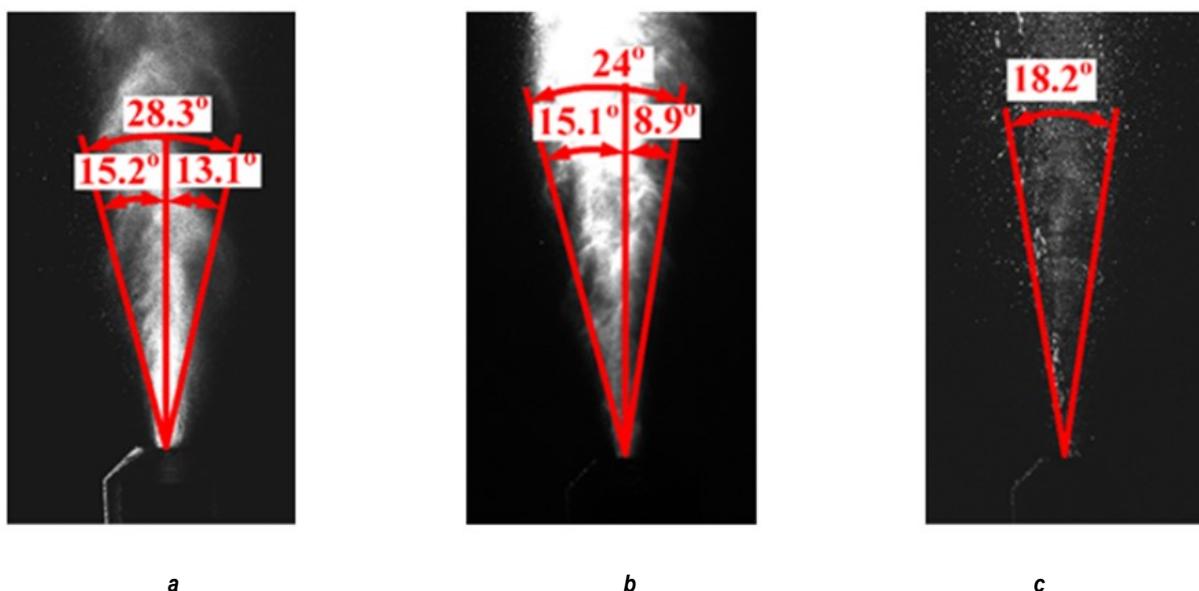


Рис. 5. Угол раскрытия струи после распыления двухкомпонентного водоугольного топлива:
a – $P_m = 0,3/P_e = 0,28$ (МПа); b – $P_m = 0,3/P_e = 0,2$ (МПа); c – $P_m = 0,3/P_e = 0,1$ (МПа)
Fig. 5. Jet expansion angle after spraying of two-component coal-water fuel: a – $P_f = 0.3/P_a = 0.28$ (MPa);
b – $P_f = 0.3/P_a = 0.2$ (MPa); c – $P_f = 0.3/P_a = 0.1$ (MPa)

Результаты проведенных экспериментов показали существенное влияние параметров (давление жидкости – P_m и воздуха – P_e) на угол раскрытия струи (рис. 5 а, 5 б, 5 с). При близких значениях давления топлива и воздуха взаимодействие между фазами (уголь, вода, воздух) является наибольшим (рис. 5 а). Струя в таком случае имеет гомогенную структуру и наибольший угол раскрытия [25, 34].

На рис. 6 представлены типичные результаты измерения угла раскрытия струи после распыления ВУТ с добавлением 3% и 12% жидких отходов переработки РТИ при различных значениях давления воздуха.

Результаты экспериментальных исследований показали, что введение в состав ВУТ такой жидкой горючей компоненты (не более 3% по массе) оказывает влияние на угол раскрытия струи при всех заданных значениях соотношений давлений топлива и воздуха. При близких соотношениях значений $P_m/P_e = 0,3$ МПа/0,28 МПа, $P_m/P_e = 0,2$ МПа/0,18 МПа и $P_m/P_e = 0,1$ МПа/0,08 МПа исследуемый параметр (θ) отличается не более чем на 5,0%. Рост концентрации (до 12% по массе) в состав ВУТ жидких отходов переработки резинотехнических изделий также оказывает влияние на угол раскрытия струи при всех заданных значениях соотношений давлений топлива и воздуха. При практически равных значениях давления топлива и воздуха –

$P_m/P_e = 0,3$ МПа/0,28 МПа, $P_m/P_e = 0,2$ МПа/0,18 МПа и $P_m/P_e = 0,1$ МПа/0,08 МПа исследуемый параметр (θ) отличается не более чем на 3,0%.

На рис. 7 представлены результаты измерения угла раскрытия струи после распыления ВУТ с добавлением 3% и 12% отработанного моторного масла при различных значениях давления воздуха.

