

УДК 662.62:662.75:662.94.069
DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4472
Шифр специальности ВАК: 2.4.6

Влияние кавитационной обработки водоугольных суспензий на средний размер капель в струе

Д.В. Гвоздяков^{1✉}, А.В. Зенков¹, Л.И. Мальцев², Ю.С. Поджаров²

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, г. Новосибирск

✉ dim2003@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Переход к экологически чистым энергетическим технологиям, обусловленный современными требованиями к охране окружающей среды, предполагает поиск и создание новых источников энергии, в том числе и топлив. Одним из способов удовлетворения этих требований и сохранения на прежнем уровне показателей по выработке энергии тепловыми электростанциями является переход на многокомпонентные топлива. Наиболее перспективными и доступными котельными топливами с точки зрения энергетики, экологии и экономики являются водоугольные суспензии. В связи с этим изучение свойств и характеристик таких топлив во многих странах является актуальным. **Цель:** проведение экспериментальных исследований степени влияния продолжительности кавитационной обработки водоугольных топлив на средний размер капель в струе после распыления пневматической форсункой и обоснование эффективности такого подхода для практического применения. **Объект.** Экспериментальные исследования проводились с водоугольными суспензиями на основе длиннопламенного угля (марки Д) с добавлением 10 и 20 % по массе пирогенетической жидкости. В качестве образца сравнения использовалась суспензия, состоящая из угля и воды, без добавления пирогенетической жидкости. **Методы.** Приготовление водоугольных суспензий осуществлялось в роторном гидродинамическом генераторе кавитации. Для распыления водоугольных суспензий использовалась пневматическая форсунка с внешним смешением. Средний размер капель топлива после распыления определялся при помощи метода Interferometric Particle Imaging. **Результаты и выводы.** Эксперименты по приготовлению водоугольных суспензий в составе с пирогенетической жидкостью показали рост значения динамической вязкости суспензии. Увеличение продолжительности обработки суспензий в роторном гидродинамическом генераторе кавитации позволяет снизить вязкость на 54 %. Средний размер капель в струе при этом снижается на 22 %.

Ключевые слова: водоугольная суспензия, пирогенетическая жидкость, вязкость, распыление, средний размер капель

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-00124).

Для цитирования: Влияние кавитационной обработки водоугольных суспензий на средний размер капель в струе / Д.В. Гвоздяков, А.В. Зенков, Л.И. Мальцев, Ю.С. Поджаров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 3. – С. 70–80. DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4472

UDC 662.62:662.75:662.94.069
DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4472

Effect of cavitation treatment of coal-water slurries on a droplet average size in a jet

D.V. Gvozdyakov^{1✉}, A.V. Zenkov¹, L.I. Maltzev², Yu.S. Podzharov²

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation

✉ dim2003@tpu.ru

Abstract. Relevance. Transition to environmentally friendly energy technologies, due to modern requirements for environmental protection, involves the search and creation of new energy sources, including fuels. One of the ways to meet these requirements and maintain the same level of energy production by thermal power plants is the transition to multicomponent fuels. The most promising and affordable boiler fuels from the point of view of energy, ecology and economy are coal-water slurries. In this regard, the study of the properties and characteristics of such fuels is relevant in many countries. **Aim.** Experimental studies of the effect of the coal-water fuel cavitation treatment duration on a droplet average size in a jet after spraying with a pneumatic nozzle and substantiation of the efficiency of such approach for practical application. **Object.** Experimental studies were carried out with coal-water slurries based on long-flame coal (D grade) with addition of 10 and 20 wt % by weight of pyrogenetic liquid. A slurry, consisting of just coal and water, without the addition of pyrogenetic liquid, was used as a reference sample. **Method.** The coal-water slurries were prepared in a rotary hydrodynamic cavitation generator. A pneumatic nozzle with external mixing was used to spray the coal-water slurries. The average size of fuel droplets after spraying was determined using the Interferometric Particle Imaging method. **Results.** Experiments on the preparation of coal-water slurries with pyrogenetic liquid showed an increase in the dynamic viscosity of the fuel. An increase in the duration of treatment of the slurries in a rotary hydrodynamic cavitation generator reduced the viscosity by 54%. The average size of droplets in the jet was reduced by 22%.

Keywords: coal-water slurry, pyrogenetic liquid, viscosity, spraying, average droplet size

Acknowledgments: The research was supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-79-00124).

For citation: Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Maltzev L.I., Podzharov Yu.S. Effect of cavitation treatment of coal-water slurries on a droplet average size in a jet. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 3, pp. 70–80. DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4472

Введение

Распыление жидкостей является неотъемлемой частью многих технологических процессов [1]. Нанесение лакокрасочных покрытий, распыление топлив в камеры сгорания двигателей, пылеподавление на производствах, опрыскивание растений, создание устройств распыления. И это лишь небольшая часть отраслей науки и техники, где от распыления зависит эффективность производственных процессов и исследований. Несмотря на множество экспериментальных и теоретических исследований параметров распыления различных жидкостей, например, [2–7], характеристики струй продолжают исследовать. Одной из причин является развитие способов и методов мгновенной регистрации газочапельной струи. Современные методы регистрации внесли значительный вклад в технологические процессы, основанные или зависящие от распыления жидкостей. При этом одной из важнейших характеристик газочапельной струи, от которой существенно зависит качество и эффективность процесса распыления, является размер капель (δ) [8].

Немаловажным фактором, определяющим распределение капель жидкости по размерам в струе, являются свойства распыляемой жидкости. Известно, например, [9, 10], что при распылении жидкостей с различной вязкостью одним устройством распыления процесс диспергирования протекает по-разному. Форма, размер, количество и механизмы дробления капель будут разными [11]. В одном случае, распыляя маловязкую жидкость (вода, спирты и т. д.), дисперсный состав струи может быть достаточно однородным даже в непосред-

ственной близости к устью сопла. В другом случае, распыляя более вязкую жидкость (масло, мазут, нефть, водоугольные топлива), даже на значительном расстоянии от форсунки в струе будут присутствовать крупные фрагменты жидкости различных форм и объемов. При этом их наличие может быть не только в ядре струи, но и на ее периферийной области.

