

# ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПЫЛЕНИЯ И ЗАЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ С ДОБАВЛЕНИЕМ ИЗОПРОПИЛОВОГО СПИРТА

Д.В. Гвоздяков<sup>1, 2</sup>, А.В. Зенков<sup>2</sup>, В.Е. Губин<sup>2</sup>,  
Н.И. Березиков<sup>1, 2</sup>, Я.В. Марышева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева,  
г. Кемерово, Россия,

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
г. Томск, Россия

Выполнены комплексные экспериментальные исследования влияния изопропилового спирта в составе водоугольного топлива (ВУТ) на характеристики струи после распыления и время задержки зажигания капель суспензии. Распыление ВУТ с небольшими по массе добавками изопропилового спирта (от 3 до 8 %) проводилось на специализированном стенде с помощью пневматической форсунки с внутренним смещением жидкости и распыляющего агента (воздух). Исследования времени задержки зажигания выполнены в терморегулируемой печи в широком диапазоне температур окислителя (от 600 до 1000 °С). Измерены реологические характеристики исследованных топлив – вязкость, плотность и поверхностное натяжение. Определено, что замещение воды в составе ВУТ изопропиловым спиртом способствует повышению вязкости получаемого топлива, однако данный параметр остается в приемлемых пределах даже при максимальной исследовавшей концентрации третьего компонента. Установлено, что введение в состав водоугольного топлива на основе тощего угля изопропилового спирта приводит к увеличению угла раскрытия струи до 11 %. Это способствует равномерному распределению капель топлива по камере сгорания. В результате количество крупных капель (более 600 мкм) увеличивается незначительно – менее 2 % при концентрации спирта 8 % по массе. Время задержки зажигания при такой концентрации спирта сокращается в 2 раза по сравнению с двухкомпонентным ВУТ при температуре 1000 °С.

*Ключевые слова:* водоугольное топливо, суспензия, реологические свойства, распыление, время задержки зажигания, динамическая вязкость, плотность, размер капель.

## Введение

В последние десятилетия ведутся активные исследования новых экологических и энергоэффективных топлив по сравнению, например, с традиционными жидкими (мазут) и твердыми (уголь) энергоносителями [1]. Процесс выработки электрической энергии на угольных тепловых электрических станциях сопровождается масштабными выбросами в атмосферу антропогенных продуктов высокотемпературного сгорания [2], что приводит к глобальному загрязнению окружающей среды, изменению климата и угрозе здоровья населения планеты [3]. В результате многие страны стараются диверсифицировать энергетический сектор за счет использования экологически чистых и доступных видов топлива для производства электроэнергии [4]. В связи с современными требованиями к охране окружающей среды и снижению объемов вредных выбросов в атмосферу многокомпонентные топлива становятся перспективными [5, 6]. Такие топлива могут быть основаны на углях и различных горючих компонентах [5, 6]. При этом в последние десятилетия становится привлекательным отказ от традиционного сжигания угля при производстве электрической энергии и переход на водоугольные топлива (ВУТ) [7]. Использо-

вание ВУТ в качестве топлива на объектах энергетики позволит обеспечить ряд преимуществ производителям электрической энергии по критериям энергетики, экологии и экономики [8]: снижение (до 18 %) объемов эмиссии антропогенных соединений (оксиды серы и азота), малые риски возникновения пожаров и взрывов, широкий спектр доступных компонентов суспензий. Необходимо подчеркнуть, что в последние годы многие исследователи (например, [8–10]) отмечают целесообразность перехода от сжигания однородного угля в топках паровых и водогрейных котлов к водоугольным топливам. Однако ВУТ до сих пор не получили широкого применения в теплоэнергетике. Одной из главных причин, сдерживающих внедрение технологий ВУТ в энергетический сектор, является образование достаточно крупных капель топлива (более 1 мм) после распыления. Времена задержки их зажигания, как правило, большие – до 30 с в неблагоприятных условиях [11, 12]. Например, в России и других государствах исследованы характеристики и свойства водоугольных суспензий (ВУТ [13], органоводоугольных [14], с добавлением древесных отходов [15], спиртов [16, 17]). Однако такие топлива, как [16, 17] можно назвать спиртоугольными, так как содер-