Результаты выполненных экспериментальных исследований показали, что введение в состав ВУТ третьей жидкой горючей компоненты (ОММ не более 3% по массе) оказывает значительное влияние на угол раскрытия струи при всех заданных значениях соотношений давлений топлива и воздуха аналогично добавке жидких отходов резинотехнических изделий. При близких соотношениях значений $P_m/P_e = 0,3$ МПа/0,28 МПа, $P_m/P_e = 0,2$ МПа/0,18 МПа и $P_m/P_e = 0,1$ МПа/0,08 МПа исследуемый параметр (θ) отличается не более чем на 1,5%. Рост концентрации (до 12% по массе) в состав ВУТ использованного автомобильного масла также оказывает влияние на угол раскрытия струи при всех заданных значениях соотношений давлений топлива и воздуха. При близких соотношениях значений $P_m/P_e = 0,3$ МПа/0,28 МПа, $P_m/P_e = 0,2$ МПа/0,18 МПа и $P_m/P_e = 0,1$ МПа/0,08 МПа исследуемый параметр (θ) отличается не более чем на 6%.

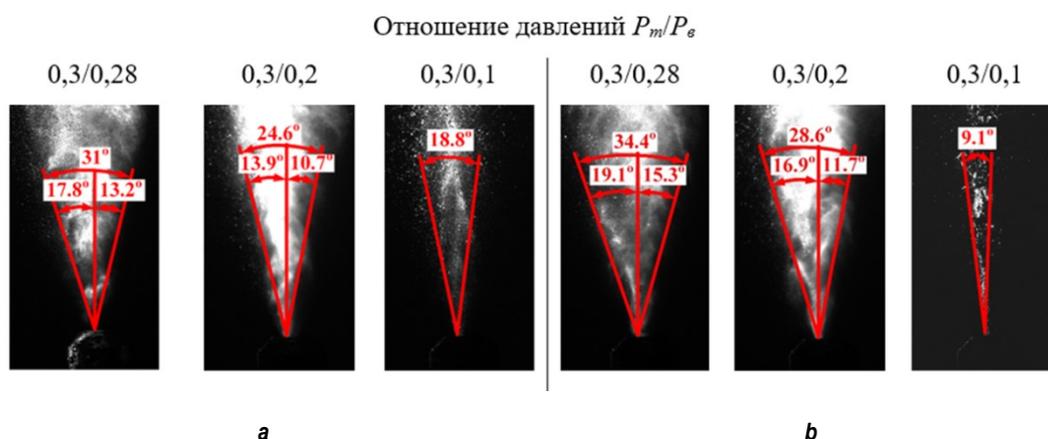


Рис. 6. Угол раскрытия струи после распыления водоугольного топлива на основе длиннопламенного угля с добавлением жидких отходов пиролиза резинотехнических изделий: а – водоугольное топливо +3% отходов пиролиза резинотехнических изделий; б – водоугольное топливо +12% отходов пиролиза резинотехнических изделий

Fig. 6. Jet expansion angle after spraying of water-coal fuel based on long-flame coal with addition of liquid waste of rubber product pyrolysis: а – water-coal fuel + 3% of rubber product pyrolysis waste; б – water-coal fuel +12% of rubber product pyrolysis waste

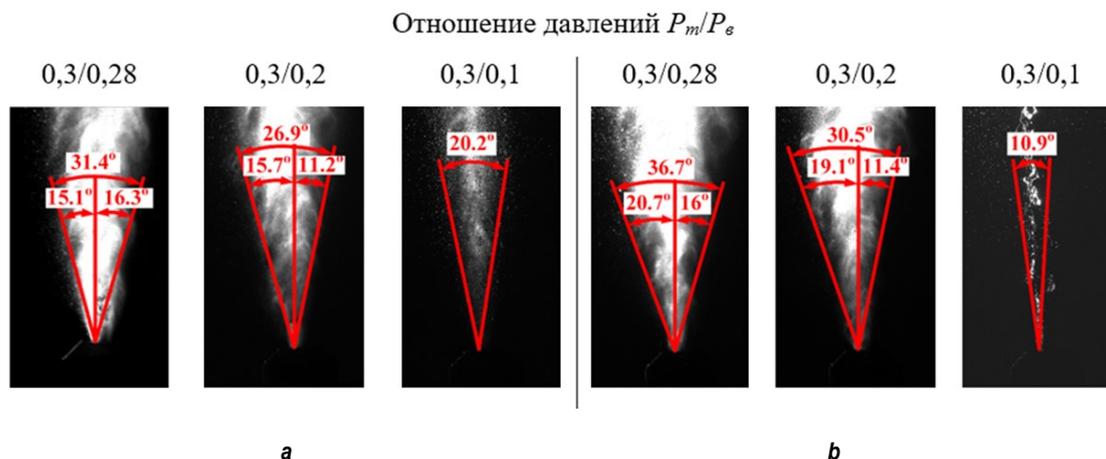


Рис. 7. Угол раскрытия струи после распыления водоугольного топлива на основе длиннопламенного угля с добавлением отработанного моторного масла: а – водоугольное топливо +3% отработанного моторного масла; б – водоугольное топливо +12% отработанного моторного масла
Fig. 7. Jet expansion angle after spraying of coal-water fuel based on long-flame coal with the addition of spent engine oil: a – coal-water fuel + 3% of spent engine oil; b – coal-water fuel + 12% of spent engine oil