На практике, в частности в энергетике, очень важным является распыление жидких топлив, в том числе многокомпонентных. Последним исследователи уделяют особое внимание. Одной из главных причин является то, что такие топлива могут стать альтернативой традиционным – уголь, газ, мазут. Наиболее перспективными являются водоугольные суспензии (ВУС). ВУС представляет жидкое смешанное топливо, состоящее из измельченного угля, воды и добавок поверхностно-активных веществ (ПАВ) [12]. Широкую популярность такое топливо получило во второй половине XX в. как альтернатива традиционным котельным топливам – нефть, мазут [13]. При этом следует учитывать, что водоугольное топливо (ВУТ) можно сжигать в котлах совместно с вышеуказанными топливами, тем самым снижая объем потребления дорогого мазута или нефти. Преимуществами ВУТ принято считать: пожароопасность – отсутствует сухая угольная пыль [14], экологичность – при сжигании в атмосферу выбрасывается меньше соединений вредных веществ из-за присутствия паров воды [15] (низкая, в сравнении с углем, температура горения за счет испарения влаги), независимость от поставок нефти – месторождения угля более равномерно распределены по континентам [16], показатели ло-

гистики – возможность доставлять на тепловую электростанцию автомобильным, железнодорожным и морским транспортом, по трубопроводам, стабильность – можно хранить достаточно длительное время без опасности расслоения, характерного для жидкостей в составе со взвешенными твердыми частицами [17], низкая стоимость – в качестве твердой компоненты можно использовать отходы (фильтр-кек) угольнообогатительных фабрик [18], универсальность – можно использовать на мазутных и пылеугольных котлах. Несмотря на внушительный перечень положительных качеств водоугольных топлив, есть причины, сдерживающие их широкое внедрение в теплоэнергетику. Одной из главных является процесс распыления, обеспечивающий мелкодисперсную струю.

Процесс сжигания водоугольного топлива в камерах сгорания котлов осуществляется аналогично нефти, мазуту, дизельному топливу, угольной пыли после распыления. При этом характеристики распыления ВУС отличаются от характеристик распыления вышеуказанных топлив. Во-первых, после распыления ВУС, независимо от типа устройства распыления, как правило, образуются достаточно крупные капли [19]. Объясняется это прежде всего высокой вязкостью водоугольного топлива, например, в сравнении с котельным мазутом. Последний, как известно, предварительно нагревается с целью снизить вязкость. В случае с ВУС термическая подготовка окажет незначительное влияние. Поэтому на практике вязкость ВУС при распылении достаточно высокая. Например, в [20] отмечается, что рекомендуемое значение динамической вязкости водоугольного топлива для распыления составляет 1000–1200 мПа·с при скорости сдвига шпинделя вискозиметра 100 с^{-1} . Это достаточно высокое значение, в сравнении с вязкостью разогретого мазута – 20–50 мПа·с. В результате высоких значений вязкости диаметр капель ВУС после распыления достаточно велик. В сравнении с угольной пылью, размер капли ВУС превышает средний размер частиц угольной пыли, так как одиночная капля ВУС состоит из нескольких частиц угля. Таким образом, после распыления ВУТ характерный размер капель в струе может достигать нескольких миллиметров. Во-вторых, немаловажным в процессе распыления ВУС является его структура. Предварительная гомогенизация ВУС позволяет обеспечить высокую эффективность распыления, исключить засорение топливного канала, камеры смешения и сопла форсунки.

В зависимости от типа форсунки после истечения из сопла ВУС перемешивается с распыляющим агентом или уже представляет смесь топлива и распыляющего агента. В некоторых случаях вблизи сопла возможна практически однофазная струя

топлива. Как правило, после истечения ВУС из соплового канала форсунки происходит ее разрушение на крупные фрагменты, как правило, за счет воздействия распыляющего агента, сил сопротивления окружающей среды, центробежной силы (капли ВУС при движении хаотично вращаются). Далее в струе, преимущественно за счет воздействия последних двух сил, происходит разрушение капель ВУС на мелкие. Проведенные нами ранее многочисленные экспериментальные исследования, например, [21–26], характеристик распыления различных ВУС и водоугольных топлив форсункой с внутренним смешением жидкости и распыляющего агента показали неплохую эффективность такого устройства распыления. Основным преимуществом является то, что дисперсный состав струи будет определяться параметрами распыления. Но при этом в струе все равно будут присутствовать крупные (характерным размером более 500 мкм) капли ВУС.

Учитывая вышеуказанные факторы, оказывающие влияние на характеристики распыления водоугольных топлив, целью настоящей работы является проведение экспериментальных исследований влияния продолжительности кавитационной обработки водоугольных топлив на средний размер капель в струе после распыления пневматической форсункой и обоснование эффективности такого подхода для практического применения.

Компоненты водоугольных суспензий и методики проведения исследования

В качестве твердой компоненты ВУС использовался длиннопламенный уголь. Размер фракции составлял менее 120 мкм. Вода бралась из системы водоснабжения. В качестве третьей компоненты ВУС использовалась пирогенетическая жидкость. Последняя является легким продуктом пиролиза древесины. Основные характеристики компонентов ВУС представлены ниже.

Уголь: зольность – 11,5 %; выход летучих – 40,5 %; содержание углерода – 56,4 %; содержание водорода – 4 %; суммарная доля кислорода, азота и серы – 15,8 %; влажность – 11,5 %, низшая теплота сгорания – 21,9 МДж/кг.

Водопроводная вода: плотность – $997,0\text{ кг/м}^3$; pH – 6,8.

Пирогенетическая жидкость: плотность – $1044,0\text{ кг/м}^3$, pH – 2,3, низшая теплота сгорания (Q) – 2,8 МДж/кг.

При проведении экспериментальных исследований использовались три исходный состава ВУС. Характерным различием водоугольных суспензий являлось время их приготовления в роторном гидродинамическом генераторе кавитации (РГДГК), разработанном в Институте Теплофизики им. С.С.

Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук [27]. Эффективность приготовления ВУС таким способом обусловлена тем, что частицы угля подвергаются вторичному измельчению в процессе гомогенизации суспензии. Продолжительность (τ) кавитационной обработки каждого состава ВУС составляла 27 и 90 с, соответственно. В табл. 1 представлены компонентные составы водоугольных суспензий.

Таблица 1. Состав исследованных суспензий

Table 1. Compositions of the studied slurries

Состав Composition	Уголь Coal	Пирогенетическая жидкость Pyrogenetic liquid		Вода Water	τ , с
	Марка/Grade	Содержание, мас. %/Content, wt %			
1	Длиннопла- менный (Д) Long-flame (D)	50	0	50	27
2			10	40	
3			20	30	
4			0	50	
5	(D)	50	10	40	90
6			20	30	

Динамическая вязкость (η) ВУС измерялась при помощи ротационного вискозиметра [27].