жание спирта в их составе составляет порядка 40 %. Такие суспензии невозможно использовать в реальной теплоэнергетике по целому ряду объективных причин. Основная – существенно более высокая (на 25–70 %) стоимость по сравнению с водоугольными. Вторая (не менее важная) – высокая пожарная опасность спиртоугольных топлив (содержание спирта – более 20 %). По этой причине целью работы является обоснование эффективности распыления и сжигания водоугольных суспензий с относительно небольшими добавками изопропилового спирта (ИС) по результатам экспериментальных исследований.

## Методика экспериментальных исследований. Приготовление водоугольных суспензий

Исследовавшиеся ВУТ готовились на основе тощего угля. На первом этапе уголь подвергался измельчению в щековой дробилке (размер частиц на выходе – не более 30 мм), после чего осуществ-

лялся его сухой помол в дезинтеграторе. Далее уголь просеивался при помощи вибросита с отбором материала фракцией до 200 мкм. Характеристики угля представлены в табл. 1.

Мокрый помол осуществлялся в керамическом барабане объемом 3 л при массовом соотношении угля и мелющих тел 1:1 в течение 1 ч. Схема подготовки суспензионного топлива представлена на рис. 1.

В процессе приготовления водоугольных суспензий использовались вода и изопропиловый спирт при температуре 293 К. Их основные свойства представлены в табл. 2.

Оценивать влияние спирта в составе водоугольного топлива на характеристики струи после распыления и параметры зажигания целесообразно с учетом изменения реологических свойств – вязкость, плотность и поверхностное натяжение (табл. 3).

Измерение динамической вязкости выполнено с помощью ротационного вискозиметра Brookfield

Таблица 1

Характеристики угля

Параметр	Тощий уголь
Зольность $A^d$ , %	3,2
Выход летучих $V^{daf}$ , %	13,5
Содержание углерода, % daf	91,0
Содержание водорода, % daf	3,8
Суммарная доля кислорода, азота и серы, % daf	5,2
Влажность, %	8,0

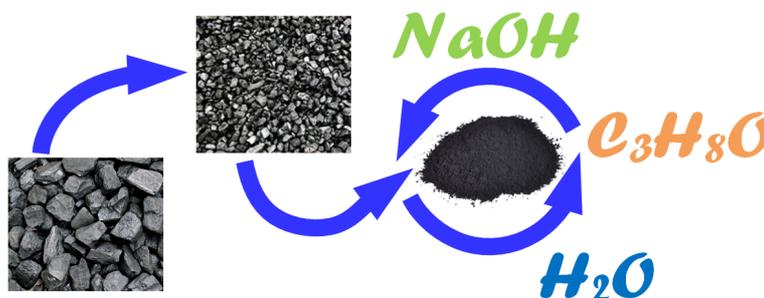


Рис. 1. Схема подготовки топливной суспензии

Таблица 2

Параметры жидких компонентов суспензии

Компонент	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Динамическая вязкость, 10 <sup>-3</sup> Па·с	Поверхностное натяжение, мН/м
Изопропиловый спирт	787 [18]	1542 [19]	22,4 [20]
Вода	997	890	72,75

Таблица 3

Водоугольные суспензии

Состав, №	Суспензия	Вязкость при 100 с <sup>-1</sup> , мПа·с	Коэффициент поверхностного натяжения, мН/м	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
1	ВУТ	127	59,8	1824
2	ВУТ + 3 % ИС	154	60,1	1797
3	ВУТ + 5 % ИС	187	60,4	1755
4	ВУТ + 8 % ИС	237	60,8	1711

RVDV-II+Pro. Водоугольное топливо массой 0,7 кг помещалось в мерный стакан цилиндрической формы диаметром 100 мм. Шпindelь вискозиметра погружался в исследовавшееся топливо. Вязкость измеряли путем логарифмического увеличения скорости сдвига от 0,01 до 100 с<sup>-1</sup> в течение 100 с.

