

УДК 662.62:662.75:662.94

Дмитрий Васильевич Гвоздяков

ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кандидат технических наук, доцент, Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова, Россия, Томск, телефон (3822) 701-777 вн. 1626, e-mail: dim2003@tpu.ru

Андрей Викторович Зенков

ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кандидат технических наук, доцент, Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова, Россия, Томск, телефон (3822) 701-777 вн. 1699, e-mail: avz41@tpu.ru

Оценка эффективности завихрения воздуха при распылении водоугольных суспензий пневматической форсункой¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Переход к экологически чистым энергетическим технологиям, обусловленный современными требованиями к охране окружающей среды, предполагает поиск и создание новых источников энергии. Одним из способов удовлетворить эти требования и сохранить на прежнем уровне показатели 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 является актуальным.

Материалы и методы. Приготовление водоугольных суспензий осуществлено в роторном гидродинамическом генераторе кавитации. Для распыления водоугольных суспензий использована пневматическая форсунка с внешним смешением. Средний размер капель топлива после распыления определен с помощью метода Interferometric Particle Imaging.

Результаты. Выполнены экспериментальные исследования характеристик распыления водоугольных суспензий на основе бурого угля и пирогенетической жидкости пневматической форсункой с тангенциальной подачей распыляющего агента. Апробирована трехэтапная методика приготовления водоугольных суспензий с добавлением пирогенетической жидкости. Установлено, что текучесть водоугольного топлива при использовании такой методики сохраняется даже при введении 20 % по массе пирогенетической жидкости в состав водоугольных суспензий при замещении как воды, так и угля в одинаковых пропорциях; кинематическая вязкость водоугольных суспензий увеличивается при добавлении пирогенетической жидкости, несмотря на снижение концентрации твердой компоненты; изменение плотности суспензии незначительно. Исследование процесса распыления показало, что тангенциальная подача воздуха на форсунку приводит к увеличению угла раскрытия струи на 6° в сравнении с прямой подачей, при этом средний размер капель в струе двухкомпонентной водоугольной суспензии при прямой подаче воздуха на 8 % меньше.

Выводы. Результаты проведенных работ позволили получить совершенно новые знания, которые могут существенно продвинуть отечественную и мировую науку и технику в области энергетического машиностроения, а именно технологии распыления водоугольных топлив. Экспериментальные исследования показали основные закономерности влияния свойств водоугольных суспензий и способа подвода распыляющего агента на процесс формирования газочапельной струи. Установление таких закономерностей обеспечит условия для эффективного распыления достаточно вязких водоугольных суспензий в камерах сгорания энергетических котлов. Данная информация даст возможность проектировщикам и конструкторам создавать высокоэффективные конструкции паровых и водогрейных котлов и газификаторов, работающих на водоугольных суспензиях.

Ключевые слова: бурый уголь, водоугольная суспензия, пирогенетическая жидкость, пневматическая форсунка

¹ Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00142).
The research has been conducted with the support of the Russian Science Foundation (project No. 23-29-00142).

Dmitriy Vasilyevich Gvozdyakov

National Research Tomsk Polytechnic University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Butakov Research Center, Russia, Tomsk, (3822) 701-777 ext. 1626, e-mail: dim2003@tpu.ru

Andrey Viktorovich Zenkov

National Research Tomsk Polytechnic University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Butakov Research Center, Russia, Tomsk, (3822) 701-777 ext. 1699, e-mail: avz41@tpu.ru

Evaluation of the efficiency of air swirl during atomization of coal-water slurries with a pneumatic atomizer

Abstract

Background. Due to modern requirements for environmental protection, introduction of environmentally friendly power engineering technologies involves search and development of new energy sources. One of the ways to meet these requirements and maintain the same level of energy production by thermal power plants is to use multicomponent fuels. The most promising and affordable heavy fuel oil from the point of view of energy, ecology and economy are coal-water slurries (CWS). In this regard, the study of the properties and characteristics of such fuels is relevant.

Materials and methods. The coal-water slurries have been prepared in a rotary hydrodynamic cavitation generator. A pneumatic atomizer with external mixing is used to spray the coal-water slurries. Interferometric Particle Imaging method is used to determine the average size of fuel droplets after atomization.

Results. The authors have conducted experimental studies of the characteristics of atomization of coal-water slurries based on lignite and pyrogenetic liquid with a pneumatic atomizer with a tangential supply of a spraying agent. A three-stage method to prepare lignite-based slurries with pyrogenetic liquid has been tested. It has been established that when using this technique, the fluidity of coal-water fuel is maintained even with the introduction of 20 % by weight of pyrogenetic liquid into the composition of coal-water slurries when replacing both water and coal in equal proportions. The kinematic viscosity of coal-water suspensions increases when pyrogenetic liquid is added, despite a decrease in the concentration of the solid component. The change of suspension density is insignificant. The results of the study of atomization process have shown that the tangential air supply to the atomizer leads to an increase of the jet spraying angle by 6° compared with direct supply. At the same time, the average droplet size in the jet of a two-component CWS with direct air supply is 8 % smaller.

