



КВАЗИГОРЯЧЕЕ РАСПЫЛЕНИЕ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ С ДОБАВКАМИ ПИРОГЕНЕТИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ

Гвоздяков^{1,2,3} Д.В., Зенков^{1,3} А.В., Лавриненко¹ С.В., Матвеева¹ А.А.

¹Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

²Кузбасский государственный технический университет, г. Кемерово, Россия

³НИТУ МИСиС, г. Москва, Россия

dim2003@trn.ru

Резюме: Актуальность работы обусловлена отсутствием в литературе результатов исследований влияния нагрева многокомпонентных водоугольных суспензий на реологические свойства и характеристики распыления. **ЦЕЛЬ.** Обоснование эффективности термической подготовки водоугольных суспензий на основе пирогенетической жидкости по результатам экспериментальных исследований. **МЕТОДЫ.** При решении поставленной задачи применялись ротационный вискозиметр Brookfield RVDV-II+Pro, ареометры общего назначения, метод Interferometric Particle Imaging. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Установлено, что при замещении воды в составе водоугольного топлива аналогичным по массе (не более 25%) количеством пирогенетической жидкости значение плотности суспензии увеличится на 14% при температуре 293 К. Предварительный нагрев водоугольных суспензий до 363 К позволяет снизить рост значения плотности до 7%. Результаты экспериментов показали, что наибольшее влияние термической подготовки исследованных суспензий на их динамическую вязкость характерно для диапазона температур от 293 до 333 К. При таких значениях температур снижение вязкости суспензии возможно на 17-20%. Предварительный нагрев суспензий перед распылением в диапазоне изменения температур от 293 до 333 К позволяет увеличить угол раскрытия струи на 21-29% в сравнении с двухкомпонентным водоугольным топливом при температуре 293 К. Замещение более 25% по массе воды пирогенетической жидкостью в составе водоугольного топлива нецелесообразно для исследовавшейся марки угля с точки зрения значительного увеличения вязкости. Предварительный нагрев водоугольного топлива перед распылением позволяет снизить значение среднего размера капель на 5-9%. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Обоснована эффективность термической подготовки водоугольных суспензий на основе пирогенетической жидкости по результатам экспериментальных исследований реологических свойств и характеристик распыления.

Ключевые слова: бурый уголь; пирогенетическая жидкость; водоугольное топливо; термическая подготовка; вязкость; распыление.

Для цитирования: Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Лавриненко С.В., Матвеева А.А. Квазигорячее распыление водоугольных суспензий с добавками пирогенетической жидкости // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 3. С. 28-41. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-28-41.

Благодарности: эксперименты по определению реологических свойств водоугольных топлив проводились при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект №075-00268-20-02 (ID: 0718-2020-0040)), исследования характеристик распыления водоугольных топлив выполнены при финансовой поддержке в соответствии с дополнительным контрактом № 075-03-2021-138/3 о субсидии из федерального бюджета Российской Федерации на финансовую поддержку реализации государственного задания для государственных услуг (внутренний номер 075-GZ/X4141/687/3).

QUASI-HOT SPRAYING OF COAL-WATER SLURRIES WITH PYROGENETIC WATER ADDITIVES

DV. Gvozdyakov^{1,2,3}, AV. Zenkov^{1,3}, SV. Lavrinenko¹, AA. Matveeva¹

¹Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

² Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

³ National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

dim2003@tpu.ru

Abstract: The relevance of the work is explained by the absence of the results of the heating effect of multicomponent coal-water slurries on rheological properties and characteristics of spraying in the literature. **PURPOSE.** Efficiency substantiation of thermal preparation of coal-water slurries based on pyrogenetic liquid by the results of experimental studies. **METHODS.** When solving this problem, the Brookfield RVDV-II+Pro rotary viscometer, general-purpose hydrometers, and the Interferometric Particle Imaging method were used. **RESULTS.** It was found that when water in coal-water fuel is replaced by a similar amount of pyrogenetic liquid (no more than 25%), the density of the slurry increases by 14% at a temperature of 293 K. Preheating of coal-water slurries to 363 K reduces the increase in the density value to 7%. The experimental results showed that the greatest influence of the thermal preparation of the studied slurries on their dynamic viscosity is characteristic of the temperature range from 293 to 333 K. At such temperatures, a decrease in the viscosity of the fuel is possible by 17-20%. Preheating of slurries before spraying in the temperature range from 293 to 333 K makes it possible to increase jet spraying angle by 21-29% in comparison with two-component coal-water fuel at a temperature of 293 K. Substitution of more than 25% by weight of water with pyrogenetic liquid in coal-water fuel is impractical for the studied grade of coal from the point of view of a significant increase in viscosity. Preheating coal-water fuel before spraying reduces the average droplet size by 5-9%. **CONCLUSION.** The efficiency of thermal preparation of coal-water slurries based on pyrogenetic liquid by the results of experimental studies of rheological properties and spraying characteristics was substantiated.

Keywords: lignite; pyrogenetic liquid; coal-water fuel; thermal preparation; viscosity; spraying.

For citation: Gvozdyakov DV, Zenkov AV, Lavrinenko SV, Matveeva AA. Quasi-hot spraying of coal-water slurries with pyrogenetic water additives. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(3):28-41. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-28-41.

Acknowledgments: experiments to determine the rheological properties of coal-water fuels were performed with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 075-00268-20-02 (ID: 0718-2020-0040)), studies of the characteristics of coal-water fuels spraying were carried out with financial support in accordance with the supplementary contract No. 075-03-2021-138/3 on subsidy from the federal budget of the Russian Federation for financial support of the implementation of the state task for public services (internal number 075-GZ/X4141/687/3).

Введение

Водоугольные суспензии (ВУС) являются перспективными топливами для промышленной энергетики [1, 2]. С точки зрения экономики, в качестве компонентов ВУС можно использовать, например, отходы угольнообогатительных фабрик [3]. Авторы Shukla S.C., Kukade S., Mandal S.K. и др. [4] добавляли отработанные нефтепродукты в состав суспензионного топлива. В работе авторов Zhao Z., Wang R., Ge L. и др. [5] описывается способ утилизации сточных вод в составе ВУС. Жидкие отходы химических производств также могут быть утилизированы путем сжигания в составе жидких композиционных топлив [6]. Широкий спектр компонентов ВУС позволяет снизить ее стоимость и стоимость производимой энергии в сравнении с традиционными топливами – уголь, газ, мазут. Несмотря на то, что теплотворная способность ВУС в среднем в два раза ниже, чем у угля, введение в состав суспензии отработанных нефтепродуктов или отходов химических производств позволяет существенно увеличить калорийность топлива [7]. Еще одним преимуществом водоугольных топлив (ВУТ) являются низкие, в сравнении с углем, объемы эмиссии в атмосферу продуктов сгорания [8], наносящих вред окружающей среде. Такие положительные качества новых перспективных топлив промышленной энергетики являются основанием для их всестороннего изучения. В работе авторов Chen R., Wilson M., Leong Y.K. и др. [9] исследовались водоугольные суспензии на основе разных типов угля с точки зрения реологических свойств, а именно вязкости и предела текучести. В работе Барановой М.П. [10] оценивалось влияние пластифицирующих добавок на реологические характеристики водоугольных суспензий из углей разной степени метаморфизма. Авторы Мингалеева Г.Р., Гайнетдинов А.В., Шакиров Р.Р., Ахметов Э.А. [11] проводили сравнительный анализ способов снижения вязкости водоугольных топлив. В указанных выше работах установлено, что при использовании низкосортных углей

невозможно добиться высокого содержания твердой фазы в суспензии без дополнительной обработки, например, термической.