Значения плотностей исследовавшихся ВУТ и спиртоводоугольных топлив (СВУТ) определялись при помощи ареометров общего назначения, предназначенных для измерения плотности жидкости или многокомпонентных растворов, плотность которых находится в диапазоне изменения от 700 до 1900 кг/м<sup>3</sup>.

Поверхностное натяжение водоугольных топлив с относительно небольшой добавкой изопропилового спирта выполнено автоматическим тензиометром (DCAT 9). Точность выполненных измерений составляла 0,01 мН/м. Все эксперименты выполнены 5 раз для каждого образца при температуре окружающей среды 293 К.

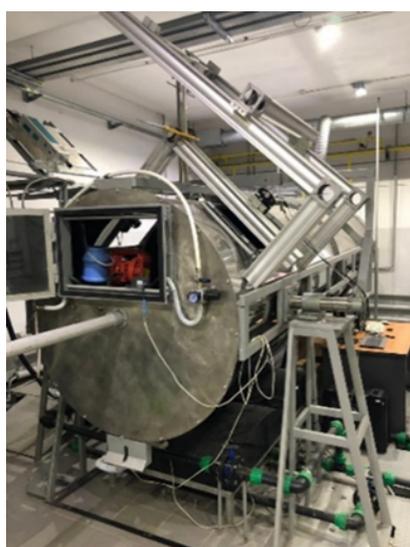
Обзор литературы по проблемам ВУТ показал [21, 22], что NaOH может использоваться в качестве присадки-пластификатора водоугольных суспензий. Этот компонент стабилизирует однородность состава ВУТ – препятствует его расслоению. При проведении наших экспериментальных исследований NaOH применялся в качестве присадки-пластификатора как наиболее доступный и дешевый материал. В состав водоугольного топлива NaOH добавлялся в количестве менее 1 % по массе.

Экспериментальные исследования влияния концентрации изопропилового спирта в составе ВУТ на характеристики процесса распыления выполнены в аэродинамическом имитаторе камеры сгорания энергетического котла (рис. 2а). Подача водоугольной суспензии осуществлялась из бака хранения топлива при помощи мембранного насо-

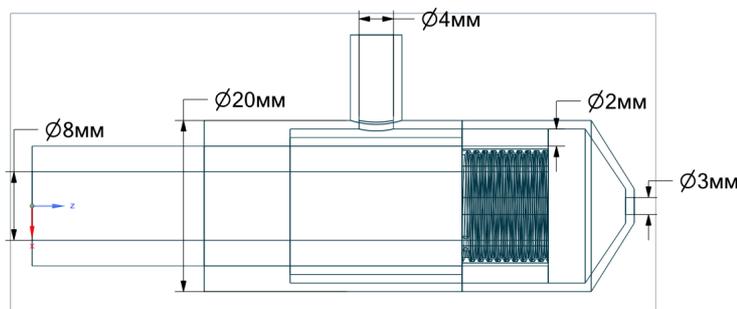
са с пневматическим приводом. В качестве распыляющего агента использовался воздух, подаваемый компрессором на пневматическую форсунку с внутренним смешением. Диаметр сопла форсунки составлял 3 мм. Подсветка струи распыляемого топлива выполнялась лазерным ножом, ориентированным по оси факела. Использувавшееся в экспериментах устройство для распыления водоугольных суспензий (рис. 2б) представляет собой достаточно типичную конструкцию. Форсунка изготовлена из стали и позволяет распылять топливные суспензии с различными характеристиками (вязкость, плотность и т. д.) совместно с распылителем агентом (воздух). Конструкция форсунки выполнена с учетом анализа литературы, например [23–25], который показал, что исследования характеристик струи топлива после распыления выполняются с использованием двухжидкостных форсунок, в которых топливо и распыляющий агент выходят из сопла устройства распыления параллельно в осевом направлении.