Conclusions. The results of the study have made it possible to obtain completely new knowledge that can significantly advance domestic and world science and technology in the field of power engineering, namely the technology of coal-water fuels atomization. Experimental studies have determined the main patterns of influence of the CWS properties and the method of spraying agent supply on the formation of a gas-drop jet. Such patterns will provide conditions for the effective atomization of quite viscous CWS in the combustion chambers of energy boilers. The results obtained will enable designers and constructors to develop highly efficient designs of steam and hot water boilers and gasifiers fueled by CWS.

Key words: lignite, coal-water slurry, pyrogenetic liquid, pneumatic atomizer

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.4.030-040

Введение. В современном мире на угольную энергетику приходится около 40 % от общего объема производимой энергии [1]. По оценке специалистов, в ближайшие десятилетия уголь будет оставаться одним из самых востребованных видов энергетического сырья [2]. Основной причиной этого является его стоимость и более равномерное по сравнению с газом и нефтью распределение по континентам. При этом его добыча и переработка на обогатительных фабриках, как правило, сопровождается образованием большого количества угольных отходов (шлам, фильтр-кек) [2]. Широкого применения такие энергетические отходы в современном мире пока не нашли. В основном их

складируют либо захоранивают на прилегающих к обогатительным фабрикам специализированных полигонах. Но ограничивающим фактором для реализации таких проектов является снижение производительности паровых или водогрейных котлов (при переводе газового или пылеугольного котла на шламовое топливо). Наиболее перспективным вариантом энергетической утилизации вышеуказанных угольных отходов является их совместное сжигание в виде водоугольных суспензий (ВУС) с традиционными топливами или самостоятельно.

ВУС представляет собой жидкое смешанное топливо, состоящее из измельченного угля, воды и добавок поверхностно-активных

веществ (ПАВ) [3]. Широкую популярность такое топливо получило во второй половине XX века как альтернатива традиционным котельным топливам – нефти, мазуту [4]. Положительными качествами ВУС принято считать: взрывобезопасность (отсутствует сухая угольная пыль); экологичность (при сжигании в атмосферу выбрасывается меньше соединений вредных веществ из-за присутствия паров воды); независимость от поставок нефти (месторождения угля более равномерно распределены по континентам); показатели логистики (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 с взвешенными твердыми частицами); низкая стоимость (в качестве твердой компоненты можно использовать отходы (фильтр-кек) угольнообогатительных фабрик) [5]. Несмотря на внушительный перечень положительных качеств водоугольных топлив, есть причины, сдерживающие их широкое внедрение в теплоэнергетику.

Технология распыления и сжигания ВУС в котлах, как правило, реализуется аналогично технологии для жидких топлив (нефти, мазута, дизельного топлива) [6]. Характерной особенностью распыления ВУС является образование крупных капель [7] в силу высокой, по сравнению с горячим мазутом, вязкости. Поэтому для полноценного сжигания ВУС необходимо эффективно его распылять через форсунки. Образующаяся после распыления ВУС мелкодисперсная струя позволит увеличить площадь поверхности взаимодействия такого топлива с окислителем. В результате этого будет достигнуто быстрое воспламенение капель ВУС, их полноценное сгорание и стабильный факел.

В современной специальной литературе представлено относительно небольшое количество устройств для распыления ВУС [6]. Приведенные в качестве примера форсунки для распыления ВУС имеют преимущества и недостатки. Например, устройство распыления ВУС [8] позволяет обеспечить мелкодисперсную струю, но организация смешения топлива и распыляющего агента внутри форсунки требует внимательного контроля параметров распыления (в частности, давления ВУС и распыляюще-

го агента). Даже незначительное отклонение этих параметров от проектных значений приведет к образованию крупных капель. Устройство распыления ВУС [9] также обеспечивает мелкодисперсную струю за счет высокого расхода распыляющего агента, но при этом такое устройство распыления оснащено небольшим диаметром топливного канала. Последний предрасположен к засорению крупными частицами угля или агломератами топлива. Геометрические особенности устройства распыления с внутренним смешением ВУС [10] и распыляющего агента [9] с высокой долей вероятности станут причиной засорения топливного канала вязким ВУС. Для эффективной работы форсунок [9, 10] необходимо хорошо гомогенизированное топливо из мелкодисперсного угля или угольных отходов. Последние факторы будут причиной дополнительных затрат энергии на подготовку топлива. Водоугольные форсунки с внешним [11] и внутренним [12] смешением топлива и распыляющего агента имеют достаточно простую конструкцию, позволяют исключить крупные капли ВУС в струе. Но относительно небольшой диаметр топливного канала станет причиной его засорения и, возможно, эрозийного износа. К положительным качествам сопла [13] можно отнести большой диаметр соплового канала, мало подверженный засорению. При этом за счет внутреннего смешения ВУС и распыляющего агента возможно формирование достаточно мелкодисперсной струи. Форсунка для распыления ВУС [14] выполнена по принципу внутреннего смешения топлива и распыляющего агента. Достаточно сложная конструкция и небольшой диаметр топливного канала станут причиной его засорения.

Анализ водоугольных форсунок и способов распыления ВУС [9–14] позволяет сделать вывод о том, что на сегодняшний день не существует достаточно эффективного устройства распыления ВУС. Основными проблемами рассмотренных форсунок являются высокая вероятность засорения топливного канала вязкими ВУС и низкая эффективность с точки зрения формирования мелкодисперсной струи.