Известны исследования зажигания капель ВУС [12], которые показали, что введение в состав топлива дополнительных компонентов, например, отходов нефтепереработки, значительно снижает время задержки зажигания.

Существуют работы по изучению концентрации вредных выбросов в атмосферу после сжигания суспензионных топлив [13, 14]. Установлено, что замещение части угля водой, введение пара, добавление биомассы, регулировка температуры горения приводят к снижению выбросов антропогенных газов (CO_2 , SO_2 , NO).

В работе авторов Ma X., Duan Y., Liu M. [15] изучалось качество распыления суспензионного топлива в зависимости от давления воздуха, отношения расхода воздуха к расходу топлива, диаметра устья форсунки. Установлено, что увеличение давления воздуха приводит к улучшению качества распыления. При этом геометрические параметры форсунки также играют важную роль при распылении суспензионных топлив. Это также подтверждается исследователями [16].

Проведенные нами ранее исследования [17, 18] показали, что добавление в состав ВУТ жидких горючих компонентов, таких как отработанные нефтепродукты или спирты, приводит к значительному изменению характеристик распыления.

Как отмечалось выше, в качестве компонентов ВУС используется достаточно широкий спектр материалов. Однако, современными исследователями не изучается влияние пирогенетической жидкости (ПЖ) на свойства и характеристики ВУТ. Это вещество является отходом пиролизных процессов, в частности, при производстве древесного угля [19, 20]. Последний достаточно широко используется в качестве топлива для котлов малой и средней мощности. Древесный уголь, как правило, изготавливают из прессованных опилок или щепы. Образующаяся в процессе пиролиза древесины, ПЖ содержит в себе различные соединения фенолов и кислот, поэтому ее прямая утилизация в систему канализации запрещена. При этом жидкость обладает калорийностью примерно 1-4 МДж/кг в зависимости от технологических условий процесса пиролиза. Одним из вариантов ее утилизации является сжигание путем подмешивания к жидким топливам, например, мазуту или ВУТ.

Однако, предложенный авторами статьи компонент ВУС – ПЖ – обладает значением вязкости в 2-2,5 раза больше, чем у обычной воды. Соответственно, замещая часть обычной воды на ПЖ, вязкость новой суспензии увеличится. В результате чего ухудшатся характеристики распыления ВУТ и, соответственно, зажигания их капель в камерах сгорания. На практике, чтобы снизить вязкость и улучшить характеристики распыления котельного топлива, например, мазута, осуществляют его нагрев до 353-393 К. Это позволяет получить мелкодисперсную струю и сократить затраты на его перекачивание по топливному тракту.

Научная значимость работы заключается в том, что результаты экспериментальных исследований влияния подогрева ВУС, содержащих ПЖ, перед распылением позволяют оценить эффективность такой подготовки топлива на свойства и характеристики диспергирования в сравнении с двухкомпонентным водоугольным топливом. Также, это даст возможность установить диапазоны изменения температур нагрева ВУС, при которых реологические свойства и характеристики распыления топлив уже не зависят от температуры.

Практическая значимость состоит в том, что в реальных условиях полученные данные позволят осуществлять эффективную термическую подготовку ВУС перед сжиганием и рационально использовать энергию собственных нужд станции.

Проведение экспериментальных исследований влияния термической подготовки ВУС на реологические свойства и характеристики ее распыления необходимо с точки зрения развития технологий ВУС и расширения научной информационной базы. Полученные результаты будут полезны при проектировании новых или модернизации действующих котельных агрегатов.

Таким образом, целью работы является обоснование эффективности термической подготовки водоугольных суспензий на основе пирогенетической жидкости по результатам экспериментальных исследований влияния нагрева на реологические свойства и характеристики распыления таких топлив.

Материалы и методы

Компоненты исследовавшихся водоугольных топлив:

бурый уголь (марки 2Б Канско-Ачинского угольного бассейна) – зольность 8,0%, влажность 9,0%, выход летучих 42,5%, количество углерода 72,1% daf, количество водорода 5,8% daf, общая доля кислорода, азота и серы 22,1% daf;

пирогенетическая жидкость – плотность 1044,0 кг/м³, динамическая вязкость 2,24 мПа·с, кинематическая вязкость 2,12 мм²/с, рН 2,31;

водопроводная вода - плотность 997,0 кг/м³, динамическая вязкость 0,98 мПа·с, рН 6,8.

Подготовка бурого угля состояла из нескольких стадий: дробление крупнокускового угля в щековой дробилке до фракции характерным размером не более 30-40 мм; тонкий помол в дезинтеграторе до фракции характерным размером не более 2 мм; просеивание через вибрационные сита до размера фракции не более 200 мкм.

Пирогенетическая жидкость получена в процессе пиролиза древесных отходов (стружка, щепа, ветки).

Водопроводная вода бралась из системы водоснабжения.

Процесс приготовления ВУС: измельченный уголь, пирогенетическая вода и водопроводная вода в соответствии с компонентным составом (таблица 1) помещались в барабан, изготовленный из керамики, общим объемом 3 л с предварительно загруженными мелющими телами (керамические шары диаметром 30 мм). Массовое соотношение шаров с углем составляло 1:1. Далее в течение одного часа осуществлялось перемешивание суспензии до гомогенного состояния.

Таблица 1

Водоугольные суспензии

Состав, №	Бурый уголь (БУ)	Водопроводная вода (В)	Пирогенетическая жидкость (ПЖ)	Обозначение
1	50	50	0	Образец 1
2		45	5	Образец 2
3		40	10	Образец 3
4		35	15	Образец 4
5		30	20	Образец 5
6		25	25	Образец 6

Экспериментальные значения динамической вязкости определены при помощи ротационного вискозиметра Brookfield RVDV-II+Pro. Жидкость объемом 500 мл наливалось в стеклянный цилиндрический сосуд диаметром 0,1 м, после чего шпindel вискозиметра погружался в исследуемую среду.

Экспериментальное определение значений плотности осуществлялось при помощи ареометров общего назначения.

Погрешность измерений вязкости и плотности ВУС с учетом величины погрешности средств измерения и числа экспериментов (не менее 5):

- для вязкости – не более ±3,5%;
- для плотности – не более ±3,0%.

Экспериментальные исследования характеристик распыления ВУТ выполнены на специализированном стенде (рис. 1). Установка предназначена для изучения характеристик струи жидких и сухих топлив после распыления, исследования форсунок энергетических установок.