В момент подсвечивания области исследования импульсом лазера осуществляется фоторегистрация струи цифровой кросскорреляционной камерой. Погрешность измерений с учетом возможных источников погрешности (таких как локальный градиент скорости, смещение каплей, оптические эффекты и т. д.) не превышала 8 % аналогично [26–29]. Принципиальная схема стенда для регистрации капельной струи водоугольных топлив после распыления представлена на рис. 3.

Высокоскоростная визуализация характеристик струи и определение размеров каплей выполнены методом Interferometric Particle Imaging (IPI) аналогично [26–28]. Обработка изображений осуществлялась при помощи программного обеспечения ActualFlow, разработанного компанией Сигма-Про (г. Новосибирск) [27–29].



а)



б)

Рис. 2. Стенд для изучения процесса распыления водоугольных топлив:  
а – фото стенда; б – продольный разрез форсунки

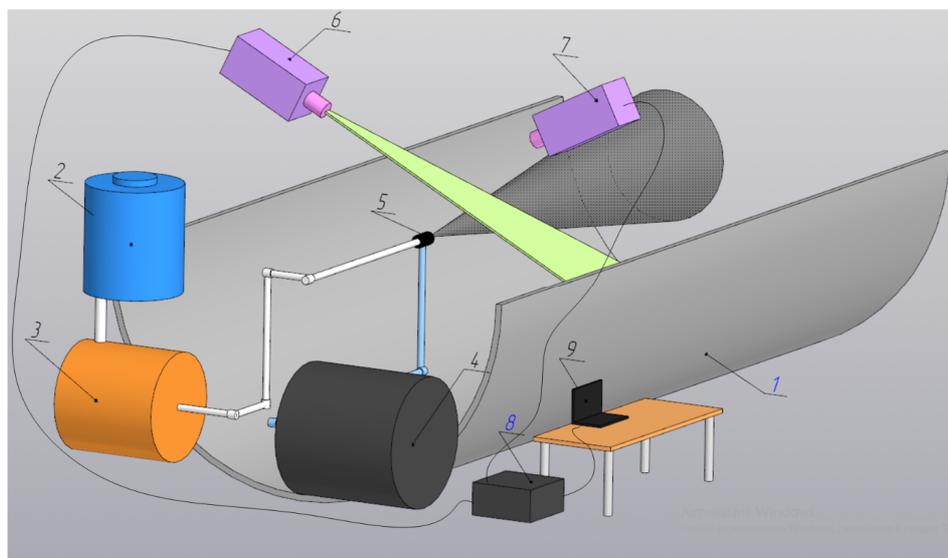


Рис. 3. Схема стенда для изучения процесса распыления водоугольных топлив: 1 – аэродинамический имитатор камеры сгорания; 2 – бак хранения топлива; 3 – насос с пневматическим приводом Yamada NDP15; 4 – компрессор; 5 – пневматическая форсунка с внутренним смешением; 6 – лазер Beamtech Vlite-200; 7 – кросскорреляционная видеокамера ImperX Bobcat B2020; 8 – блок синхронизации SP-2.0 ПС; 9 – персональный компьютер