Полученные результаты показывают, что снижение давления воздуха при постоянном давлении топлива приводит к уменьшению угла раскрытия струи. При близких значениях давления топлива и воздуха наблюдается более активное взаимодействие между фазами уголь-вода-жидкая горючая добавка-воздух. Стоит отметить, что при значительном преобладании давления топлива над давлением распыляющего агента (см. рис. 6 и 7) распыления потока практически не происходит, и он принимает вид тонкой, практически однофазной струи.

Изменение размеров и числа капель после распыления водоугольного топлива. На рис. 8 представлены распределения капель водоугольного топлива по характерным размерам и числу в области исследования на отрезке 25–100 мм по продольной оси струи в виде гистограмм. Результаты экспериментов позволяют оценить влияние третьей горючей компоненты и давления суспензии и воздуха на распределение капель топлива по характерным размерам при семи исследованных соотношениях P_m/P_e . Гистограммы иллюстрируют закономерность увеличения числа крупных капель (более 200 мкм) при снижении давления распыляющего агента. В случае преобладания давления воздуха увеличивается число малых капель (менее 200 мкм) суспензии после рас-

пыления. Это объясняется тем, что в камере смешения устройства распыления преобладает расход воздуха. Взаимодействие топлива и распыляющего агента при этом незначительно. В результате струя состоит, как правило, из аэрозольных частиц компонент суспензии. Такие тенденции изменения числа и характерного размера капель справедливы для ВУТ в составе с жидкими отходами переработки резинотехнических изделий и использованного машинного масла.

Результаты экспериментов показали, что снижение давления воздуха при постоянном давлении топлива приводит к увеличению количества средних (200–600 мкм) и крупных капель (более 600 мкм) после распыления ВУТ. При этом после распыления суспензии с добавлением жидких отходов переработки РТИ при отношении давлений $P_m = 0,3/P_e = 0,2$ (МПа) и $P_m = 0,3/P_e = 0,1$ (МПа) образуется в среднем на 5% и 9%, соответственно, меньше капель малого размера (до 200 мкм), чем при отношении давлений $P_m = 0,3/P_e = 0,28$ (МПа). Схожая тенденция наблюдается и для ВУТ с добавлением отработанного моторного масла: при отношении давлений $P_m = 0,3/P_e = 0,2$ (МПа) и $P_m = 0,3/P_e = 0,1$ (МПа) образуется в среднем на 2 и 7%, соответственно, меньше капель малого размера (до 200 мкм), чем при отношении давлений $P_m = 0,3/P_e = 0,28$ (МПа).