Экспериментальные исследования характеристик распыления ВУТ выполнены на специализированном стенде (рис. 1). Установка предназначена для изучения характеристик струй жидких и сухих топлив после распыления, изучения форсунок и различных распылителей. Распыление ВУС осуществлялось при помощи пневматической форсунки (рис. 2), предназначенной для распыления водоугольных топлив. Данная форсунка разработана Институтом Теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

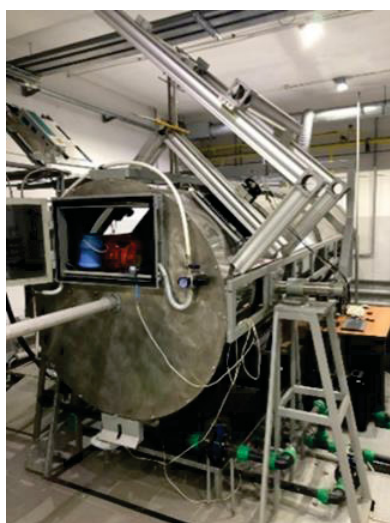


Рис. 1. Экспериментальный стенд
Fig. 1. Experimental stand

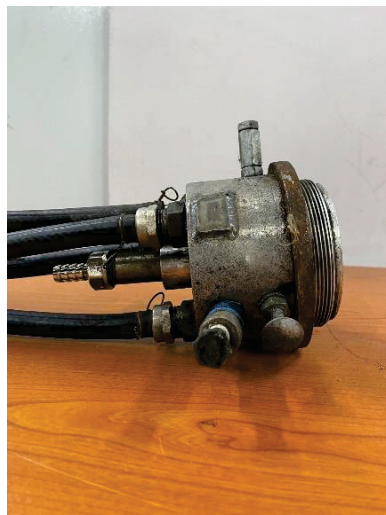


Рис. 2. Форсунка
Fig. 2. Nozzle

Средний размер капель (δ) определялся при помощи метода IPI (Interferometric Particle Imaging) [28–30]. Метод применяется для измерения мгновенных пространственных распределений размеров (от 10 до 1000 мкм) капель в потоке. Основан на восстановлении размеров капель по частоте интерференционной картины от точечных источников света, возникающих на сферических каплях жидкости при освещении их мощным лазерным импульсом света (лазерный нож). Интерференционные образы видны в виде узких полосок по причине того, что в методе IPI используются цилиндрические линзы, сжимающие эти образы по одной из координат, для предотвращения их пространственного перекрытия. Регистрируется расфокусированное изображение этих же точечных источников, а точнее, картина интерференции света от них.

Метод IPI позволяет регистрировать мгновенные распределения диаметров капель в плоском поперечном сечении потока [31–33]. Этот метод достаточно хорошо себя зарекомендовал при исследованиях газокапельного течения при атомизации жидкого углеводородного топлива (дизельное топливо и отработанное моторное масло – непрозрачная жидкость) струей перегретого пара и воздуха [28]. Согласно теории рассеяния Ми [34], свет, отраженный и преломленный сферической поверхностью капли, создает на изображениях капель интерференционные полосы, частота которых пропорциональна диаметру капли. Цифровой анализ полученных изображений позволяет определить положение и размер капель. Отмечается, например, [35, 36], что метод IPI позволяет регистрировать как сферические, так и несферические капли. При измерении размера непрозрачных капель (какими являются капли ВУС), рассеянный свет содержит

только свет, который отражается от их поверхности, то есть излучатели, используемые для описания капли, распределяются только в положениях, которые непосредственно освещаются светом. Это означает, что рассеянный свет, собранный под углом рассеяния, содержит достаточно информации о размере капли с учетом утверждения [34] о том, что частота интерференционных полос пропорциональна диаметру капли.

На рис. 3 схематически показаны сечения и области струи, в которых осуществлялась регистрация капель для определения их размеров.

Высокоскоростная регистрация струи осуществлялась в ее областях на расстояниях 0–100, 101–225 и 226–350 мм (рис. 3, а) от сопла форсунки по продольной оси Z. Учитывая, что размер области регистрации кросскорреляционной камеры составляет 35×35 мм (S), а струя в сечении имеет форму треугольника, для получения более полной информации о среднем размере капель ВУС ее сечение разделялось на множество областей S, в которых осуществлялась их регистрация кросскорреляционной камерой (рис. 3, б). В процессе обработки полученных результатов при помощи программного обеспечения ActualFlow учитывались только зафиксированные в струе капли (рис. 3, в).

Процесс распыления всех составов ВУС (табл. 1) осуществлялся при давлении ВУС 0,05 МПа и давлении воздуха 0,3 МПа.

Результаты экспериментов

Вязкость топлив является одним из важнейших параметров, определяющих характеристики их

распыления [37]. Поэтому первоначально нами приведены исследования изменения вязкости ВУС. Жидкие топлива, в том числе и ВУС, обладающие относительно небольшими значениями вязкости (не более 1200 мПа·с [20]) лучше подвержены диспергированию в среде окислителя в условиях высоких температур камер сгорания. На рис. 4 представлено изменение динамической вязкости исследованных составов ВУС при фиксированной скорости сдвига шпинделя вискозиметра в зависимости от количества пирогенетической жидкости в составе суспензии и продолжительности обработки в роторном гидродинамическом генераторе кавитации.

Результаты экспериментов показали, что динамическая вязкость ВУС изменяется с ростом концентрации пирогенетической жидкости и временем обработки суспензии в роторном гидродинамическом генераторе кавитации. Добавка в состав ВУС 10 % по массе пирогенетической жидкости приводит к росту значения динамической вязкости на 28 % в сравнении двухкомпонентным водоугольным топливом (рис. 4). Продолжительность подготовки суспензии при этом составляет 27 с. При увеличении количества пирогенетической жидкости в составе суспензии до 20 % по массе значение вязкости ВУС увеличивается на 79 % (в сравнении с двухкомпонентным водоугольным топливом). Зависимость, иллюстрирующая влияние пирогенетической жидкости на значение динамической вязкости ВУС, позволяет сделать вывод о том, что вязкость суспензии существенно увеличивается (рис. 4).