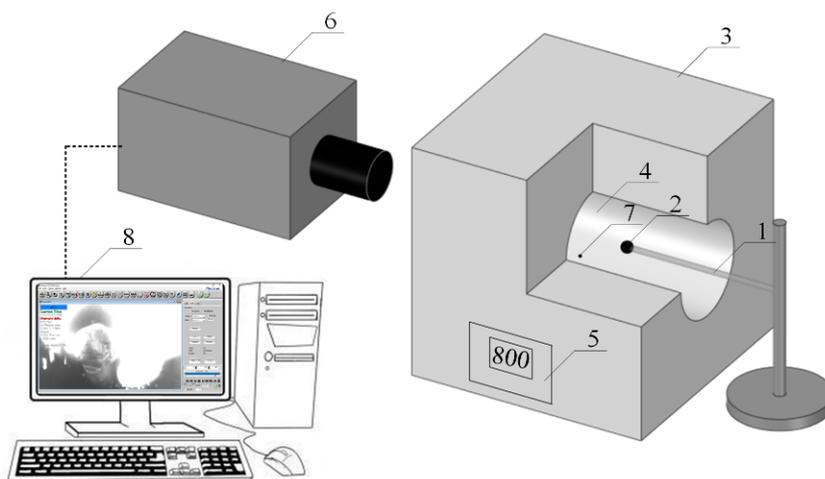


Рис. 4. Схема стенда по определению времени задержки зажигания топливных суспензий: 1 – стержень-держатель образца (капля); 2 – капля СВУТ/ВУТ; 3 – терморегулируемая печь; 4 – полый керамический цилиндр; 5 – нагревательный элемент; 5 – регулятор температуры; 6 – высокоскоростная видеокамера Photron Fastcam SA4; 7 – термопара; 8 – персональный компьютер

Для каждого исследованного состава водоугольной суспензии выполнено не менее 50 измерений. При обработке полученных результатов суммарное распределение капель топлива ( $\sum n_i$ ) на всех изображениях нормировалось к общему числу идентифицированных капель ( $\sum K$ ):

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

При проведении экспериментов значения давлений распыляющего агента и топлива составляли  $P_T = 0,28$  МПа и  $P_B = 0,3$  МПа соответственно. Давление распыляющего агента выставлялось на 0,02 МПа меньше давления топлива с целью исключения эффекта «задавливания» вязкой суспен-

зии воздухом в форсунке и далее по топливному тракту. Время проведения эксперимента для каждого состава составляло 100–120 с. Такой интервал времени является достаточным для формирования стабильной структуры струи. Размеры области исследования составляли: в продольном направлении струи – 0,1 м, перпендикулярно оси – 0,05 м. Эксперименты выполнены в хорошо воспроизводимых условиях при температуре окружающей среды  $293 \pm 2$  К и относительной влажности  $65 \pm 3$  %.

На рис. 4 представлена принципиальная схема стенда для проведения экспериментальных исследований по определению времен задержки зажи-

гания капель СВУТ. Исследования выполнены в диапазоне температур окислителя (воздух) от 600 до 1000 °С. Соответствующие температуры характерны условиям подачи распыленных топливных суспензий в топочную камеру современных котельных установок. Начальный характерный размер капель – диаметр – составлял: 1,0; 1,5; 2,5 мкм.

Методика определения времен задержки зажигания одиночных капель водоугольных суспензий состояла из нескольких этапов. В терморегулируемой печи устанавливалась необходимая температура (от 873 до 1273 К). Нагрев осуществлялся подачей напряжения на нихромовую проволоку нагревательного элемента диаметром  $0,4 \cdot 10^{-3}$  м. Для регистрации температуры применялась хромель-алюмелевая термопара, помещенная в центр полого керамического цилиндра. Характерный размер капли определялся при помощи высокоскоростной видеокамеры. Капля исследовавшегося топлива размещалась на стержне-держателе, выполненном из стальной проволоки с наконечником в форме полусферы диаметром около  $0,3 \cdot 10^{-3}$  м.