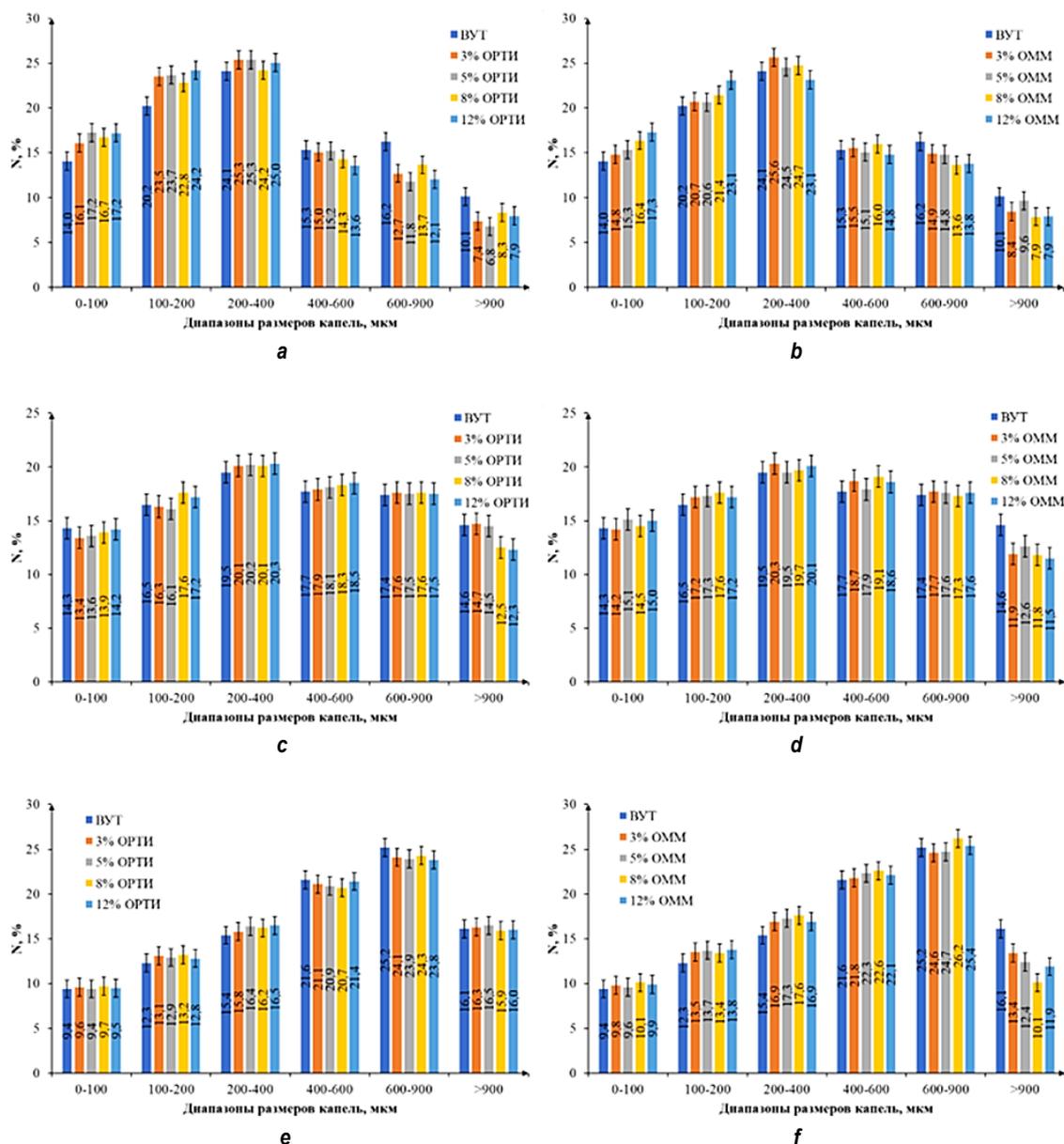


Рис. 8. Распределение капель водоугольной суспензии по размерам после распыления в области исследования по осевой координате на отрезке 25–100 мм: а, d – $P_m = 0,3/P_a = 0,28$ (МПа); б, е – $P_m = 0,3/P_a = 0,2$ (МПа); с, f – $P_m = 0,3/P_a = 0,1$ (МПа)

Fig. 8. Distribution of coal-water slurry droplets by size after spraying in the study area along the axial coordinate within the segment of 25–100 mm: a, d – $P_f = 0.3/P_a = 0.28$ (MPa); b, e – $P_f = 0.3/P_a = 0.2$ (MPa); c, f – $P_f = 0.3/P_a = 0.1$ (MPa)

По результатам выполненных экспериментов сформулирована физическая модель процесса формирования капель суспензий после ее распыления. На начальном отрезке (примерно 0–25 мм по осевой координате) струя распыленной суспензии, как правило, состоит из крупных (до 1 мм) капель различной формы (рис. 5 с, рис. 6 и 7) – вытянутый эллипс, цилиндр, деформированный диск и т.д., аналогично [35]. По мере удаления от устройства распыления крупные капли (бо-

лее 600 мкм) разрушаются за счет сил аэродинамического сопротивления внешней среды. Формирование капель размерами не более 200 мкм происходит преимущественно на отрезке 50–100 мм от устройства распыления. Идентичные траектории движения таких групп капель могут способствовать ускорению процесса их коагуляции. Это объясняет наличие в струе достаточно крупных (400 мкм и более на достаточном расстоянии от устья сопла форсунки) капель после рас-

пыления (см. рис. 5 с, рис. 6 и 7) как обычно-го ВУТ, так и водоугольных суспензий в составе с жидкими отходами переработки резинотехнических изделий или отработанного автомобильного масла.

Следует отметить, что отличительной особенностью распыления жидкостей форсункой с камерой внутреннего смешения топлива и воздуха является то, что в струе после распыления жидкости, в отличие от устройств распыления [36], обеспечивающих первичное разрушение струи в непосредственной близости к устью сопла (форсунки с внешним смешением жидкости и распыляющего агента), дробление капель жидкости происходит преимущественно за счет сил аэродинамического сопротивления окружающей среды.

Полученные результаты иллюстрируют целесообразность проведения дальнейших экспериментальных исследований с использованием форсунки с внешним смешением жидкости и распыляющего агента, например [36].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены экспериментальные исследования влияния давления распыляющего

агента на характеристики струи после распыления водоугольных топлив с добавлением отработанных нефтепродуктов. Установлено, что уменьшение давления воздуха приводит к снижению угла раскрытия струи после распыления на 1,5–6,0% при введении в состав водоугольного топлива от 3 до 12% (по массе) жидких отходов переработки резинотехнических изделий или отработанного моторного масла. Определено, что в процессе распыления при близких отношениях давления топлива и воздуха образуется большее количество мелких капель – на 2–9% в сравнении с типичным двухкомпонентным водоугольным топливом. Также в этом случае угол раскрытия струи наибольший, следовательно, близкие значения давления топлива и распыляющего агента являются оптимальными для распыления водоугольных топлив с добавлением нефтепродуктов. Использование форсунки с камерой внутреннего смешения суспензии и воздуха снижает количество возможных механизмов дробления капель топлива после распыления, их разрушение осуществляется преимущественно за счет сил аэродинамического сопротивления окружающей среды.