В качестве альтернативы известным моделям водоугольных форсунок испытывалось устройство распыления ВУС – пневматическая форсунка [15], которая хорошо себя зарекомендовала при распылении двухкомпонентных водоугольных топлив. В ее кон-

струкции предполагается смешение ВУС и распыляющего агента вне форсунки. Такое решение позволяет эффективно распылять ВУС, в том числе и многокомпонентные. Достаточно широкий диаметр соплового канала позволяет обеспечивать беспрепятственное течение ВУС даже в случаях присутствия в топливе крупных фрагментов угля. Также конструкция форсунки позволяет осуществлять подачу распыляющего агента как параллельно линии подачи топлива, так и тангенциально.

Целью настоящего исследования является экспериментальная оценка эффективности завихрения воздуха за счет его тангенциальной подачи на пневматическую форсунку и характеристик газокапельной струи при таком способе распыления вязких водоугольных суспензий. В качестве добавки в ВУС использовалась пирогенетическая жидкость (ПЖ), отвечающая за увеличение вязкости суспензии. Введение в состав суспензий пирогенетической жидкости осуществлялось путем замещения ею аналогичного по массе (от 10 до 20 %) количества угля и воды.

Методы исследования. В качестве компонент ВУС использовался бурый уголь, водопроницаемая вода и пирогенетическая жидкость. Характеристики компонент представлены в табл. 1.

Пирогенетическая жидкость является побочным продуктом термической переработки древесины, в том числе отходов лесопиления. ПЖ в составе ВУС выступает в роли поверхностно-активного вещества.

Процесс приготовления буроугольных суспензий состоит из трех этапов. На первом этапе осуществляется смешивание твердой компоненты ВУС и воды лопастным смесителем в течение 4–5 минут. На втором этапе каждый состав двухкомпонентной буроугольной суспензии дополнительно обраба-

тывается в роторном гидродинамическом генераторе кавитации. В результате такой обработки ВУС частицы угля дополнительно разрушаются, что способствует гомогенизации суспензий. Продолжительность обработки ВУС на втором этапе составляла 30 с. Такого времени достаточно для достижения гомогенизации и стабильности суспензии. На третьем этапе необходимое количество пирогенетической жидкости добавляется в ВУС после ее приготовления в роторном гидродинамическом генераторе кавитации (рис. 1), разработанном в Институте Теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

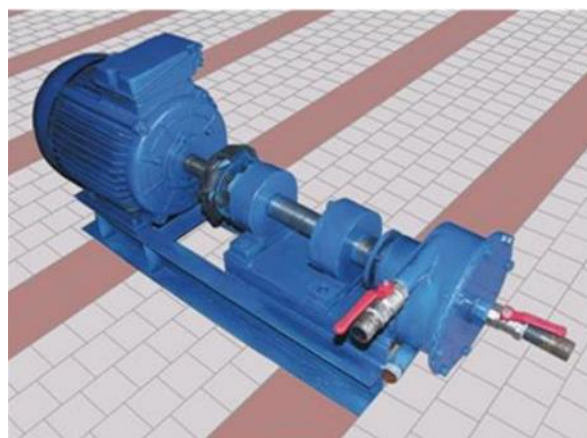


Рис. 1. Роторный гидродинамический генератор кавитации

После этого осуществлялось перемешивание трехкомпонентной ВУС лопастным смесителем в течение 4–5 минут. Приготовленная ВУС процеживалась через сито (размер ячеек 1 мм) с целью отфильтровать возможные крупные фрагменты угля и агломераты. В табл. 2 представлены составы буроугольных суспензий с добавками пирогенетической жидкости.

Таблица 1. Компоненты ВУС

Компонента	Характеристика	Значение
Бурый уголь	Размер частиц, мкм	Менее 200
	Выход летучих, %	47
	Зольность, %	5,3
	Влажность, %	26
	Содержание серы, %	0,27
	Теплотворная способность, МДж/кг	17,6
Вода	Плотность, кг/м ³	997
	pH	9,8
Пирогенетическая жидкость	Плотность, кг/м ³	1030
	pH	~ 2,3
	Теплотворная способность, МДж/кг	3,1

Таблица 2. Состав ВУС

№ п/п	ВУС _{количество ПЖ}	Уголь	Вода	ПЖ
		%, по массе (масса, кг)		
1	ВУС ₀	50 (1,2)	50 (1,2)	0
2	ВУС ₁₀	45 (1,08)	45 (1,08)	10 (0,24)
3	ВУС ₂₀	40 (0,96)	40 (0,96)	20 (0,48)

Количество компонент в каждом составе ВУС устанавливается предварительным смешением отдельных компонент в малых количествах в целях определения текучести суспензий и недопущения пастообразной консистенции. Замещение только воды пирогенетической жидкостью приводит к значительному увеличению вязкости суспензии и превращает ее в нетекучую субстанцию. Это является очень важным при распылении таких суспензий. Масса всех составов ВУС была одинаковой (2,4 кг).