Эксперименты по распылению ВУС проведены при давлении топлива (P_m) 0,3 МПа и воздуха (P_a) 0,28 МПа. Давление последнего задавалось на 0,02 МПа меньше, чем ВУТ, чтобы исключить обратное течение жидкости по топливному трубопроводу. При проведении экспериментов использовалась форсунка с внутренним смешением топлива и распыляющего агента. Такие форсунки хорошо зарекомендовали себя при распылении вязких суспензий [21]. Выбранные значения давлений характерны для полномасштабных энергетических установок, работающих на жидком топливе [22]. Продолжительность каждого эксперимента составила от 100 до 120 с.

Принципиальная схема распыления горячей ВУС представлена на рисунке 2. Нагрев воздуха для подачи на насос и форсунку осуществлялся при помощи поверхностного теплообменника (ПТО) трубчатого типа. ПТО представляет собой емкость объемом 10 л и змеевик, изготовленный из меди. Наружный диаметр теплообменной трубы – 10 мм. Толщина стенки трубки – 1 мм. Площадь поверхности теплообмена составила 0,2 м². В качестве греющей среды использовалась кипящая вода. Холодный воздух под давлением подавался из компрессора на ПТО, после чего нагретый до необходимой температуры воздух направлялся на коллектор и распределялся на два потока: на насос и на форсунку. ВУС подогревалась на индукционной печи до необходимой температуры. Все трубопроводы и насос покрыты теплоизоляционным материалом на основе полиэтилена толщиной 10 мм. Перед проведением экспериментов вся система «насос-трубопроводы-форсунка» прогревалась с целью исключить теплопотери при распылении ВУС. Перед распылением непосредственно ВУС,

исследованные составы нагревались на 5 К выше значения требуемой температуры. Это необходимо для того, чтобы, несмотря на теплоизоляцию всего тракта топливоподачи, непосредственно в сопловом канале форсунки температура суспензии была не меньше требуемого значения.

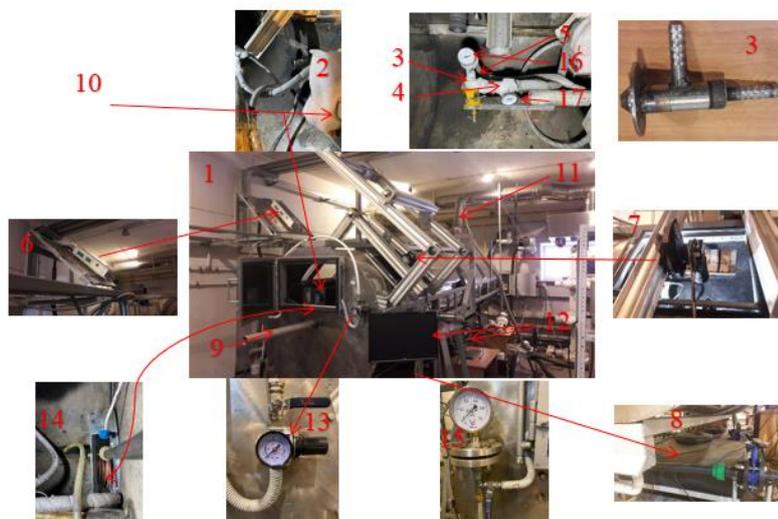


Рис. 1. Исследовательский стенд: 1 – внешний вид; 2 – насос для подачи ВУТ; 3 – форсунка; 4 – линия подачи ВУТ; 5 – линия подачи распыляющего агента; 6 – лазер (Beamtech Vlite-200); 7 – кросскорреляционная камера (ImperX Bobcat B2020); 8 – емкость временного хранения отработанного ВУТ; 9 – направляющая крепления форсунки; 10 – емкость для ВУТ; 11 – вытяжная вентиляция; 12 – компьютер и дублирующий монитор; 13 – регулятор давления воздуха; 14 – поверхностный теплообменник; 15 – манометр; 16 – термометр для измерения температуры воздуха; 17 – термометр для измерения температуры ВУТ.

Fig. 1. Research setup 1 – appearance; 2 – CWF feed pump; 3 – nozzle; 4 – CWF feed line; 5 – air feed line; 6 – laser (Beamtech Vlite-200); 7 – cross-correlation camera (ImperX Bobcat B2020); 8 – temporary storage of waste CWF; 9 – nozzle holder; 10 – CWF tank; 11 – exhaust ventilation; 12 – computer and backup monitor; 13 – air pressure regulator; 14 – surface heat exchanger; 15 – pressure gauge; 16 – thermometer for measuring air temperature; 17 – thermometer for measuring CWF temperature.

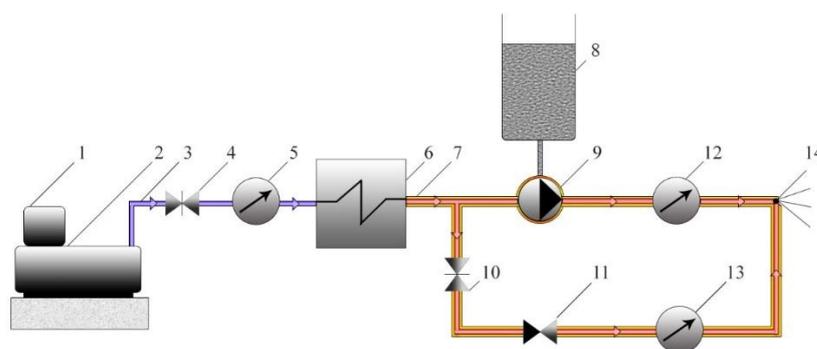


Рис. 2. Принципиальная схема 1 – воздушный компрессор; 2 – ресивер-накопитель воздуха; 3 – трубопровод холодного воздуха; 4 – регулятор давления воздуха; 5 – манометр; 6 – теплообменник; 7 – трубопровод горячего воздуха; 8 – бак запаса ВУС; 9 – пневматический насос; 10 – регулятор расхода горячего воздуха; 11 – обратный клапан (необходим для того, чтобы исключить течение жидкости в систему регулирования распределения воздуха мембранного насоса); 12 – термометр для контроля температуры ВУС; 13 – термометр для контроля температуры воздуха; 14 – форсунка.

Fig. 2. Schematic diagram: 1 – air compressor; 2 – air storage receiver; 3 – cold air pipeline; 4 – air pressure regulator; 5 – pressure gauge; 6 – heat exchanger; 7 – hot air pipeline; 8 – CWS tank; 9 – air pump; 10 – hot air flow regulator; 11 – reverse-flow valve (necessary in order to exclude the flow of liquid into the air distribution control system of the diaphragm pump); 12 – thermometer for CWS temperature control; 13 – thermometer for air temperature control; 14 – nozzle.

Нагрев суспензий и воздуха осуществлялся в диапазоне изменения температур от 293 К до 363 К с шагом 10 К. Температура нагретого воздуха и топлива измерялась непосредственно перед форсункой.