Список источников

1. Касимов А. М., Ковалёв А. А., Поваляева А. В. Утилизация отходов электростанций, работающих на твердом и жидком топливе // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2010. Т. 4. № 8. С. 15–20.
2. Тауд Р. Перспективы развития тепловых электростанций на органическом топливе // Теплоэнергетика. 2000. № 2. С. 68–72.
3. Square J. Statistical review of world energy. 69th edition. 2020. London: Heriot-Watt University, 2020. 66 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf> (19.03.2021).
4. Макарова А. А., Митрова Т. А., Кулагина В. А. Прогноз развития энергетики мира и России 2019. М.: Институт энергетических исследований Российской академии наук; Московская школа управления Сколково, 2019. 211 с. [Электронный ресурс]. URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Forecast_2019_Rus.pdf (19.03.2021).
5. Филиппова С. П., Кейко А. В. Газификация угля: на перепутье. Технологические факторы // Теплоэнергетика. 2021. № 3. С. 45–58. <https://doi.org/10.1134/S0040363621030048>.
6. Досмухамедов Н. К., Егизеков М. Г., Жолдасбай Е. Е., Курмансеитов М. Б., Аргын А. А. Поведение NO_x при очистке отходящих газов ТЭС карбонатным расплавом щелочных металлов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 1. С. 30–34.
7. Максимов В. Ю., Каменских А. В., Байгара А. Применение технологии Overfire Air в разработке методов сокращения вредных выбросов в атмосферу // Вопросы устойчивого развития общества. 2021. № 5. С. 465–480.
8. Ахметшин М. Р., Няшина Г. С., Медведев В. В. Антропогенные газовые выбросы при сжигании суспензионных топлив и отходов нефтепереработки // Кокс и химия. 2021. № 4. С. 36–43. https://doi.org/10.52351/00232815_2021_04_36.
9. Сучков С. И., Сомов А. А. Разработка мер подавления образования оксидов азота в ПГУ с внутрицикловой газификацией углей // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2015. № 4. С. 84–92.
10. Пугачев Н. С. Влияние ТЭС на окружающую среду // Наука через призму времени. 2021. № 7. С. 32–33.