Временем задержки устойчивого зажигания принято время от момента ввода держателя с каплей в фокус камеры до появления свечения вокруг нее, соответствующего началу процесса горения. Эксперименты выполнены в идентичных и хорошо воспроизводимых условиях при комнатной температуре 293 К и относительной влажности 65 %.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 5 представлены типичные видеок cadры, иллюстрирующие процесс распыления ВУТ и спиртосодержащих водоугольных суспензий. Введение изопропилового спирта в состав ВУТ приводит к изменению угла раскрытия струи при постоянных значениях давления распыляющего агента и топлива. Увеличение массовой концентрации ИС в составе водоугольного топлива при-

водит к росту вязкости исследовавшихся СВУТ. Объясняется это замещением части воды в ВУТ на более вязкий изопропиловый спирт. Значение вязкости суспензии оказывает влияние на структуру струи. Высокая вязкость суспензии, в сравнении с типичным двухкомпонентным водоугольным топливом, препятствует деформации капель распыленного СВУТ за счет аэродинамического сопротивления окружающей среды (воздух). Такие капли топлива, как правило, после столкновения с другими разрушаются на несколько мелких или сохраняют свою целостность. При этом их траектории движения после первичного дробления практически не изменяются и ориентированы хаотично. Анализ результатов экспериментов показал, что с ростом концентрации ИС до 8 % по массе значение угла раскрытия струи увеличивается более чем на 11 %. Таким образом, можно сделать вывод, что увеличение вязкости исследовавшихся топлив с относительно небольшими добавками по массе ИС оказывает значимое влияние на угол раскрытия струи при распылении. При этом считается, что увеличение угла раскрытия струи способствует более равномерному распределению капель топлива по камере сгорания.

Обработка результатов экспериментов с использованием метода IPI позволила получить информацию о распределении идентифицированных капель исследовавшихся водоугольных суспензий (рис. 6). Капли распыленных топлив были условно разделены на три диапазона размеров – мелкие (0–200 мкм), средние (200–600 мкм) и крупные (более 600 мкм).

Представленные на рис. 6 результаты экспериментов иллюстрируют влияние концентрации третьего компонента водоугольного топлива на изменение количества капель различных размеров. При добавлении 3 масс. % ИС в состав водоугольной суспензии, приготовленной на основе тощего

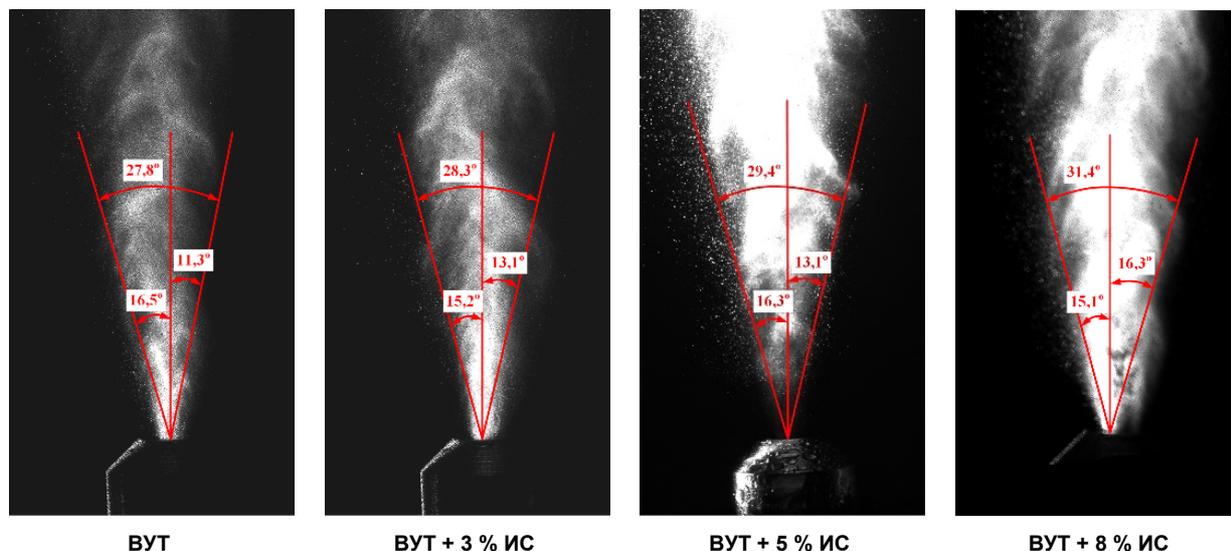


Рис. 5. Изменение угла раскрытия струи после распыления спиртоводоугольного топлива