Размер каплей определялся при помощи метода *IPI (Interferometric Particle Imaging)* [23-25]. Метод применяется для измерения мгновенных пространственных распределений размеров (от 10 до 1000 мкм) каплей в потоке. Основан на восстановлении размеров каплей по частоте интерференционной картины от точечных источников света, возникающих на сферических каплях жидкости при освещении их мощным лазерным импульсом (лазерный нож). Значения диаметров каплей вычислялись в программе *ActualFlow* [23-25].

Значение угла раскрытия струи определялось стандартным методом [26]. При обработке изображений струи (не менее 20 фотографий для каждого состава) аппроксимировались ее края, после чего проводились две ортогональные линии к продольной оси сопла. Суммируя значения двух половин угла (θ_1 и θ_2) получали угол раскрытия струи θ . Таким образом, угол определяли по 20 снимкам для каждого состава и находили среднее значение. Полученное число принимали за угол раскрытия струи $\bar{\theta}$.

Результаты и обсуждение

Реологические свойства жидкостей оказывают существенное влияние на характеристики распыления. От изменения плотности или вязкости, как правило, зависит размер каплей после распыления, их количество, дальность струи и т.д. Например, авторами [27] установлено, что эффективное распыление суспензий возможно при значениях вязкости не более 1,2 Па·с при скорости сдвига шпинделя вискозиметра 100 с^{-1} . Также известно, что жидкости с низкими значениями вязкости лучше подвержены диспергированию в среде воздуха (или окислителя в условиях высоких температур). Плотность распыляемой жидкости также оказывает влияние на характеристики распыления [28].

На рисунке 3 показаны зависимости изменения плотности ВУС от количества ПЖ и температуры. Установлено, что при замещении воды в составе ВУС аналогичным по массе (25%) количеством ПЖ значение плотности суспензии увеличится на 14% при температуре жидкости 293 К. Нагрев такой ВУС до 373 К позволяет снизить рост значения плотности до 7%. Относительно небольшие по массе добавки ПЖ в состав ВУТ способствуют небольшому росту плотности суспензии в сравнении с двухкомпонентным водоугольным топливом – не более 6%.

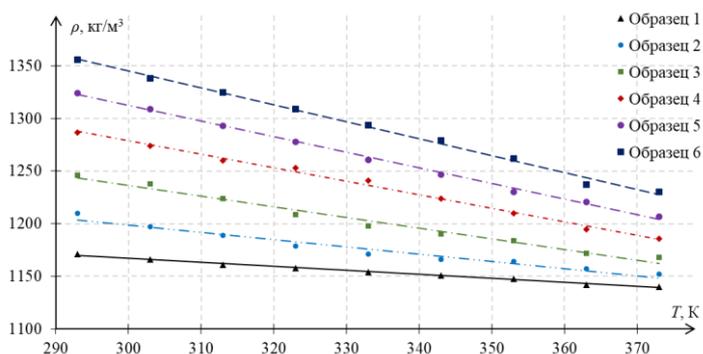


Рис. 3. Изменение плотности ВУС при нагрев

Fig. 3. Change in the density of CWS due to heating

Анализ результатов исследований влияния термической подготовки ВУС в составе с ПЖ показал достаточно типичные для суспензий и эмульсий изменения их плотности. Даже незначительные (от 3 до 14%) изменения плотности суспензии окажут влияние на характер разрушения каплей при распылении [29, 30]. В первую очередь на стадию первичного дробления. Таким образом, предварительный нагрев ВУС в составе с ПЖ окажет положительный эффект на процесс диспергирования суспензии.

Результаты экспериментальных исследований, представленные на рисунке 4, показывают снижение вязкости ВУС в составе с ПЖ при их нагреве. Качественно, полученные результаты достаточно хорошо согласуются с известными данными, например [31]. На рисунках 4a-4e серым цветом выделены области, соответствующие изменениям значений динамической вязкости ВУС при температурах от 293 до 363 К. С целью установления наиболее приемлемых для распыления суспензий на графиках также представлены зависимости изменения динамической вязкости ВУС при скорости сдвига шпинделя вискозиметра 100 с^{-1} от температуры (зависимости, обозначенные зеленым цветом). По результатам экспериментов установлено, что существенные изменения вязкости суспензий характерны при их нагреве до 333 К. При более высоких температурах (от 333 до 363 К) динамическая вязкость ВУС изменяется незначительно. Такое изменение

вязкости достаточно характерно для суспензионных и эмульсионных жидкостей и различных скоростей сдвига шпинделя вискозиметра.

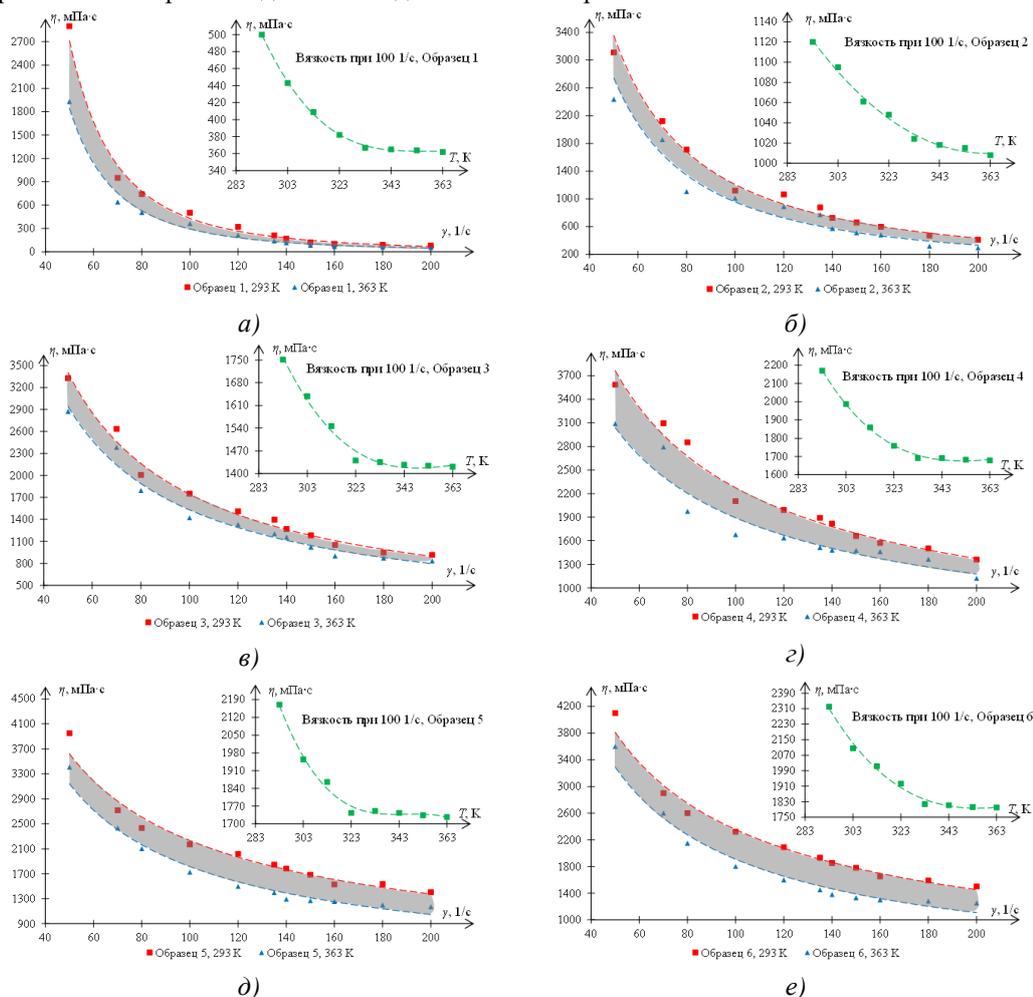


Рис. 4. Изменение динамической вязкости ВУС при нагреве.