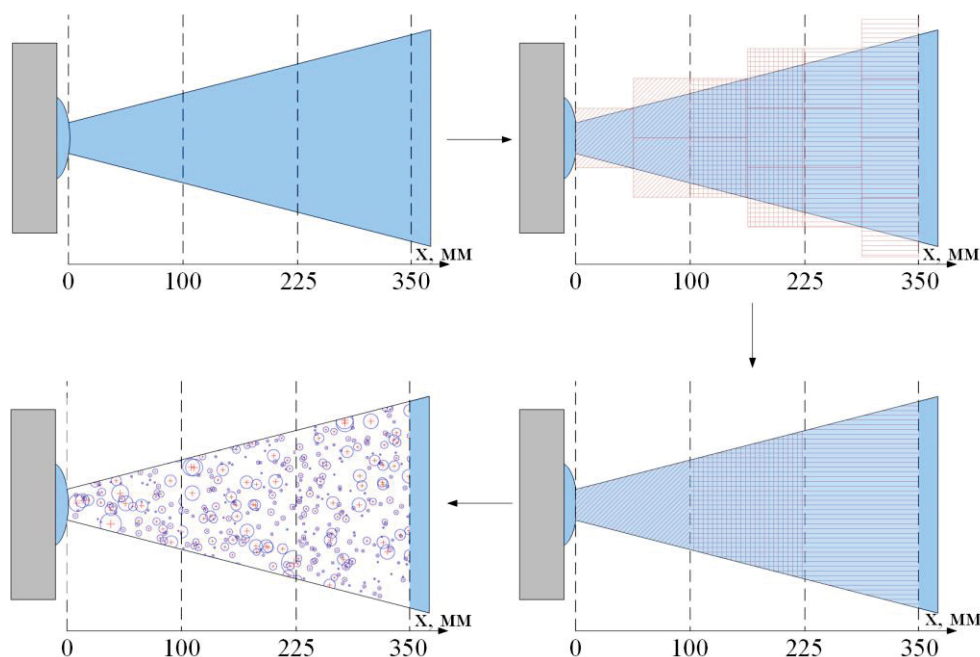


Рис. 3. Сечения и области регистрации капель ВУС

Fig. 3. Cross-sections and areas of registration of coal-water suspension (CWS) droplets

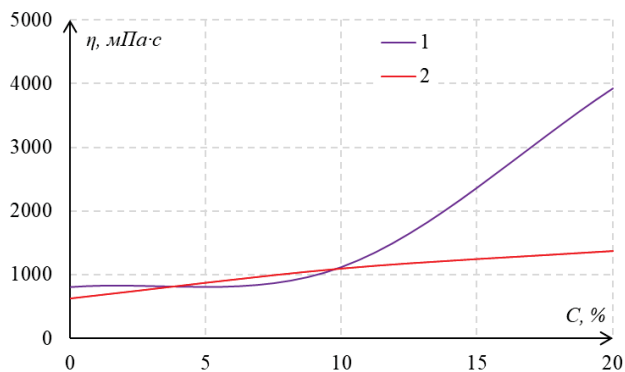


Рис. 4. Изменения динамической вязкости ВУС в зависимости от продолжительности обработки в роторном гидродинамическом генераторе кавитации: 1 – 27 с; 2 – 90 с

Fig. 4. Changes in CWS dynamic viscosity depending on duration of treatment in the rotary hydrodynamic cavitation generator: 1 – 27 s; 2 – 90 s

Объясняется это тем, что за 27 с кавитационной обработки ВУС суспензия еще не совсем гомогенизирована, в ней могут присутствовать агломераты суспензии, образованные за счет содержания остаточных углеводородов пиролизного масла в виде крупных капель. Увеличение времени обработки ВУС в роторном гидродинамическом генераторе кавитации до 90 с иллюстрирует существенное снижение значения динамической вязкости ВУС. Так, для двухкомпонентного водоугольного топлива значение динамической вязкости суспензии снижается на 22 %, в сравнении с ВУС, обрабатываемой 27 с в РГДГК. Для трехкомпонентной ВУС (с 20 % по массе пирогенетической жидкости) при более продолжительной обработке в роторном гидродинамическом генераторе кавитации вязкость снижается лишь на 65 %, в сравнении с ВУС, обрабатываемой 27 с в РГДГК. Зависимость, иллюстрирующая изменение динамической вязкости ВУС в течение 90 с, имеет более равномерный вид (практически прямолинейная зависимость). Изменение динамической вязкости водоугольной суспензии составляет 54 %. Вязкость суспензии изменяется умеренно в исследованном диапазоне концентрации пирогенетической жидкости. Отсутствуют резкие изменения (рис. 4). Проведенные исследования влияния пирогенетической жидкости в составе ВУС и продолжительности обработки суспензии в роторном гидродинамическом генераторе кавитации показали, что такой способ приготовления водоугольных суспензий позволяет снизить значение их вязкости даже при введении в их состав третьих компонент.

Результаты экспериментальных исследований среднего размера капель в трех исследованных областях струи показали положительное влияние обработки водоугольных суспензий в роторном гидро-

динамическом генераторе кавитации. На рис. 5, 6 представлены кадры высокоскоростной съемки процессов распыления ВУС пневматической форсункой с указанием значений средних размеров капель суспензии в исследованных областях и среднего угла раскрытия струи. Введение в состав водоугольных топлив третьей компоненты – пирогенетической жидкости, способствует увеличению среднего размера капель в струе в зависимости от величины добавки третьей компоненты аналогично [27].

Экспериментально установлено, что после 27 с обработки в роторном гидродинамическом генераторе кавитации двухкомпонентного водоугольного топлива средний размер капель суспензии в области исследования на отрезке 226–350 мм от сопла форсунки снижается на 12 %. После введения в состав ВУС 10 и 20 % по массе пирогенетической жидкости снижение среднего размера капель в этой же области исследования снижается лишь на 7 и 18 %, соответственно. Увеличение продолжительности обработки в роторном гидродинамическом генераторе кавитации двухкомпонентного водоугольного топлива до 90 с способствует снижению среднего размера капель на 13 %. Для трехкомпонентных ВУС, с добавками 10 и 20 % по массе пирогенетической жидкости, снижение среднего размера капель в струе составляет 15 и 22 %, соответственно.

На рис. 7 в виде гистограмм показано изменение среднего размера капель в трех областях исследования для всех составов ВУС (табл. 1).