Динамическая вязкость μ исследовавшихся топливных смесей ВУС измерялась с помощью ротационного вискозиметра. Условная вязкость бурогоугольных суспензий измерялась с помощью воронки Марша с пересчетом на кинематическую вязкость η . Плотность бурогоугольных суспензий ρ определялась методом измерения массы контрольного объема ВУС.

Экспериментальные исследования процессов распыления бурогоугольных суспензий в целях установления среднего размера капель в струе осуществлялись на стенде [14]. Его принципиальная схема представлена на рис. 2. Пневматическая форсунка [15] размещалась в центре на продольной оси аэродинамического имитатора камеры сгорания котла [14]. ВУС на форсунку подавалась с помощью пневматического насоса при избыточном давлении P_F не более 0,04 МПа. Особенностью подачи распыляющего агента являлось то, что он подавался тангенциально. Такое решение обеспечивает завихрение струи воздуха в газовой камере форсунки и на выходе из нее. В качестве распыляющего агента использовался сжатый воздух.

На первом этапе проведения экспериментов (прямая подача распыляющего агента на форсунку (рис. 3)) давление воздуха P_A составляло 0,4 МПа. После этого эксперименты проводились при тангенциальной подаче воздуха при аналогичном давлении. После чего путем подбора давления воздуха определялось его значение, при котором характеристики газочапельной

струи при его прямой подаче соответствовали характеристикам струи при тангенциальной подаче воздуха.

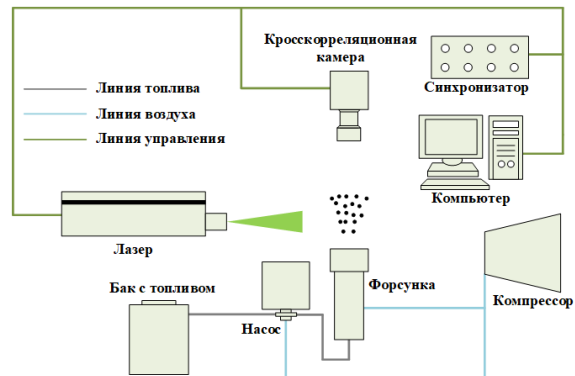


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального стенда



Рис. 3. Пневматическая форсунка

Средний размер капель δ определялся при помощи метода Interferometric Particle Imaging (IPI) [16]. Метод применяется для измерения мгновенных пространственных распределений размеров капель от 10 до 1000 мкм 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 имеют вид 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 точечных источников, а точнее, картина интерференции света от них.

Метод IPI позволяет регистрировать мгновенные распределения диаметров капель в плоском поперечном сечении потока [17]. Этот метод достаточно хорошо себя зарекомендовал при исследованиях газочапельного течения при атомизации жидкого углеводородного топлива (дизельное топливо и отработанное моторное масло – непрозрачная жидкость) струей перегретого пара и воздуха [18]. Согласно теории рассеяния Ми [19], 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 [20], 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, т. е. 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 о том, что частота интерференционных полос пропорциональна диаметру капли [19].

Значение угла раскрытия струи определялось методом, описанным в [21]. При обработке снимков струи (не менее 5 картинок для каждого состава) аппроксимировались края струи. После чего проводили две ортогональные линии к продольной оси сопла и определяли значение угла раскрытия.

Результаты исследования. Результаты экспериментальных исследований изменения динамической вязкости ВУС с добавками пирогенетической жидкости показали ее существенное влияние на μ . Ранее [22] нами установлено, что с точки зрения текучести водоугольного топлива на основе бурого угля, приготовленного по технологии, когда все компоненты ВУС обрабатываются в роторном гидродинамиче-

ском генераторе кавитаций совместно, допустимое количество пирогенетической жидкости в ее составе не должно превышать 10 % по массе. Изменения динамической вязкости ВУС_0 и ВУС_{20} представлены на рис. 4.

При проведении настоящих исследований установлено, что текучесть водоугольного топлива на основе бурого угля сохраняется даже при введении 20 % по массе ПЖ в состав ВУС после его обработки в роторном гидродинамическом генераторе кавитаций. Это связано с изменением методики подготовки ВУС, а именно с добавлением ПЖ после приготовления двухкомпонентного топлива. Замещение угля и воды в составе ВУС на 10 % по массе ПЖ приводит к росту динамической вязкости на 61 % при скорости сдвига 27 с^{-1} . Введение в состав водоугольного топлива 20 % по массе ПЖ приводит к увеличению вязкости на 29 % при скорости сдвига 27 с^{-1} , несмотря на уменьшение количества угля.

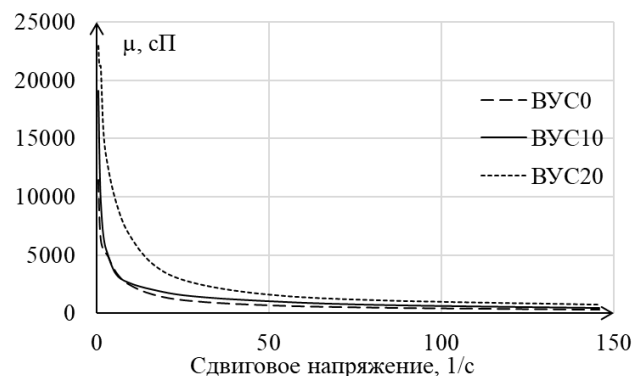


Рис. 4. Динамическая вязкость ВУС

Исследования влияния пирогенетической жидкости на кинематическую вязкость ВУС показали неоднозначное изменение этой характеристики. Результаты представлены на рис. 5.