Fig. 4. Change in the dynamic viscosity of CWS due to heating.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что наибольшее влияние термической подготовки исследовавшихся суспензий на изменение их динамической вязкости характерно для диапазона температур от 293 до 333 К. При таких значениях температур снижение вязкости суспензии возможно на 17-20% в сравнении с двухкомпонентным водоугольным топливом. Незначительное (не более 6%) снижение вязкости характерно при нагреве ВУС выше 333 К. Такое изменение можно объяснить тем, что ВУС – это многокомпонентная жидкость. Причем один из ее компонентов является твердым веществом. В свою очередь ПЖ является существенно неоднородной жидкостью, так как в ее составе присутствуют масляные агломераты. В таком случае, термическая подготовка ВУС в диапазоне температур от 293 до 333 К перед распылением является достаточно эффективной. Такой подход окажет положительное влияние на характеристики распыления ВУС (средний размер капель, угол раскрытия струи).

С учетом результатов исследований влияния термической подготовки ВУС на ее реологические свойства, эксперименты по изучению угла раскрытия струи и среднего размера капель выполнены в диапазоне изменения температуры топлива от 293 до 333 К. Представленные на рисунке 5 снимки иллюстрируют характер изменения угла раскрытия струи, который является важным параметром при распылении жидких материалов. Его величина определяет границы зоны воспламенения топлива, эффективность процесса его горения и, как следствие, полноту сгорания после распыления.

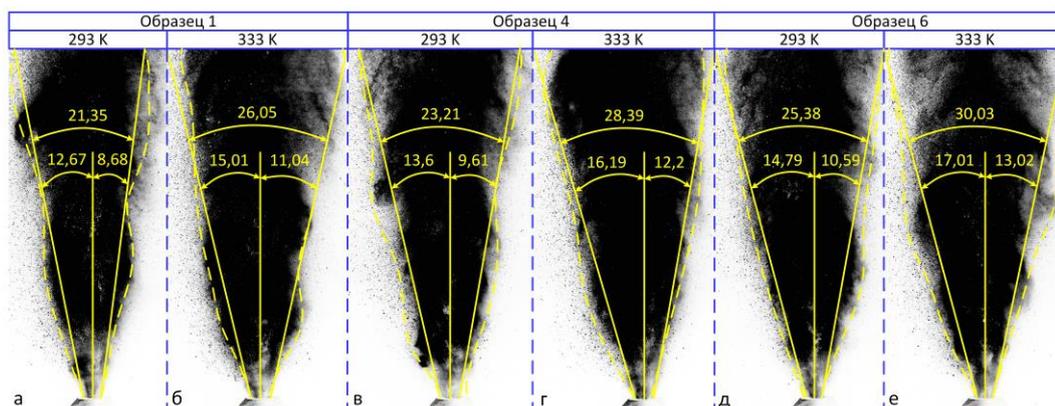


Рис. 5. Угол раскрытия струи

Fig. 5. Jet spraying angle

Анализируя результаты экспериментов, установлено положительное влияние термической подготовки ВУС на угол раскрытия струи. Несмотря на наличие и рост концентрации ПЖ в составе суспензии, угол раскрытия увеличивается в сравнении с холодным распылением (при температуре топлива 293 К). Введение в состав ВУТ до 25% по массе ПЖ при температуре 293 К является причиной увеличения угла раскрытия струи на 16%. В целом, влияние количества ПЖ в составе топлива и нагрева суспензии до 333 К на изменение угла раскрытия в сравнении с Образцом 1 выглядит следующим образом:

- Для Образца 2 увеличение угла раскрытия струи составляет 21%;
- Для Образца 3 увеличение угла раскрытия струи составляет 22%;
- Для Образца 4 увеличение угла раскрытия струи составляет 25%;
- Для Образца 5 увеличение угла раскрытия струи составляет 27%;
- Для Образца 6 увеличение угла раскрытия струи составляет 29%.

Такое влияние термической подготовки ВУТ на угол раскрытия струи объясняется в первую очередь снижением вязкости топлива, в результате чего образуется больше капель малых размеров. Их траектории при распылении ориентированы более хаотично. Такое изменение угла раскрытия струи характерно для распыления горячих жидкостей [32]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что термическая подготовка (нагрев до 333 К) водоугольных суспензий в составе с ПЖ позволяет увеличить угол раскрытия струи на 21-29% в сравнении с обычным двухкомпонентным ВУТ при температуре 293 К.

На рисунке 6 представлена область регистрации капель ВУС с целью определения их среднего характерного размера. При проведении экспериментов область регистрации струи разделялась на три зоны. На изображениях хорошо различимы крупные (диаметром ~ 1 мм) капли (агломераты) ВУС в зоне 1. Наличие таких фрагментов близко к устью форсунки объясняется тем, что в данной области еще не все крупные капли топлива подверглись разрушению. Такое поведение отдельных капель характерно для водоугольных суспензий [33].

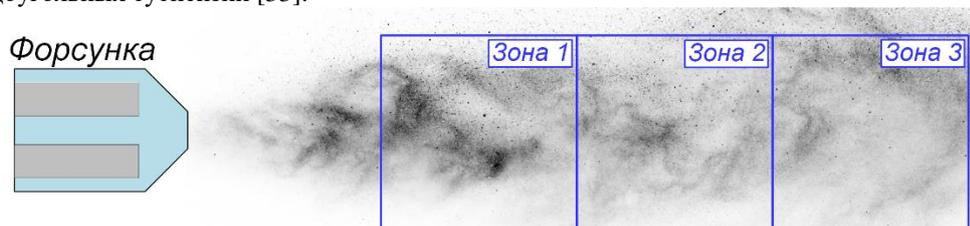


Рис. 6. Области струи для определения размера капель ВУС

Fig. 6. Areas of the jet for determining the size of the droplets in the air

Влияние ПЖ и температуры на изменение среднего размера капель ВУС в областях исследования представлено на рисунке 7 в виде гистограмм. Анализ результатов показал, что добавка ПЖ в состав ВУС и термическая подготовка суспензии приводят к заметному изменению среднего размера капель топлива в струе. Введение в состав ВУТ до 25% по массе ПЖ при температуре 293 К является причиной увеличения среднего размера капель топлива в струе в среднем на 8%. Это объясняется ростом вязкости ВУС. Экспериментальные исследования показали, что нагрев двухкомпонентного водоугольного топлива (Образец 1) до 333 К приводит к снижению среднего размера капель в трех характерных областях – Зона 1, Зона 2 и Зона 3 – на 5, 6 и 5%,

соответственно. Снижение среднего размера капель после распыления Образца 4 в результате нагрева до 333 К составляет 9%, а Образца 6 – 8%.