Анализ результатов (рис. 7) показал, что по мере роста (с 27 до 90 с) продолжительности обработки ВУС в роторном гидродинамическом генераторе кавитации средний размер капель в исследованных областях струи увеличивается. При этом вязкость таких ВУС снижается (рис. 4). Обусловлено это увеличением плотности суспензий после их продолжительной кавитационной обработки. Этот параметр, так же как и вязкость, оказывает влияние на процессы диспергирования капель суспензии. Например, для составов ВУС с добавками 20 % по массе пирогенетической жидкости и обработанных в роторном гидродинамическом генераторе кавитации в течение 27 и 90 с значение плотности составляет 1230 и 1300 кг/м³. Увеличение плотности при этом составляет 5,5 %. В целом после обработки ВУС в роторном гидродинамическом генераторе кавитации наблюдается снижение среднего размера капель. Использование таких трехкомпонентных ВУС в сочетании с их кавитационной обработкой в роторном гидродинамическом генераторе кавитации позволит обеспечить достаточно неплохую мелкодисперсную струю, снизит времена задержки зажигания капель, увеличит полноту сгорания топлива.

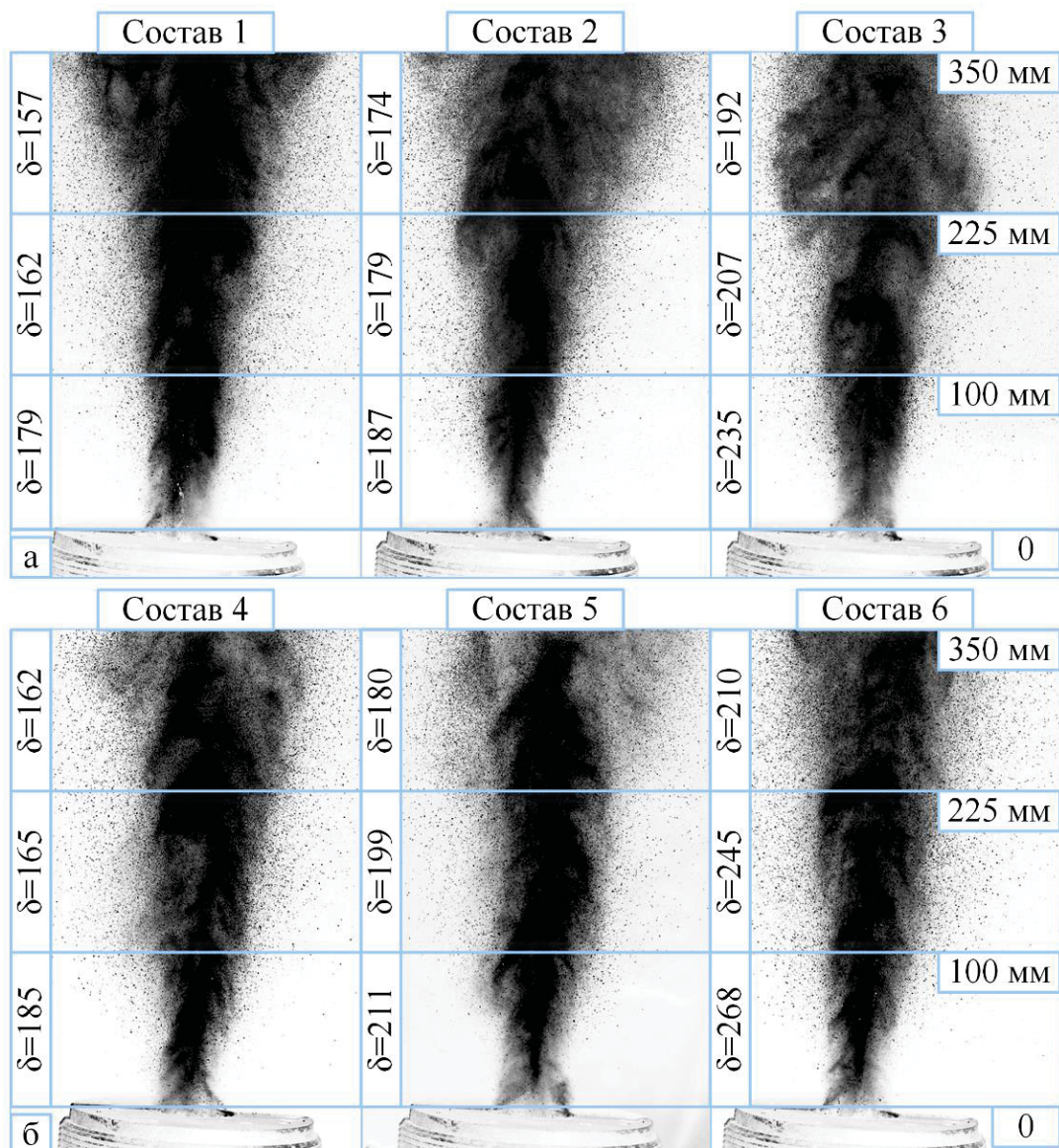


Рис. 5. Средний размер капель ВУС в исследованных областях струи в зависимости от продолжительности обработки в роторном гидродинамическом генераторе кавитации: а) 27 с; б) 90 с

Fig. 5. Average size of CWS droplets in the studied areas of the jet, depending on the duration of treatment in a rotary hydrodynamic cavitation generator: a) 27 s; b) 90 s