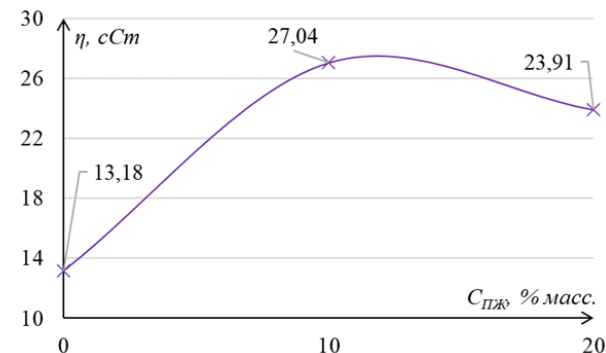


Рис. 5. Изменение кинематической вязкости ВУС

Установлено, что значение кинематической вязкости двухкомпонентной буровой суспензии составляет 13,18 сСт. При этом суспензия обладала хорошей текучестью. В ее составе отсутствовали агломераты. Значение кинематической вязкости буровой суспензии с добавкой 10 % по массе ПЖ (VUC_{10}) составило 27,04 сСт. Такое существенное увеличение (51 %) вязкости ВУС, по сравнению с двухкомпонентной суспензией, несмотря на частичное замещение угля, объясняется химическим взаимодействием компонентов ПЖ с частицами угля. Соотношение ПЖ и угля в составе суспензии при этом составило 0,2. Значение кинематической вязкости буровой суспензии с добавкой 20 % по массе ПЖ (VUC_{20}) составило 23,91 сСт. По отношению к двухкомпонентной ВУС рост вязкости составил 45 %. Соотношение ПЖ и угля в составе суспензии при этом составило 0,5. Снижение кинематической вязкости ВУС с добавкой 20 % по массе ПЖ относительно суспензии с добавкой 10 % по массе ПЖ составило 11,5 %. Такое изменение вязкости суспензий объясняется количеством угля в их составе. В третьем составе ВУС (VUC_{20}) угля меньше всего. Суспензии VUC_{10} и VUC_{20} , так же как и двухкомпонентная ВУС, обладали хорошей текучестью. Проведенные исследования влияния ПЖ в составе ВУС показали, что при пропорциональном замещении количества бурого угля и воды пирогенетической жидкостью возможно предотвратить рост вязкости суспензии и обеспечить сохранение ее текучести.

По результатам измерения плотностей исследовавшихся ВУС (табл. 2) установлено снижение их плотности при замещении угля и воды аналогичным по массе количеством ПЖ. При этом изменения плотности незначительны (не более 3 %). Отличие составов VUC_0 и VUC_{10} составило 2 %. Плотности суспензий VUC_{10} и VUC_{20} отличаются менее чем на 1 %. Наибольшее отличие (примерно 3 %) плотности характерно для суспензий VUC_0 и VUC_{20} .

Результаты экспериментальных исследований среднего размера капель после распыления исследовавшихся ВУС в трех областях струи хорошо иллюстрируют влияние вязкости суспензии на средний размер капель. На рис. 6 представлены кадры высокоскоростной съемки процессов распыления буровых суспензий пнев-

матической форсункой при тангенциальной подаче воздуха с указанием значений средних размеров капель суспензии в исследованных областях. Замещение угля и воды аналогичным по массе количеством ПЖ способствует изменению среднего размера капель в струе в зависимости от величины добавки третьей компоненты.

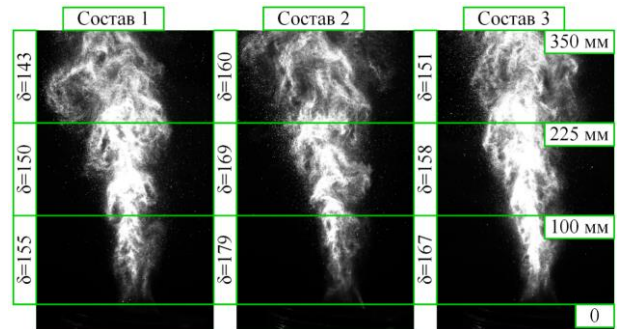


Рис. 6. Средний размер капель ВУС в струе при тангенциальной подаче воздуха на форсунку ($P_A = 0,4$ МПа)

Экспериментально установлено, что при тангенциальной подаче воздуха на форсунку средний размер капель двухкомпонентной ВУС в области регистрации струи на отрезке 226–350 мм от сопла снижается на 8 % по сравнению с отрезком 0–100 мм. После замещения в составе суспензии 10 % и 20 % угля и воды на аналогичное по массе количество ПЖ снижение среднего размера капель ВУС составляет по 10 %. В целом средние капли наибольшего размера характерны для VUC_{10} . Это объясняется тем, что данная суспензия обладает наибольшей вязкостью по сравнению с VUC_0 и VUC_{20} . Капли сильно вязких жидкостей и суспензий хуже подвержены фрагментации в процессе распыления.