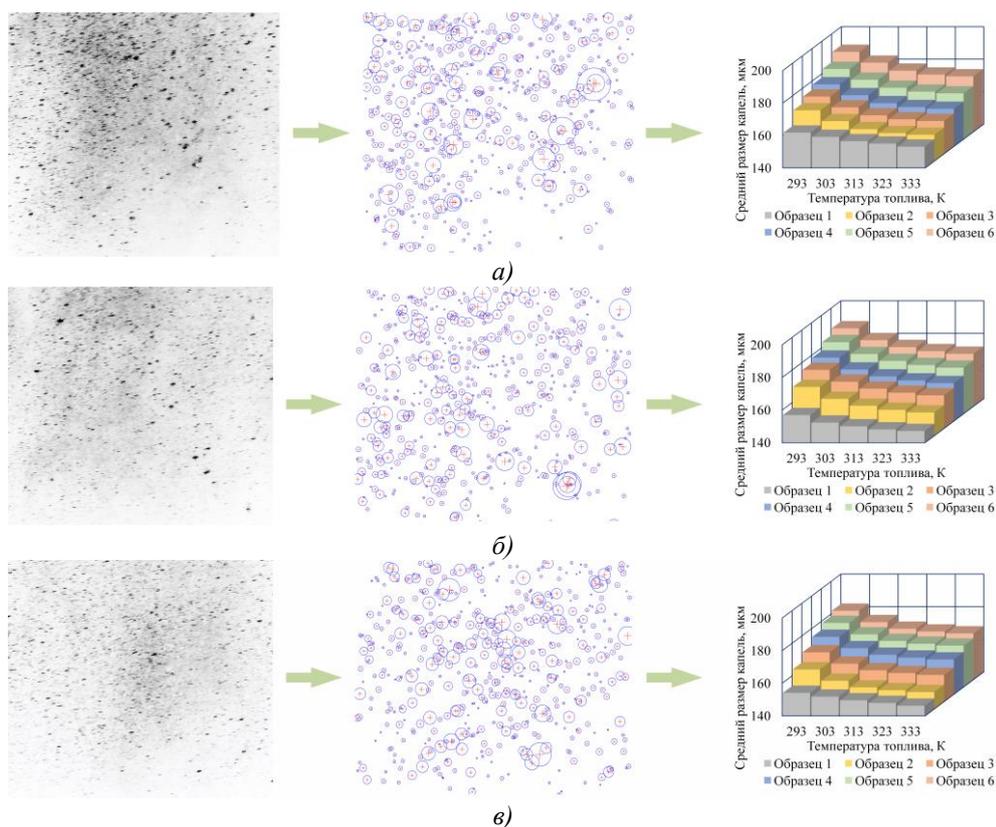


Рис. 7. Определение среднего размера капель ВУС в струе *Fig. 7. Determination of the average size of CWS droplets in the jet*

По результатам исследований влияния ПЖ в составе ВУТ и термической подготовки суспензии на изменение среднего размера капель топлива после распыления можно сделать несколько выводов. Во-первых, по результатам предварительных экспериментов установлено, что добавление более 25% по массе ПЖ в состав ВУТ нецелесообразно (с исследовавшейся маркой угля). Вязкость суспензии сильно увеличивается, что является существенным ограничением с точки зрения процесса распыления. Во-вторых, в исследованном диапазоне изменения концентрации ПЖ в составе ВУТ увеличение среднего размера капель топлива составляет около 8%. Предварительный нагрев ВУС перед распылением позволяет существенно снизить значение среднего размера капель суспензии. Изменения составляют 5-9% в сравнении с холодной (при 293 К) ВУС.

Анализ результатов немногочисленных исследований [34, 35] по распылению водоугольных топлив иллюстрирует достаточно широкий диапазон изменения анализируемых параметров. В первую очередь это связано с тем, что исследователи [34, 35] при проведении своих экспериментов используют форсунки различной конструкции. При этом значение параметров распыления также очень сильно отличается. Таким образом, сравнивать результаты (размер капель, угол раскрытия струи) настоящей работы с известными не совсем корректно.

В целом, по результатам проведенных экспериментальных исследований квазигорячего распыления водоугольных суспензий в составе с пирогенетической жидкостью можно сделать вывод об эффективности предварительной термической подготовки таких топлив перед их распылением. Значительно снижается негативное воздействие пирогенетической жидкости в составе водоугольных суспензий на их реологические свойства и характеристики распыления. Установленный наиболее эффективный температурный диапазон нагрева суспензии позволяет сделать вывод о том, что, реализуя данный способ на практике, можно существенно сократить тепловое загрязнение окружающей среды используя в качестве источника тепловой энергии тепло дымовых газов. При введении в состав водоугольного топлива ПЖ также решается вопрос ее утилизации. При этом наличие хоть и малой теплотворной способности

пирогенетической воды позволяет решить проблему низкой реакционной способности водоугольных топлив – сократить время задержки их зажигания.

Выводы

По результатам проведенных экспериментальных исследований реологических свойств и характеристик распыления водоугольных суспензий на основе пирогенетической жидкости дано обоснование эффективности термической подготовки таких топлив и сформулированы следующие выводы.

1) При замещении воды в составе ВУС аналогичным по массе (не более 25%) количеством ПЖ значение плотности суспензии увеличивается на 14% при температуре 293 К. Нагрев ВУС до 363 К позволяет снизить рост значения плотности до 7%.

2) Наибольшее влияние термической подготовки исследованных суспензий на ее динамическую вязкость характерно для диапазона температур от 293 до 333 К. При таких значениях температур снижение вязкости суспензии возможно на 17-20%.

3) Нагрев суспензий в диапазоне изменения температур от 293 до 333 К позволяет увеличить угол раскрытия струи на 21-29% в сравнении с обычным двухкомпонентным ВУТ при температуре 293 К.

5) Добавление более 25% по массе ПЖ в состав ВУТ нецелесообразно (с исследовавшейся маркой угля). Вязкость суспензии сильно увеличивается, что является существенным ограничением с точки зрения процесса распыления.

6) В исследованном диапазоне изменения концентрации ПЖ в составе ВУТ увеличение среднего размера капель топлива составляет около 8%. Предварительный нагрев ВУС перед распылением позволяет существенно снизить значение среднего размера капель суспензии. Изменения составляют 5-9% в сравнении с холодной (при 293 К) ВУС.

Литература

1. Садовский Д.Ю., Макаров А.С., Савицкий Д.П., и др. Получение композиционного водоугольного топлива с применением глицерина // Вопросы химии и химической технологии. 2017. Т. 1. № 110. С. 59–63.