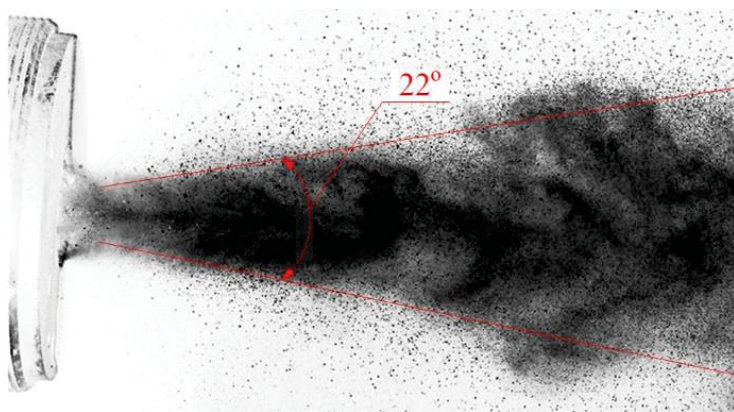


Рис. 6. Угол раскрытия струи

Fig. 6. Jet spraying angle

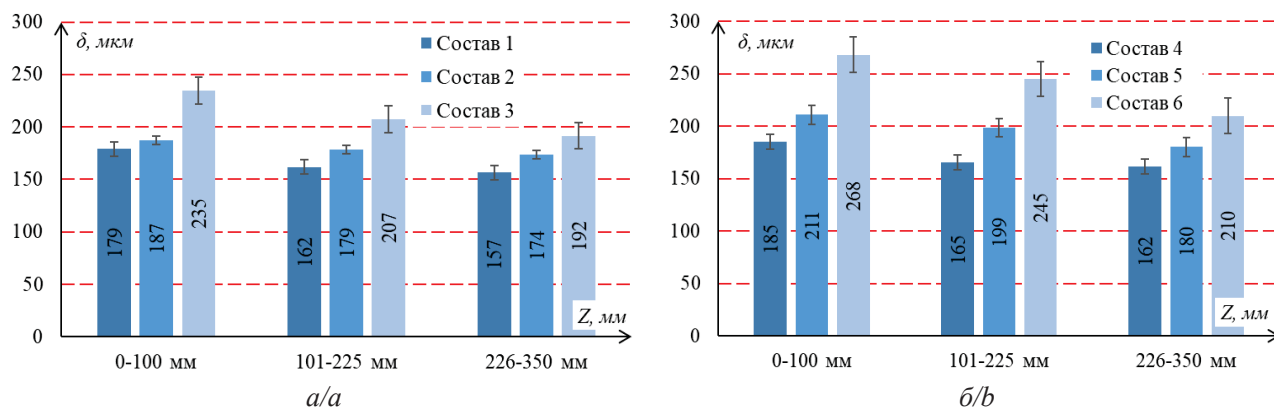


Рис. 7. Изменения среднего размера капель ВУС в трех областях струи в зависимости от продолжительности обработки в роторном гидродинамическом генераторе кавитации: а) 27 с; б) 90 с

Fig. 7. Changes in the average size of CWS droplets in three areas of the jet depending on the duration of treatment in a rotary hydrodynamic cavitation generator: а) 27 s; б) 90 s

Заключение

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния кавитационной обработки водоугольных суспензий в составе с пирогенетической жидкостью на средний размер капель в струе. Эксперименты по приготовлению водоугольных суспензий в составе с пирогенетической жидкостью показали рост значения динамической вязкости суспензии. Установлено, что за 90 с обработки суспензии в роторном гидродинамическом генераторе кавитации ее вязкость снижается на величину до 65 % в сравнении с аналогичной, но кратковременной обработкой. При длительной обработке водоугольной суспензии в кавитационном генераторе характер изменения практически прямолиней-

ный. Изменение динамической вязкости водоугольной суспензии составляет 54 %. Экспериментально установлено, что после 27 с обработки в роторном гидродинамическом генераторе кавитации двухкомпонентного водоугольного топлива средний размер капель суспензии в области исследования снижается на 12 %. Увеличение продолжительности обработки двухкомпонентного водоугольного топлива до 90 с способствует снижению среднего размера капель на 13 %. Для трехкомпонентных водоугольных суспензий, с добавками 10 и 20 % по массе пирогенетической жидкости, снижение среднего размера капель в струе составляет 15 и 22 %, соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Выявление оптимальных режимов ультразвукового воздействия для распыления вязких жидкостей методом математического моделирования / В.Н. Хмелев, Р.Н. Голых, А.В. Шалунов, А.В. Шалунова // Южно-Сибирский научный вестник. – 2012. – № 2 (2). – С. 15–19.
2. Распыление жидкости при импульсном воздействии / Н.В. Коровина, О.Б. Кудряшова, А.А. Антонникова, Б.И. Ворожцов // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 9-3. – С. 169–171.
3. Дуйшеев Т. Тонкое распыление жидкости без внешнего подвода энергии возмущения // Научный журнал «Физика». – 2015. – № 2. – С. 95–99.
4. Mudawar I., Estes K.A. Optimizing and prediction CHF in spray cooling of a surface // Journal of Heat Transfer. – 1996. – Vol. 118. – P. 672–679.
5. Primary break-up and atomization characteristics of a nasal spray / K. Shrestha, J.V. Strien, N. Singh, K. Inthavong // PloS One. – 2020. – Vol. 15 (8). – e0236063.
6. Bayvel L.P., Orzechowski Z. Liquid atomization // Taylor&Francis. – 1993. – 476 p.
7. Miller P. The measurement of spray drift // Pesticide Outlook. – 2003. – Vol. 14 (5). – P. 205–209.
8. Liquid film dispersion on horizontal circular tubes under spray impingement / Y.-T. Lee, S. Hong, L.-H. Chien, W.-H. Lin, A.-S. Yang // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – Vol. 160. – 120223.
9. Лысак И.А., Лысак Г.В. Расчет поля скоростей эжекционного устройства для распыления вязких жидкостей // Ползуновский альманах. – 2016. – № 2. – С. 68–70.
10. Tretola G., Navarro-Martinez S., Vogiatzaki K. Primary break-up characterisation and droplet statistics of multi-hole sprays using a probabilistic surface density methodology // International Journal of Multiphase Flow. – 2022. – Vol. 152. – 104039.
11. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Water droplet deformation in gas stream: impact of temperature difference between liquid and gas // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – Vol. 85. – P. 1–11.
12. Баранова М.П., Кулагин В.А., Тарабанько В.Е. Природа стабилизации водоугольных топливных суспензий // Журнал прикладной химии. – 2011. – Т. 84. – № 6. – С. 916–921.
13. On electricity consumption and economic growth in China / C. Zhang, K. Zhou, S. Yang, Z. Shao // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 76. – P. 353–368.