Определено, что средний размер капель во всей области исследования для VUC_{10} и VUC_{20} соответственно на 12 % и 6 % больше, чем для VUC_0 .

С целью оценить влияние тангенциальной подачи воздуха на форсунку нами проведены эксперименты с прямой подачей воздуха при идентичных условиях распыления.

Изменение среднего размера капель ВУС после распыления с прямой подачей воздуха в трех областях струи также иллюстрирует влияние вязкости суспензии. На рис. 7 представлены кадры высокоскоростной съемки процессов распыления буровых

угольных суспензий пневматической форсункой с прямой подачей воздуха с указанием значений средних размеров капель суспензии в исследованных областях.

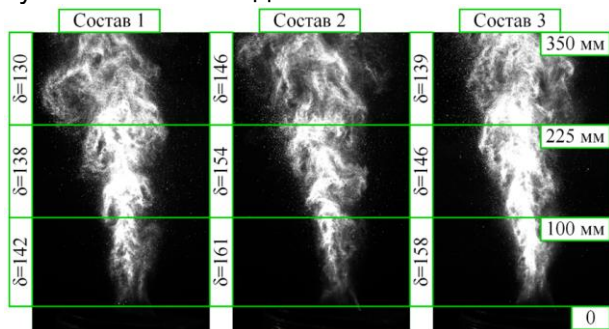


Рис. 7. Средний размер капель ВУС в струе с прямой подачей воздуха на форсунку ($P_A = 0,4$ МПа)

Экспериментально установлено, что при прямой подаче воздуха на форсунку средний размер капель двухкомпонентной ВУС в области регистрации струи на отрезке 226–350 мм от сопла форсунки снижается на 11 % по сравнению с отрезком 0–100 мм. После замещения в составе суспензии 10 % и 20 % угля и воды на аналогичное по массе количество ПЖ снижение среднего размера капель ВУС составляет по 10–11 %. В целом средние капли наибольшего размера, как и при тангенциальной подаче воздуха на форсунку, характерны для ВУС₁₀.

Определено, что средний размер капель во всей области исследования для ВУС₁₀ и ВУС₂₀ соответственно на 11 % и 7 % больше, чем для ВУС₀.

Анализ результатов позволяет оценить влияние третьей компоненты ВУС и тангенциальной подачи воздуха на форсунку на изменение среднего размера капель в трех исследованных областях. Установлено, что на малых расстояниях от сопла форсунки средний размер капель суспензий отличается:

1) в первой области исследования (0–100 мм):

- для ВУС₀ и ВУС₁₀ на 14 %;
- для ВУС₁₀ и ВУС₂₀ на 7 %;
- для ВУС₀ и ВУС₂₀ на 8 %;

2) во второй области исследования (101–225 мм):

- для ВУС₀ и ВУС₁₀ на 12 %;
- для ВУС₁₀ и ВУС₂₀ на 7 %;
- для ВУС₀ и ВУС₂₀ на 6 %;

3) в третьей области исследования (226–350 мм):

- для ВУС₀ и ВУС₁₀ на 11 %;
- для ВУС₁₀ и ВУС₂₀ на 6 %;
- для ВУС₀ и ВУС₂₀ на 6 %.

Также анализ результатов позволяет оценить влияние третьей компоненты ВУС и прямой подачи воздуха на форсунку на изменение среднего размера капель в трех исследованных областях. Установлено, что на малых расстояниях от сопла форсунки средний размер капель суспензий отличается:

1) в первой области исследования (0–100 мм):

- для ВУС₀ и ВУС₁₀ на 13 %;
- для ВУС₁₀ и ВУС₂₀ на 2 %;
- для ВУС₀ и ВУС₂₀ на 11 %;

2) во второй области исследования (101–225 мм):

- для ВУС₀ и ВУС₁₀ на 11 %;
- для ВУС₁₀ и ВУС₂₀ на 6 %;
- для ВУС₀ и ВУС₂₀ на 6 %;

3) в третьей области исследования (226–350 мм):

- для ВУС₀ и ВУС₁₀ на 11 %;
- для ВУС₁₀ и ВУС₂₀ на 5 %;
- для ВУС₀ и ВУС₂₀ на 7 %.

Анализ изменения угла раскрытия струи в зависимости от состава ВУС показал незначительные отличия. В целом значения угла раскрытия струи при тангенциальной подаче воздуха ($P_A = 0,4$ МПа) на форсунку составляет 24° , при прямой подаче 19° .

Результаты исследований среднего размера капель ВУС в струе при идентичных условиях их распыления ($P_A = 0,4$ МПа и $P_F = 0,04$ МПа) иллюстрируют влияние способа подачи распыляющего агента. При прямой подаче воздуха размер капель в струе в среднем на 8 % меньше, чем при тангенциальной подаче. При этом угол раскрытия струи при тангенциальной подаче больше. Это объясняется завихрением воздуха и возникновением его кругового движения. В результате чего на выходе из соплового канала форсунки траектории движения капель ВУС имеют отличие от траекторий при прямой подаче воздуха. При тангенциальной подаче воздуха на форсунку дальность струи снижается.