11. Franco A., Diaz A. R. The future challenges for “clean coal technologies”: Joining efficiency increase and pollutant emission control // *Energy*. 2009. Vol. 34. Iss. 3. P. 348–354. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.09.012>.
12. Рябов Г. А., Санкин Д. А., Фоломеев О. М. Сжигание и газификация топлив в химических циклах – новое применение технологии циркулирующего кипящего слоя для улавливания CO₂ // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2014. № 5. С. 27–36.
13. Тиханов М. В., Пузырев Е. М. Опыт внедрения низкотемпературной вихревой технологии сжигания твердых топлив // *Электронный научно-практический журнал «Современные научные исследования и инновации»*. 2021. № 1. [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2021/01/94461> (07.05.2021).
14. Бекмуратова Б. Т. Процессы снижения ВЭТ и управления горением топливной эмульсии // *Бюллетень науки и практики*. 2021. Т. 7. № 1. С. 300–304. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/63/19>.
15. Мурко В. И., Черникова О. П. Повышение экологичности и эффективности городской системы теплоснабжения с использованием водоугольного топлива // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2021. № 3. С. 18–22. <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-3-18-22>.
16. Вершинина К. Ю., Лыршиков С. Ю., Стрижак П. А. Зажигание топливных суспензий, приготовленных на основе отходов обогащения угля и нефтепродуктов // *Физика горения и взрыва*. 2018. Т. 54. № 3. С. 137–146. <https://doi.org/10.15372/FGV20180316>.
17. Накоряков В. Е., Стрижак П. А., Глушков Д. О., Сыродой С. В. Иницирование горения капли органического водоугольного топлива в вихревой камере сгорания // *Доклады Академии наук*. 2017. Т. 473. № 6. С. 646–649. <https://doi.org/10.7868/S0869565217120040>.
18. Mchale E. T. Coal-water fuel combustion // *Symposium (International) on Combustion*. 1988. Vol. 21. Iss. 1. P. 159–171. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(88\)80243-1](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(88)80243-1).
19. Шадрин Е. Ю., Ануфриев И. С., Шарыпов О. В. Исследование процесса распыления и сжигания водоугольного топлива с использованием пневматической форсунки // *Прикладная механика и техническая физика*. 2021. Т. 62. № 3. С. 165–171. <https://doi.org/10.15372/PMTF20210316>.
20. Dafsari R. A., Lee Hyung Ju, Han Jeongsik, Park Dong-Chang, Lee Jeekeun. Viscosity effect on the pressure swirl atomization of an alternative aviation fuel // *Fuel*. 2019. Vol. 240. P. 179–191. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.132>.
21. Minakov A. V., Shebeleva A. A., Strizhak P. A., Chernetskiy M. Yu., Volkov R. S. Study of the Weber number impact on secondary breakup of droplets of coal water slurries containing petrochemicals // *Fuel*. 2019. Vol. 254. P. 115606. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.06.014>.
22. Vershinina K. Yu., Lyrshchikov S. Yu., Strizhak P. A. Ignition of fuel slurries based on waste products of coal processing and oil refining // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2018. Vol. 54. Iss. 3. P. 376–384.
23. Gvozdyakov D., Zenkov A. Influence of petrochemicals on jet characteristics after coal-water fuel spraying // *Fuel Processing Technology*. 2021. Vol. 218. P. 106864. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106864>.
24. Gvozdyakov D., Zenkov A. Improvement of atomization characteristics of coal-water slurries // *Energy*. 2021. Vol. 230. P. 120900. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120900>.
25. Han Han, Wang Pengfei, Li Yongjun, Liu Ronghua, Tian Chang. Effect of water supply pressure on atomization characteristics and dust-reduction efficiency of internal mixing air atomizing nozzle // *Advanced Powder Technology*. 2020. Vol. 31. Iss. 1. P. 252–268. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.10.017>.
26. Roh Nam-Sun, Shin Dae-Hyun, Kim Dong-Chan, Kim Jong-Duk. Rheological behaviour of coal-water mixtures. 2. Effect of surfactants and temperature // *Fuel*. 1995. Vol. 74. Iss. 9. P. 1313–1318. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(95\)00085-J](https://doi.org/10.1016/0016-2361(95)00085-J).
27. Alekseenko S. V., Abdurakipov S. S., Hrebtov M. Y., Tokarev M. P., Markovich D. M. Coherent structures in the near-field of swirling turbulent jets: a tomographic PIV study // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2018. Vol. 70. P. 363–379. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.12.009>.
28. Alekseenko S. V., Bilsky A. V., Dulin V. M., Markovich D. M. Experimental study of an impinging jet with different swirl rates // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2007. Vol. 28. Iss. 6. P. 1340–1359. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.05.011>.
29. Daviault S. G., Ramadan O. B., Matida E. A., Hughes P. M., Hughes R. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer // *Fuel*. 2012. Vol. 98. P. 183–193. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.02.042>.
30. Pastor J. V., Arrègle J., Palomares A. Diesel spray image segmentation with a likelihood ratio test // *Applied Optics*. 2001. Vol. 40. Iss. 17. P. 2876–2885. <https://doi.org/10.1364/AO.40.002876>.
31. Delacourt E., Desmet B., Besson B. Characterisation of very high pressure diesel sprays using digital imaging techniques // *Fuel*. 2005. Vol. 84. Iss. 7-8. P. 859–867. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.12.003>.
32. Morgan R., Wray J., Kennaird D. A., Crua C., Heikal M. R. The influence of injector parameters on the formation and break-up of a diesel spray // *Journal of Engines*. 2001. Vol. 110. Iss. 3. P. 389–399. <https://doi.org/10.4271/2001-01-0529>.
33. Hang J., Bae C., Lee K. O. Initial development of non-evaporating diesel sprays in common-rail injection systems // *International Journal of Engine Research*. 2003. Vol. 4. Iss. 4. P. 283–298. <https://doi.org/10.1243/146808703322743895>.
34. Wang Pengfei, Zhang Kui, Liu Ronghua. Influence of air supply pressure on atomization characteristics and dust-suppression efficiency of internal-mixing air-assisted atomizing nozzle // *Powder Technology*. 2019. Vol. 355. P. 393–407. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.040>.
35. Volkov R. S., Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Experimental investigation of the influence of the liquid drop size and velocity on the parameters of drop deformation in air // *Technical Physics Scientific Journal*. 2015. Vol. 60. Iss. 8. P. 1119–1125.

36. Пат. № 2523816, Российская Федерация, С1. Пневматическая форсунка (варианты) / С. В. Алексеев, Л. И. Мальцев, И. В. Кравченко, А. И. Кравченко;

заявитель и патентообладатель ООО «Протэн-К» Заявл. 22.01.2013; опубл. 27.07.2014. Бюл. № 11.