14. Glushkov D., Kuznetsov G., Paushkina K. Switching coal-fired thermal power plant to composite fuel for recovering industrial and municipal waste: Combustion characteristics, emissions, and economic effect // *Energies*. – 2020. – Vol. 13 (1). – 259.
15. Anthropogenic emissions from the combustion of composite coal-based fuels / A.D. Nikitin, G.S. Nyashina, A.F. Ryzhkov, P.A. Strizhak // *Science of the Total Environment*. – 2021. – Vol. 772. – 144909.
16. Arsenic and selenium distribution and speciation in coal and coal combustion by-products from coal-fired power plants / J. Xie, X.-D. Niu, K.-Q. He, M.-D. Shi, S.-J. Yu, C.-G. Yuan, J.-F. Liu // *Fuel*. – 2021. – Vol. 292. – 120228.
17. Современные проблемы газификации водоугольного топлива (краткий обзор) / А.Ю. Радзюк, Е.Б. Истягина, В.А. Кулагин, А.В. Жуйков // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. – 2021. – Т. 14. – № 5. – С. 487–506.
18. Kurgankina M.A., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Prospects of thermal power plants switching from traditional fuels to coal-water slurries containing petrochemicals // *Science of The Total Environment*. – 2019. – Vol. 671. – P. 568–577.
19. Characteristics of particle size and velocity of droplets of coal water slurry subjected to air-blast electrostatic atomization using a phase Doppler particle analyzer / J. Zheng, Y. Xu, Q. Wang, H. He // *Journal of Electrostatics*. – 2019. – Vol. 98. – P. 40–48.
20. Dispersion and flow properties of charcoal oil slurries (ChOS) as potential renewable industrial liquid fuels / L.M.E.F. Loureiro, P.B.F. Gil, F.V. Vieira de Campos, L.J.R. Nunes, J.M.F. Ferreira // *Journal of the Energy Institute*. – 2018. – Vol. 91 (6). – P. 978–983.
21. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Kaltaev A.Z. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liquid pyrolysis products of wood waste // *Energy*. – 2022. – Vol. 257. – 124813.
22. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Lavrinenko S.V. Quasi-hot spraying of coal-water slurries with pyrogenetic water additives // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2022. – Vol. 186. – P. 587–598.
23. Gvozdyakov D., Zenkov A. Improvement of atomization characteristics of coal-water slurries // *Energy*. – 2021. – Vol. 230. – 120900.
24. Gvozdyakov D., Zenkov A. Influence of petrochemicals on jet characteristics after coal-water fuel spraying // *Fuel Processing Technology*. – 2021. – Vol. 218. – 106864.
25. Gvozdyakov D., Zenkov A. Nozzles for spraying coal-water fuels // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13 (21). – 12006.
26. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner / E.Yu. Shadrin, I.S. Anufriev, E.B. Butakov, E.P. Kopyev, S.V. Alekseenko, L.I. Maltsev, O.V. Sharypov // *Fuel*. – 2021. – Vol. 303. – 121182.
27. Влияние кавитационной обработки на свойства водоугольных суспензий с добавками пирогенетической жидкости / Д.В. Гвоздяков, А.В. Зенков, Л.И. Мальцев, Ю.С. Поджаров // *iPolytech Journal*. – 2023. – Т. 27. – № 2. – С. 297–309.
28. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet / I.S. Anufriev, E.Yu. Shadrin, E.P. Kopyev, S.V. Alekseenko, O.V. Sharypov // *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – Vol. 163. – 114400.
29. Experimental and numerical investigation of aerodynamics of a pneumatic nozzle for suspension fuel / S.V. Alekseenko, I.S. Anufriev, A.A. Dekterev, V.A. Kuznetsov, L.I. Maltsev, A.V. Minakov, M.Yu. Chernetskiy, E.Yu. Shadrin, O.V. Sharypov // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2019. – Vol. 77. – P. 288–298.
30. Experimental study of an impinging jet with different swirl rates / S.V. Alekseenko, A.V. Bilsky, V.M. Dulin, D.M. Markovich // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2007. – Vol. 28 (6). – P. 1340–1359.
31. Integral characteristics of water droplet evaporation in high-temperature combustion products of typical flammable liquids using SP and IPI methods / G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, R.S. Volkov, O.V. Vysokomornaya // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2016. – Vol. 108. – P. 218–234.
32. Bilskiy A.V., Lozhkin Yu.A., Markovich D.M. Interferometric technique for measurement of droplet diameter // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2011. – Vol. 18 (1). – P. 1–12.
33. Investigation of the structure of a polydisperse gas-droplet jet in the initial region. Experiment and numerical simulation / Yu.A. Lozhkin, D.M. Markovich, M.A. Pakhomov, V.I. Terekhov // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2014. – Vol. 21 (3). – P. 294–307.
34. Van de Hulst H.C. Light scattering by small particles. – New York: Dover Publ., 1981. – 470 p.
35. Hybrid spherical particle field measurement based on interference technology / J. Sun, H. Zhang, J. Li, Y. Zhou, D. Jia, T. Liu // *Measurement Science and Technology*. – 2017. – Vol. 28 (3). – P. 1–7.
36. Ruiz S.G., Vetrano M.R., Van Beeck J. Feasibility of using glory and speckle patterns for sizing spherical and irregular particles // *Applied Optics*. – 2014. – Vol. 53 (21). – P. 4722–4728.
37. Effect of the physical properties of liquid and ALR on the spray characteristics of a pre-filming airblast nozzle / M.M. Tareq, R.A. Dafsari, S. Jung, J. Lee // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2020. – Vol. 126. – 103240.

Информация об авторах

Гвоздяков Дмитрий Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. dim2003@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7866-9180>

Зенков Андрей Викторович, кандидат технических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. avz41@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7763-3266>

Мальцев Леонид Иванович, доктор технических наук, главный научный сотрудник Института теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1. maltzev@itp.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4699-8289>

Поджаров Юрий Сергеевич, лаборант Института теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1. yura_p@ngs.ru