2. Саламатин А.Г. О состоянии и перспективах использования водоугольного топлива в России // Уголь. 2000. Т. 3. С. 10–15.

3. Няшина Г.С. Исследование способов снижения влияния тепловых электрических станций на окружающую среду при сжигании суспензионных топлив из отходов углеобогащения и биомассы: Дис. ... канд. тех. наук. Москва; 2018. 201 с.

4. Shukla S.C., Kukade S., Mandal S.K., et al. Coal–oil–water multiphase fuel: Rheological behavior and prediction of optimum particle size // Fuel. 2008. Vol. 87, N15–16. pp. 3428-3432.

5. Zhao Z., Wang R., Ge L., et al. Energy utilization of coal-coking wastes via coal slurry preparation: The characteristics of slurring, combustion, and pollutant emission // Energy. 2019. Vol. 168. pp. 609-618.

6. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Purin M.V., et al. Justification of the possibility of car tires recycling as part of coal-water composites // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2021. Vol. 9, N1. pp. 1-21.

7. Strizhak P.A., Verzhinina K.Y. Maximum combustion temperature for coal-water slurry containing petrochemicals // Energy. 2017. Vol. 120. pp. 34-46.

8. Zhou H., Li Y., Li N., et al. Conversions of fuel-N to NO and N₂O during devolatilization and char combustion stages of a single coal particle under oxy-fuel fluidized bed conditions // Journal of the Energy Institute. 2019. Vol. 92. pp. 351-363.

9. Chen R., Wilson M., Leong Y.K., et al. Preparation and rheology of biochar, lignite char and coal slurry fuels // Fuel. 2011. Vol. 90, N4. pp. 1689-1695.

10. Баранова М.П. Влияние пластифицирующих добавок на реологические характеристики водоугольных суспензий из углей разной степени метаморфизма // Труды КГТУ. 2006. Т. 2, N3. С. 143–147.

11. Мингалеева Г.Р., Гайнетдинов А.В., Шакиров Р.Р., Ахметов Э.А. Сравнительный анализ способов снижения вязкости водоугольных топлив // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015, N7-8. С. 37-46.

12. Glushkov D.O., Syrodoy S.V., Zakharevich A.V., et al. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: analysis of key aspects // Fuel Processing Technology. 2016. Vol. 148. pp. 224-235.

13. Nikitin A.D., Nyashina G.S., Ryzhkov A.F., et al. Anthropogenic emissions from the combustion of composite coal-based fuels // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 772. pp. 144909.
14. Дмитриенко М.А., Няшина Г.С., Шлегель Н.Е., Шевырев С.А. Снижение антропогенных выбросов при сжигании углей и отходов их переработки в качестве компонентов органоводоугольных суспензий // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2017. Т. 19, №3-4. С. 41-52.
15. Ma X., Duan Y., Liu M. Atomization of petroleum-coke sludge slurry using effervescent atomizer // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2013. Vol. 46. pp. 131-138.
16. Daviault S.G., Ramadan O.B., Matida E.A., et al. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer // *Fuel*. 2012. Vol. 98. pp. 183-193.
17. Gvozdyakov D., Zenkov A. Improvement of atomization characteristics of coal-water slurries // *Energy*. 2021. Vol. 230. 120900.
18. Gvozdyakov D., Zenkov A. Influence of petrochemicals on jet characteristics after coal-water fuel spraying // *Fuel Processing Technology*. 2021. Vol. 218. 106864.
19. Mitchell E.J.S., Gudka B., Whittaker C., et al. The use of agricultural residues, wood briquettes and logs for small-scale domestic heating // *Fuel Processing Technology*. 2020. Vol. 210. 106552.
20. Kwoczynski Z., Čmelík J. Characterization of biomass wastes and its possibility of agriculture utilization due to biochar production by torrefaction process // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 280. 124302.
21. Mlkvik M., Stähle P., Schuchmann H.P., et al. Twin-fluid atomization of viscous liquids: The effect of atomizer construction on breakup process, spray stability and droplet size // *International Journal of Multiphase Flow*. 2015. Vol. 77. pp. 19-31.
22. Kim H.H., Park Y.H., Han K., et al. Combustion and emission characteristics of a reprocessed used lubricating oil as a renewable fuel for boiler cold start-up operation // *Energy*. 2021. Vol. 222. 119784.
23. Anufriev I.S., Shadrin E.Yu., Kopyev E.P., et al. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet // *Applied Thermal Engineering*. 2019. V. 163. 114400.
24. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Dekterev A.A., et al. Experimental and numerical investigation of aerodynamics of a pneumatic nozzle for suspension fuel // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2019. V. 77. pp. 288-298.
25. Alekseenko S.V., Bilsky A.V., Dulin V.M., et al. Experimental study of an impinging jet with different swirl rates // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2007. Vol. 28, №6. pp. 1340-1359.
26. 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.
27. Loureiro L.M.E.F., Gil P.B.F., Vieira de Campos F.V., et al. 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.
28. Tareq M.M., Dafsari R.A., Jung S., et al. 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.
29. Minakov A.V., Shebelev A.A., Strizhak P.A., et al. Study of the Weber number impact on secondary breakup of droplets of coal water slurries containing petrochemicals // *Fuel*. 2019. Vol. 254. 115606.
30. Shin J., Kim D., Seo J., et al. Effects of the physical properties of fuel on spray characteristics from a gas turbine nozzle // *Energy*. 2020. Vol. 205. 118090.
31. Kuznetsov G.V., Romanov D.S., Vershinina K.Yu., et al. Rheological characteristics and stability of fuel slurries based on coal processing waste, biomass and used oil // *Fuel*. 2021. Vol. 302. 121203.
32. Aleiferis P.G., van Romunde Z.R. An analysis of spray development with iso-octane, n-pentane, gasoline, ethanol and n-butanol from a multi-hole injector under hot fuel conditions // *Fuel*. 2013. Vol. 105. pp. 143-168.

33. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Valiullin T.R., et al. Atomization behavior of composite liquid fuels based on typical coal processing wastes // *Fuel Processing Technology*. 2022. Vol. 225. 107037.

34. Shadrin E.Yu., Anufriev I.S., Butakov E.B., et al. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner // *Fuel*. 2021. Vol. 303. 121182.

35. Zheng J., Xu Y., Wang Q., et al. 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.

Авторы публикации

Гвоздяков Дмитрий Васильевич – канд. техн. наук, доцент, доцент Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Инженерная школа энергетики, Томский политехнический университет; научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории катализа и преобразования углеродосодержащих материалов с получением полезных продуктов, Кузбасский государственный технический университет; научный сотрудник Лаборатории «Катализ и переработка углеводородов», НИТУ МИСиС.

Зенков Андрей Викторович – канд. техн. наук, доцент Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Инженерная школа энергетики, Томский политехнический университет; научный сотрудник Лаборатории «Катализ и переработка углеводородов», НИТУ МИСиС.