В целях установления соответствия средних размеров капель в струе при двух исследованных способах подачи воздуха на форсунку были проведены дополнительные эксперименты. В них мы подбира-

ли такие значения давления воздуха при его тангенциальной подаче и, соответственно, его расхода, при которых средний размер капель ВУС в струе соответствовал бы размерам капель при прямой подаче воздуха и давлении 0,4 МПа. Результаты этих экспериментов показали, что при давлении воздуха ~0,7 МПа средний размер капель в струе практически соответствует размерам капель при прямой подаче воздуха и давлении 0,4 МПа. При этом дальностью струи все равно остается меньше.

Анализ результатов проведенных исследований позволил оценить тангенциальный способ подачи воздуха на форсунку при распылении вязких ВУС на основе бурых углей. Угол раскрытия струи при таком способе распыления суспензий больше, чем при прямой подаче. На практике в условиях реального горения ВУС это позволит сформировать факел больших размеров в диаметре и меньших в длине. При проектировании камер сгорания от способа подачи распыляющего агента на форсунку будут зависеть геометрические характеристики камеры сгорания и котла в целом. Увеличение давления воздуха, подаваемого на форсунку, при его тангенциальной подаче позволяет обеспечить мелкодисперсную газокпельную струю. При этом количество капель ВУС в струе будет меньше по сравнению с прямой подачей воздуха. На практике это позволит обеспечить более полное сгорание суспензии за счет большего количества окислителя, приходящегося на конкретную каплю ВУС. Таким образом, можно сделать вывод об эффективности завихрения воздуха за счет его тангенциальной подачи на пневматическую форсунку при распылении вязких водоугольных суспензий.

Выводы. Представленные результаты экспериментальных исследований характеристик распыления водоугольных суспензий на основе бурого угля и пирогенетической жидкости пневматической форсункой с тангенциальной подачей распыляющего агента свидетельствуют об эффективности такого способа подачи. Апробированная трехэтапная методика приготовления буроугольных суспензий с добавлением пирогенетической жидкости позволила установить, что текучесть водоугольного топлива при использовании такой методики сохраняется даже при введении

20 % по массе пирогенетической жидкости в состав водоугольных суспензий; по мере роста концентрации пирогенетической жидкости в составе суспензии значение кинематической вязкости изменяется на 51 % и 45 % при 10 % и 20 % пирогенетической жидкости соответственно; влияние пирогенетической жидкости на плотность суспензий незначительно (изменения составляют не более 3 %).

Список литературы

1. **Сжиженный** природный газ как резервное топливо ТЭЦ / С.Н. Ленёв, В.Б. Перов, А.Н. Вивчар и др. // Надежность и безопасность энергетики. – 2021. – Т. 14, № 2. – С. 84–91.
2. **Mohanty M., Biswal D.R., Mohapatra S.S.** A systematic review exploring the utilization of coal mining and processing wastes as secondary aggregate in sub-base and base layers of pavement // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 368. – P. 130408.
3. **Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Kuznetsov G.V.** Ignition of coal-water fuel droplets with addition of isopropyl alcohol // International Journal of Energy Research. – 2020. – Vol. 45, issue 2. – P. 1535–1549.
4. **Экспериментальные** исследования влияния кавитационной обработки водоугольных топлив в составе с пирогенетической жидкостью на их свойства / Д.В. Гвоздяков, А.В. Зенков, Л.И. Мальцев, Ю.С. Поджаров // Энергетические установки и технологии. – 2023. – Т. 9, № 3. – С. 73–78.
5. **Oleinikova M.I.** Obtaining coal-water heating from coal-enrichment sludge // Environmental protection and conservation. – 2020. – No. 1. – P. 132–144.
6. **Singh J., Kumar S., Mohapatra S.K.** Optimization of Erosion Wear Influencing Parameters of HVOF Sprayed Pumping Material for Coal-Water Slurry // Materials Today: Proceedings. – 2018. – Vol. 5, Issue 11, Part 3. – P. 23789–23795.
7. **Influence** of burner geometry on atomization of coal water slurry in an entrained-flow gasifier / Xiaoxiang Wu, Qinghua Guo, Yan Gong, et al. // Chemical Engineering Science. – 2022. – Vol. 247. – P. 117088.
8. **Performance** and wear characteristics of ceramic, cemented carbide, and metal nozzles used in coal–water–slurry boilers / Jianxin Deng, Zeliang Ding, Houming Zhou, Yuanqiang Tan // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – September 2009. – Vol. 27, Issue 5. – P. 919–926.
9. **Atomization** behavior of composite liquid fuels based on typical coal processing wastes / G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, T.R. Valiullin, R.S. Volkov // Fuel Processing Technology. – January 2022. – Vol. 225. – P. 107037.

10. **Atomization** performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer / Stephane G. Daviault, Omar B. Ramadan, Edgar A. Matida, et al. // *Fuel*. – August 2012. – Vol. 98. – P. 183–193.

11. **Influence** of burner geometry on atomization of coal water slurry in an entrained-flow gasifier / Xiaoxiang Wu, Qinghua Guo, Yan Gong, et al. // *Chemical Engineering Science*. – 16 January 2022. – Vol. 247. – P. 117088.

12. **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*. – March 2019. – Vol. 98. – P. 40–48.