Поступила в редакцию: 20.11.2023

Поступила после рецензирования: 01.12.2023

Принята к публикации: 21.02.2024

REFERENCES

1. Khmelev V.N., Golykh R.N., Shalunov A.V., Shalunova A.V. Identification of optimal ultrasonic exposure modes for spraying viscous liquids by mathematical modeling. *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik*, 2012, no. 2 (2), pp. 15–19. (In Russ.)
2. Korovina N.V., Kudryashova O.B., Antonnikova A.A., Vorozhtsov B.I. Spraying of liquid under pulsed action. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2013, vol. 56, no. 9-3, pp. 169–171. (In Russ.)
3. Dyuheyev T. Fine atomization of liquid without external supply of disturbance energy. *Nauchnyy zhurnal Fizika*, 2015, no. 2, pp. 95–99. (In Russ.)
4. Mudawar I., Estes K.A. Optimizing and prediction CHF in spray cooling of a surface. *Journal of Heat Transfer*, 1996, vol. 118, pp. 672–679.
5. Shrestha K., Strien J.V., Singh N., Inthavong K. Primary break-up and atomization characteristics of a nasal spray. *PloS One*, 2020, vol. 15 (8), e0236063.
6. Bayvel L.P., Orzechowski Z. Liquid atomization. *Taylor&Francis*, 1993, 476 p.
7. Miller P. The measurement of spray drift. *Pesticide Outlook*, 2003, vol. 14 (5), pp. 205–209.
8. Lee Y.-T., Hong S., Chien L.-H., Lin W.-H., Yang A.-S. Liquid film dispersion on horizontal circular tubes under spray impingement. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 160, 120223.
9. Lysak I.A., Lysak G.V. Calculation of the velocity field of an ejection device for spraying viscous liquids. *Polzunovskiy almanakh*, 2016, no. 2, pp. 68–70. (In Russ.)
10. Tretola G., Navarro-Martinez S., Vogiatzaki K. Primary break-up characterisation and droplet statistics of multi-hole sprays using a probabilistic surface density methodology. *International Journal of Multiphase Flow*, 2022, vol. 152, 104039.
11. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Water droplet deformation in gas stream: Impact of temperature difference between liquid and gas. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 85, pp. 1–11.
12. Baranova M.P., Kulagin V.A., Tarabanko V.E. The nature of stabilization of coal-water fuel suspensions. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 2011, vol. 84, no. 6, pp. 916–921. (In Russ.)
13. Zhang C., Zhou K., Yang S., Shao Z. On electricity consumption and economic growth in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 76, pp. 353–368.
14. Glushkov D., Kuznetsov G., Paushkina K. Switching coal-fired thermal power plant to composite fuel for recovering industrial and municipal waste: combustion characteristics, emissions, and economic effect. *Energies*, 2020, vol. 13 (1), 259.
15. Nikitin A.D., Nyashina G.S., Ryzhkov A.F., Strizhak P.A. Anthropogenic emissions from the combustion of composite coal-based fuels. *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 772, 144909.
16. Xie J., Niu X.-D., He K.-Q., Shi M.-D., Yu S.-J., Yuan C.-G., Liu J.-F. Arsenic and selenium distribution and speciation in coal and coal combustion by-products from coal-fired power plants. *Fuel*, 2021, vol. 292, 120228.
17. Radzyuk A.Yu., Istyagina E.B., Kulagin V.A., Zhuykov A.V. Modern problems of coal-water fuel gasification (a brief overview). *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*, 2021, vol. 14, no. 5, pp. 487–506. (In Russ.)
18. Kurgankina M.A., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Prospects of thermal power plants switching from traditional fuels to coal-water slurries containing petrochemicals. *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 671, pp. 568–577.
19. Zheng J., Xu Y., Wang Q., He H. Characteristics of particle size and velocity of droplets of coal water slurry subjected to air-blast electrostatic atomization using a phase Doppler particle analyzer. *Journal of Electrostatics*, 2019, vol. 98, pp. 40–48.
20. Loureiro L.M.E.F., Gil P.B.F., Vieira de Campos F.V., Nunes L.J.R., Ferreira J.M.F. Dispersion and flow properties of charcoal oil slurries (ChOS) as potential renewable industrial liquid fuels. *Journal of the Energy Institute*, 2018, vol. 91 (6), pp. 978–983.
21. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Kaltaev A.Z. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liquid pyrolysis products of wood waste. *Energy*, 2022, vol. 257, 124813.
22. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Lavrinenko S.V. Quasi-hot spraying of coal-water slurries with pyrogenetic water additives. *Chemical Engineering Research and Design*, 2022, vol. 186, pp. 587–598.
23. Gvozdyakov D., Zenkov A. Improvement of atomization characteristics of coal-water slurries. *Energy*, 2021, vol. 230, 120900.
24. Gvozdyakov D., Zenkov A. Influence of petrochemicals on jet characteristics after coal-water fuel spraying. *Fuel Processing Technology*, 2021, vol. 218, 106864.
25. Gvozdyakov D., Zenkov A. Nozzles for spraying coal-water fuels. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13 (21), 12006.
26. Shadrin E.Yu., Anufriev I.S., Butakov E.B., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Maltsev L.I., Sharypov O.V. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner. *Fuel*, 2021, vol. 303, 121182.
27. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Maltsev L.I., Podzharov Yu.S. Effect of cavitation treatment on the properties of coal-water suspensions with pyrogenetic liquid additives. *iPolytech Journal*, 2023, vol. 27, no. 2, pp. 297–309. (In Russ.)
28. Anufriev I.S., Shadrin E.Yu., 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, 114400.
29. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Dekterev A.A., Kuznetsov V.A., Maltsev L.I., Minakov A.V., Chernetskiy M.Yu., Shadrin E.Yu., Sharypov O.V. Experimental and numerical investigation of aerodynamics of a pneumatic nozzle for suspension fuel. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2019, vol. 77, pp. 288–298.
30. 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 (6), pp. 1340–1359.

31. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Volkov R.S., Vysokomornaya O.V. Integral characteristics of water droplet evaporation in high-temperature combustion products of typical flammable liquids using SP and IPI methods. *International Journal of Thermal Sciences*, 2016, vol. 108, pp. 218–234.
32. Bilskiy A.V., Lozhkin Yu.A., Markovich D.M. Interferometric technique for measurement of droplet diameter. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2011, vol. 18 (1), pp. 1–12.
33. Lozhkin Yu.A., Markovich D.M., Pakhomov M.A., Terekhov V.I. Investigation of the structure of a polydisperse gas-droplet jet in the initial region. Experiment and numerical simulation. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, vol. 21 (3), pp. 294–307.
34. Van de Hulst H.C. *Light scattering by small particles*. New York, Dover Publ., 1981. 470 p.
35. Sun J., Zhang H., Li J., Zhou Y., Jia D., Liu T. Hybrid spherical particle field measurement based on interference technology. *Measurement Science and Technology*, 2017, vol. 28 (3), pp. 1–7.
36. Ruiz S.G., Vetrano M.R., van Beeck J. Feasibility of using glory and speckle patterns for sizing spherical and irregular particles. *Applied Optics*, 2014, vol. 53 (21), pp. 4722–4728.
37. Tareq M. M., Dafsari R. A., Jung S., Lee J. Effect of the physical properties of liquid and ALR on the spray characteristics of a pre-filming airblast nozzle. *International Journal of Multiphase Flow*, 2020, vol. 126, 103240.

Information about the authors

Dmitry V. Gvozdyakov, Cand. Sc, Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. dim2003@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7866-9180>

Andrey V. Zenkov, Cand. Sc, Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. avz41@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7763-3266>

Leonid I. Maltzev, Dr. Sc, Chief Researcher, Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Academician Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. maltzev@itp.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4699-8289>

Yury S. Podzharov, Laboratory Assistant, Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Academician Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. yura_p@ngs.ru

Received: 20.11.2023

Revised: 01.12.2023

Accepted: 21.02.2024