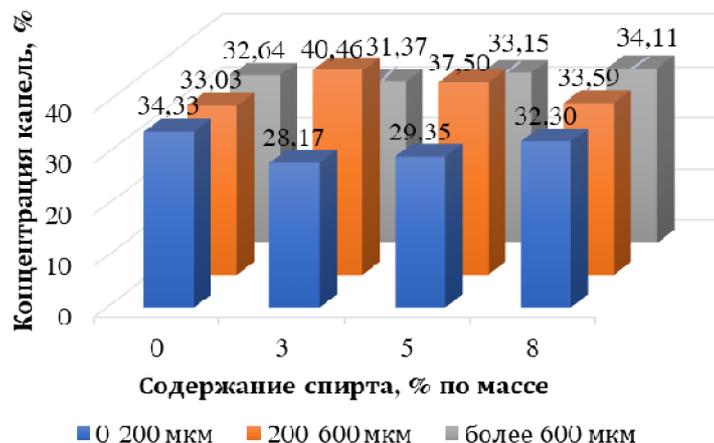


Рис. 6. Влияние содержания изопропилового спирта на число капель водоугольного топлива после распыления

угля, число капель малых размеров после распыления снижается, в то время как количество средних капель увеличивается. Дальнейшее повышение концентрации спирта в составе суспензии приводит к увеличению количества мелких и крупных капель и снижению числа капель среднего размера до уровня двухкомпонентного ВУТ.

На рис. 7 представлены кадры, иллюстрирующие стадии процесса зажигания капли спирто-водоугольного топлива. Сразу после введения капли топлива в нагретую до необходимой температуры камеру терморегулируемой печи начинается ее интенсивный нагрев. В результате этого жидкие компоненты (вода и спирт) суспензии начинают испаряться с приповерхностных слоев капли. Характерным признаком, идентифицирующим эту стадию, является трансформация поверхности капли, незначительное изменение ее размера и внешнего вида – переход от «глянцевого» к «матовому».

Такие процессы способны протекать более или менее интенсивно в зависимости от компонентного состава топлива и начального характерного размера капли водоугольной суспензии. В результате протекания этих двух процессов формируется горючая смесь вокруг поверхности всей капли. Газофазное зажигание этой смеси осуществляется при достижении минимально необходимых концентраций паров спирта и горючих продуктов термического разложения угля при соответствующей температуре окислителя. Рост температуры окружающей среды вблизи поверхности капли инициирует возникновение новых локальных очагов пламени вблизи поверхности капли топлива.

На рис. 8 представлены зависимости, показывающие влияние концентрации изопропилового спирта на время задержки зажигания капель водоугольного топлива.