Лавриненко Сергей Викторович – канд. пед. наук, доцент Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Инженерная школа энергетики, Томский политехнический университет.

Матвеева Анастасия Александровна – канд. техн. наук, доцент Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Инженерная школа энергетики, Томский политехнический университет.

References

1. Sadovsky D.Yu., Makarov A.S., Savitsky D.P., et al. Obtaining composite coal-water fuel with the use of glycerin. *Questions of chemistry and chemical technology*. 2017;1(110):59-63. (In Russ).

2. Salamatin A.G. On the state and prospects of using coal-water fuel in Russia. *Coal*. 2000;3:10-15. (In Russ).

3. Nyashina G.S. *Issledovaniye sposobov snizheniya vliyaniya teplovykh elektricheskikh stantsiy na okruzhayushchuyu sredu pri szhiganii suspensionnykh topliv iz otkhodov ugleobogashcheniya i biomassy* [dissertation]. Moscow; 2018. 201 p. (In Russ).

4. Shukla S.C., Kukade S., Mandal S.K., et al. Coal–oil–water multiphase fuel: Rheological behavior and prediction of optimum particle size. *Fuel*. 2008;87(15-16):3428-3432.

5. Zhao Z., Wang R., Ge L., et al. Energy utilization of coal-coking wastes via coal slurry preparation: The characteristics of slurrying, combustion, and pollutant emission. *Energy*. 2019;168:609-618.

6. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Purin M.V., et al. Justification of the possibility of car tires recycling as part of coal-water composites. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021;9(1):1-21.

7. Strizhak P.A., Vershinina K.Y. Maximum combustion temperature for coal-water slurry containing petrochemicals. *Energy*. 2017;120:34-46.

8. Zhou H., Li Y., Li N., et al. Conversions of fuel-N to NO and N₂O during devolatilization and char combustion stages of a single coal particle under oxy-fuel fluidized bed conditions. *Journal of the Energy Institute*. 2019;92:351-363.

9. Chen R., Wilson M., Leong Y.K., et al. Preparation and rheology of biochar, lignite char and coal slurry fuels. *Fuel*. 2011;90(4):1689-1695.

10. Baranova M.P. Influence of plasticizing additives on rheological characteristics of coal-water suspensions from coals of varying degrees of metamorphism. *Proceedings of KSTU*. 2006;2(3):143-147. (In Russ).

11. Mingaleeva G.R., Gainetdinov A.V., Shakirov R.R., Akhmetov E.A. Comparative analysis of ways to reduce the viscosity of coal-water fuels. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;7-8:37-46. (In Russ).

12. Glushkov D.O., Syrodoy S.V., Zakharevich A.V., et al. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: analysis of key aspects. *Fuel Processing Technology*. 2016;148:224-235.

13. Nikitin A.D., Nyashina G.S., Ryzhkov A.F., et al. Anthropogenic emissions from the combustion of composite coal-based fuels. *Science of the Total Environment*. 2021;772:144909.

14. Dmitrienko M.A., Nyashina G.S., Shlegel N.E., Shevyrev S.A. Reduction of anthropogenic emissions during combustion of coals and waste of their processing as components of organo-coal-water slurries. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017;19(3-4):41-52. (In Russ).

15. Ma X., Duan Y., Liu M. Atomization of petroleum-coke sludge slurry using effervescent atomizer. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2013;46:131-138.

16. Daviault S.G., Ramadan O.B., Matida E.A., et al. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer. *Fuel*. 2012;98:183-193.

17. Gvozdyakov D., Zenkov A. Improvement of atomization characteristics of coal-water slurries. *Energy*. 2021;230:120900.

18. Gvozdyakov D., Zenkov A. Influence of petrochemicals on jet characteristics after coal-water fuel spraying. *Fuel Processing Technology*. 2021;218:106864.

19. Mitchell E.J.S., Gudka B., Whittaker C., et al. The use of agricultural residues, wood briquettes and logs for small-scale domestic heating. *Fuel Processing Technology*. 2020;210:106552.

20. Kwoczynski Z., Čmelík J. Characterization of biomass wastes and its possibility of agriculture utilization due to biochar production by torrefaction process. *Journal of Cleaner Production*. 2021;280:124302.

21. Mlkvik M., Stähle P., Schuchmann H.P., et al. Twin-fluid atomization of viscous liquids: The effect of atomizer construction on breakup process, spray stability and droplet size. *International Journal of Multiphase Flow*. 2015;77:19-31.

22. Kim H.H., Park Y.H., Han K., et al. Combustion and emission characteristics of a reprocessed used lubricating oil as a renewable fuel for boiler cold start-up operation. *Energy*. 2021;222:119784.

23. Anufriev I.S., Shadrin E.Yu., Kopyev E.P., et al. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet. *Applied Thermal Engineering*. 2019;163:114400.

24. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Dekterev A.A., et al. Experimental and numerical investigation of aerodynamics of a pneumatic nozzle for suspension fuel. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2019;77:288-298.

25. Alekseenko S.V., Bilsky A.V., Dulin V.M., et al. Experimental study of an impinging jet with different swirl rates. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2007;28(6):1340-1359.

26. 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;4:283-298.

27. Loureiro L.M.E.F., Gil P.B.F., Vieira de Campos F.V., et al. Dispersion and flow properties of charcoal oil slurries (ChOS) as potential renewable industrial liquid fuels. *Journal of the Energy Institute*. 2018;91(6):978-983.

28. Tareq M.M., Dafsari R.A., Jung S., et al. 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;126:103240.

29. Minakov A.V., Shebelev A.A., Strizhak P.A., et al. Study of the Weber number impact on secondary breakup of droplets of coal water slurries containing petrochemicals. *Fuel*. 2019;254:115606.

30. Shin J., Kim D., Seo J., et al. Effects of the physical properties of fuel on spray characteristics from a gas turbine nozzle. *Energy*. 2020;205:118090.

31. Kuznetsov G.V., Romanov D.S., Vershinina K.Yu., et al. Rheological characteristics and stability of fuel slurries based on coal processing waste, biomass and used oil. *Fuel*. 2021;302:121203.

32. Aleiferis P.G., van Romunde Z.R. An analysis of spray development with iso-octane, n-pentane, gasoline, ethanol and n-butanol from a multi-hole injector under hot fuel conditions. *Fuel*. 2013;105:143-168.

33. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Valiullin T.R., et al. Atomization behavior of composite liquid fuels based on typical coal processing wastes. *Fuel Processing Technology*. 2022;225:107037.

34. Shadrin E.Yu., Anufriev I.S., Butakov E.B., et al. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner. *Fuel*. 2021;303:121182.

35. Zheng J., Xu Y., Wang Q., et al. 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;98:40-48.

Authors of the publication

Dmitry V. Gvozdnyakov – Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia; Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia; National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russia.

Andrey V. Zenkov – Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia; National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russia.

Sergey V. Lavrinenko – Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.

Anastasia A. Matveeva – Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.

Получено **06.05.2022г.**

Отредактировано **13.05.2022г.**

Принято **15.05.2022г.**