13. **Lu P., Zhang M.** Experimental investigation on atomizing characteristics of coal–water paste for pressurized fluidized bed // *Fuel*. – November 2004. – Vol. 83, Issue 16. – P. 2109–2114.

14. **Spraying** characteristics of alcohol-coal-water slurries with low coal content / D.V. Gvozdyakov, A.V. Zenkov, S.V. Lavrinenko, et al. // *Chemical Engineering & Technology*. – 2022. – Vol. 45, issue 5. – P. 936–945.

15. **Experimental** and numerical investigation of aerodynamics of a pneumatic nozzle for suspension fuel / S.V. Alekseenko, I.S. Anufriev, A.A. Dekterev, et al. // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2019. – Vol. 77. – P. 288–298.

16. **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.

17. **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.

18. **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.

19. **Van de Hulst H.C.** *Light Scattering by Small Particles*. – New York: Dover Publications, 1981. – 470 p.

20. **Hybrid** spherical particle field measurement based on interference technology / J. Sun, H. Zhang, J. Li, et al. // *Measurement Science and Technology*. – 2017. – Vol. 28(3). – P. 1–7.

21. **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. – P. 283–298.

22. **Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V.** Properties and characteristics of coal-water slurries with addition of a pyrogenetic liquid // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2023. – Vol. 59, No. 3–4. – P. 207–212.

References

1. Lenev, S.N., Perov, V.B., Vivchar, A.N., Okhlopkov, A.V., Sigitov, O.Yu., Bitney, V.D. Szhizhennyi prirodnyy gaz kak rezervnoe toplivo TETs [Liquefied natural gas as a backup fuel of CHP]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*, 2021, vol. 14, no. 2, pp. 84–91.

2. Mohanty, M., Biswal, D.R., Mohapatra, S.S. A systematic review exploring the utilization of coal mining and processing wastes as secondary aggregate in sub-base and base layers of pavement. *Construction and Building Materials*, 2023, vol. 368, p. 130408.

3. Gvozdyakov, D.V., Zenkov, A.V., Kuznetsov, G.V. Ignition of coal-water fuel droplets with addition of isopropyl alcohol. *International Journal of Energy Research*, 2020, vol. 45, issue 2, pp. 1535–1549.

4. Gvozdyakov, D.V., Zenkov, A.V., Maltsev, L.I., Pozharov, Yu.S. Eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya kavitatsionnoy obrabotki vodougol'nykh topliv v sostave s pirogeneticheskoy zhidkost'yu na ikh svoystva [Experimental studies of the effect of cavitation treatment of coal-water fuels in composition with pyrogenetic liquid on their properties]. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*, 2023, vol. 9, no. 3, pp. 73–78.

5. Oleinikova, M.I. Obtaining coal-water heating from coal-enrichment sludge. *Environmental protection and conservation*, 2020, no. 1, pp. 132–144.

6. Singh, J., Kumar, S., Mohapatra, S.K. Optimization of Erosion Wear Influencing Parameters of HVOF Sprayed Pumping Material for Coal-Water Slurry. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, issue 11, part 3, pp. 23789–23795.

7. Wu, X., Guo, Q., Gong, Y., Liu, J., Luo, X., Wu, T., Yu, G. Influence of burner geometry on atomization of coal water slurry in an entrained-flow gasifier. *Chemical Engineering Science*, 2022, vol. 247, p. 117088.

8. Deng, J., Ding, Z., Zhou, H., Tan, Y. Performance and wear characteristics of ceramic, cemented carbide, and metal nozzles used in coal-water-slurry boilers. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, September 2009, vol. 27, issue 5, pp. 919–926.

9. Kuznetsov, G.V., Strizhak, P.A., Valiullin, T.R., Volkov, R.S. Atomization behavior of composite liquid fuels based on typical coal processing wastes. *Fuel Processing Technology*, January 2022, vol. 225, p. 107037.

10. 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*, August 2012, vol. 98, pp. 183–193.

11. Wu, X., Guo, Q., Gong, Y., Liu, J., Luo, X., Wu, T., Yu, G. Influence of burner geometry on atomization of coal water slurry in an entrained-flow gasifier. *Chemical Engineering Science*, January 2022, vol. 247, p. 117088.

12. 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*, March 2019, vol. 98, pp. 40–48.
13. Lu, P., Zhang, M. Experimental investigation on atomizing characteristics of coal–water paste for pressurized fluidized bed. *Fuel*, November 2004, vol. 83, issue 16, pp. 2109–2114.
14. Gvozdyakov, D.V., Zenkov, A.V., Lavrinenko, S.V., Marysheva, Ya.V., Larionov, K.B. Spraying characteristics of alcohol-coal-water slurries with low coal content. *Chemical Engineering & Technology*, 2022, vol. 45, issue 5, pp. 936–945.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Van de Hulst, H.C. Light Scattering by Small Particles. New York: Dover Publications, 1981. 470 p.
20. 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.
21. 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, pp. 283–298.
22. Gvozdyakov, D.V., Zenkov, A.V. Properties and characteristics of coal-water slurries with addition of a pyrogenetic liquid. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2023, vol. 59, no. 3–4, pp. 207–212.