References

1. Kasimov A. M., Kovalev A. A., Povalyaeva A. V. Waste disposal of power plants operating on solid and liquid fuels. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2010;4(8):15-20.
2. Taud R. Development prospects of thermal power plants operating on organic fuel. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2000;2:68-72. (In Russ.).
3. Square J. *Statistical review of world energy*. 69th edition. 2020. London: Heriot-Watt University; 2020, 66 p. Available from: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf> [Accessed 19th March 2021].
4. Makarova A. A., Mitrova T. A., Kulagina V. A. *Forecast of energy sector development in the world and Russia in 2019*. Moscow: The Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences; Skolkovo Moscow School of Management, 2019, 211 p. Available from: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Forecast_2019_Rus.pdf [Accessed 19th March 2021]. (In Russ.).
5. Filippova S. P., Kejko A. V. Coal gasification: at the crossroad. Technological factors. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2021;3:45-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0040363621030048>.
6. Dosmukhamedov N. K., Egizekov M. G., Zholdasbay E. E., Kurmanseitov M. B., Argyn A. A. Behavior of NO_x during purification of exhaust gases of TPP carbonate melt of alkaline metals. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovaniy = International Journal of Applied and Basic Research*. 2021;1:30-34. (In Russ.).
7. Maksimov V. Yu., Kamenskikh A. V., Baygara A. Application of "OVERFIRE AIR" technology to development of methods to reduce harmful emissions to the atmosphere. *Voprosy ustojchivogo razvitiya obshchestva*. 2021;5:465-480.
8. Ahmetshin M. R., Nyashina G. S., Medvedev V. V. Anthropogenic gases emission during combustion slurry fuels from oil processing waste. *Koks i himiya*. 2021;4:36-43. https://doi.org/10.52351/00232815_2021_04_36. (In Russ.).
9. Suchkov S. I., Somov A. A. Development of measures suppressing the formation of nitrogen oxides in the gasification-combined cycle plant. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika = Thermal Engineering*. 2015;4:84-92. (In Russ.).
10. Pugachev N. S. Thermal power plant influence on the environment. *Nauka cherez prizmu vremeni*. 2021;7:32-33. (In Russ.).
11. Franco A., Diaz A. R. The future challenges for "clean coal technologies": Joining efficiency increase and pollutant emission control. *Energy*. 2009;34(3):348-354. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.09.012>.
12. Ryabov G. A., Sankin D. A., Folomeev O. M. The implementation of circulating fluidized bed technology for CO₂ capture. Chemical looping combustion and gasification. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika = Thermal Engineering*. 2014;5:27-36. (In Russ.).
13. Tihanov M. V., Puzyrev E. M. Implementation experience of low-temperature vortex technology of solid fuel combustion. *Electronic scientific & practical journal «Modern scientific researches and innovations»*. 2021;1. Available from: <https://web.snauka.ru/issues/2021/01/94461> [Accessed 7th May 2021]. (In Russ.).
14. Bekmuratova B. Processes for reducing water-based fuel and control of fuel emulsion combustion. *Byulleten' nauki i praktiki = Bulletin of Science and Practice*. 2021;7(1):300-304. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/63/19>.
15. Murko V. I., Chernikova O. P. Improvement of sustainability and efficiency of urban heating using coal-water slurry fuel. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*. 2021;3:18-22. <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-3-18-22>.
16. Vershinina K. Yu., Lyrshchikov S. Yu., Strizhak P. A. Ignition of fuel slurries based on waste products of coal processing and oil refining. *Fizika goreniya i vzryva = Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2018;54(3):137-146. <https://doi.org/10.15372/FGV20180316>.
17. Nakoryakov V. E., Strizhak P. A., Glushkov D. O., Syrodoj S. V. Initiation of organic coal-water fuel droplet burning in a vortex combustion chamber. *Doklady Akademii nauk*. 2017;473(6):646-649. <https://doi.org/10.7868/S0869565217120040>.
18. Mchale E. T. Coal-water fuel combustion. *Symposium (International) on Combustion*. 1988;21(1):159-171. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(88\)80243-1](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(88)80243-1).
19. Shadrin E. Yu., Anufriev I. S., Sharypov O. V. Atomization and combustion of coal-water slurry fuel sprayed by a pneumatic nozzle. *Prikladnaya mehanika i tehnickeskaya fizika = Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2021;62(3):165-171. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/PMTF20210316>.
20. Dafsari R. A., Lee Hyung Ju, Han Jeongsik, Park Dong-Chang, Lee Jeekeun. Viscosity effect on the pressure swirl atomization of an alternative aviation fuel. *Fuel*. 2019;240:179-191. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.132>.
21. Minakov A. V., Shebeleva A. A., Strizhak P. A., Chernetskiy M. Yu., Volkov R. S. Study of the Weber number impact on secondary breakup of droplets of coal water slurries containing petrochemicals. *Fuel*. 2019;254:115606. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.06.014>.
22. Vershinina K. Yu., Lyrshchikov S. Yu., Strizhak P. A. Ignition of fuel slurries based on waste products of coal processing and oil refining. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2018;54(3):376-384.
23. Gvozdyakov D., Zenkov A. Influence of petrochemi-

cals on jet characteristics after coal-water fuel spraying. *Fuel Processing Technology*. 2021;218:106864. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106864>.

24. Gvozdyakov D., Zenkov A. Improvement of atomization characteristics of coal-water slurries. *Energy*. 2021;230:120900. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120900>.

25. Han Han, Wang Pengfei, Li Yongjun, Liu Ronghua, Tian Chang. Effect of water supply pressure on atomization characteristics and dust-reduction efficiency of internal mixing air atomizing nozzle. *Advanced Powder Technology*. 2020;31(1):252-268. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2019.10.017>.

26. Roh Nam-Sun, Shin Dae-Hyun, Kim Dong-Chan, Kim Jong-Duk. Rheological behaviour of coal-water mixtures. 2. Effect of surfactants and temperature. *Fuel*. 1995;74(9):1313-1318. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(95\)00085-J](https://doi.org/10.1016/0016-2361(95)00085-J).

27. Alekseenko S. V., Abdurakipov S. S., Hrebtov M. Y., Tokarev M. P., Markovich D. M. Coherent structures in the near-field of swirling turbulent jets: a tomographic PIV study. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2018;70:363-379. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.12.009>.

28. Alekseenko S. V., Bilsky A. V., Dulin V. M., Markovich D. M. Experimental study of an impinging jet with different swirl rates. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2007;28(6):1340-1359. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.05.011>.

29. Daviault S. G., Ramadan O. B., Matida E. A., Hughes P. M., Hughes R. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin

fluid atomizer. *Fuel*. 2012;98:183-193. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.02.042>.

30. Pastor J. V., Arrègle J., Palomares A. Diesel spray image segmentation with a likelihood ratio test. *Applied Optics*. 2001;40(17):2876-2885. <https://doi.org/10.1364/AO.40.002876>.

31. Delacourt E., Desmet B., Besson B. Characterisation of very high pressure diesel sprays using digital imaging techniques. *Fuel*. 2005;84(7-8):859-867. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.12.003>.

32. Morgan R., Wray J., Kennaird D. A., Crua C., Heikal M. R. The influence of injector parameters on the formation and break-up of a diesel spray. *Journal of Engines*. 2001;110(3):389-399. <https://doi.org/10.4271/2001-01-0529>.

33. Hang J., Bae C., Lee K. O. Initial development of non-evaporating diesel sprays in common-rail injection systems. *International Journal of Engine Research*. 2003;4(4):283-298. <https://doi.org/10.1243/146808703322743895>.

34. Wang Pengfei, Zhang Kui, Liu Ronghua. Influence of air supply pressure on atomization characteristics and dust-suppression efficiency of internal-mixing air-assisted atomizing nozzle. *Powder Technology*. 2019;355:393-407. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.040>.

35. Volkov R. S., Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Experimental investigation of the influence of the liquid drop size and velocity on the parameters of drop deformation in air. *Technical Physics Scientific Journal*. 2015;60(8):1119-1125.

36. Alekseenko S. V., Mal'cev L. I., Kravchenko I. V., Kravchenko A. I. *Pneumatic nozzle (options)*. Patent RF, no. 2523816; 2014. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гвоздяков Дмитрий Васильевич,
кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник Лаборатории
катализа и преобразования углеродсодержащих
материалов с получением полезных продуктов,
Кузбасский государственный технический
университет им. Т. Ф. Горбачева,
650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Россия

Зенков Андрей Викторович,
кандидат технических наук,
ассистент НОЦ И. Н. Бутакова,
Инженерная школа энергетики,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitriy V. Gvozdyakov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Senior Researcher of the Laboratory of
Catalysis and Transformation of Carbon-containing
Materials and Useful Products Obtaining,
T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28, Vesennyya St., Kemerovo 650000, Russia

Andrey V. Zenkov,
Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor of the Butakov Research Centre,
Engineering,
School of Energy and Power Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia

Губин Владимир Евгеньевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент НОЦ И. Н. Бутакова,
Инженерная школа энергетики,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия

Калтаев Альберт Жанатович,
инженер НИЦ «Экоэнергетика 4.0»,
Инженерная школа энергетики,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия

Марышева Яна Владимировна,
инженер НИЦ «Экоэнергетика 4.0»,
Инженерная школа энергетики,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия

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 24.09.2021; одобрена после рецензирования 13.10.2021; принята к публикации 28.10.2021.

Vladimir E. Gubin,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Butakov Research Center,
School of Energy and Power Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia

Albert Zh. Kaltaev,
Engineer of Ecoenergy 4.0 Research Center,
School of Energy and Power Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia

Yana V. Marysheva,
Engineer of Ecoenergy 4.0 Research Center,
School of Energy and Power Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 24.09.2021; approved after reviewing 13.10.2021; accepted for publication 28.10.2021.