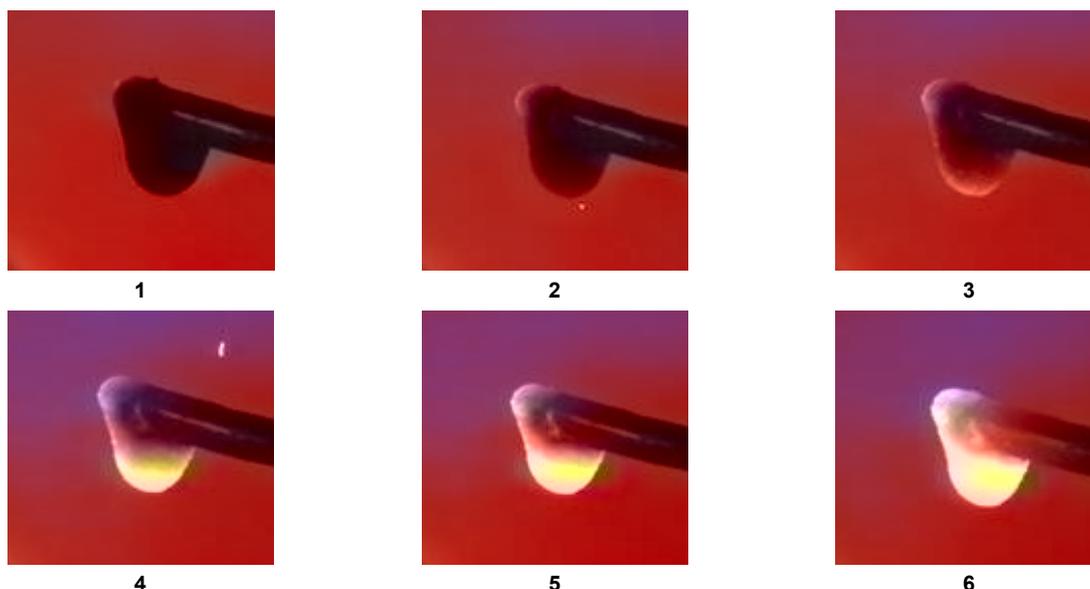


Рис. 7. Типичные видеокдры со стадиями зажигания капель СВУТ с добавлением 8 масс. % изопропилового спирта начальным характерным размером 1,0 мм при температуре окружающей среды 1000 °С

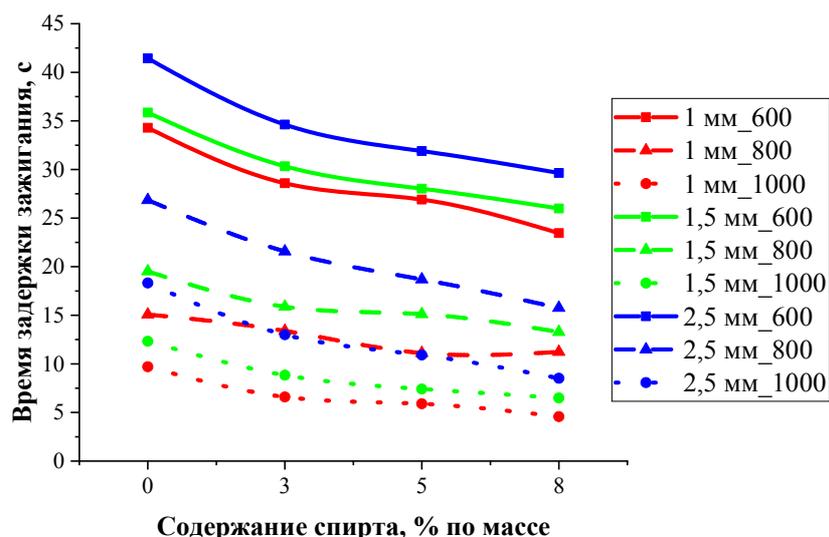


Рис. 8. Время задержки зажигания исследованных составов топлива

Полученные результаты показывают, что введение изопропилового спирта в состав ВУТ приводит к снижению времени задержки зажигания топлива. Установлено, что добавление 3, 5 и 8 % ИС в среднем приводит к снижению времени задержки зажигания на 16, 22 и 29 % соответственно в сравнении с двухкомпонентным ВУТ при температуре 600 °С. При этом влияние изопропилового спирта становится более выраженным при увеличении температуры греющей среды.

#### Заключение

Выполнены комплексные экспериментальные исследования влияния изопропилового спирта в составе водоугольного топлива на характеристики струи после распыления и время задержки зажигания. Установлено, что введение в состав водо-

угольного топлива на основе тощего угля изопропилового спирта приводит к увеличению угла раскрытия струи до 11 %. Данный факт способствует более равномерному распределению капель топлива по камере сгорания. При этом количество крупных капель (более 600 мкм) увеличивается незначительно – менее 2 % при концентрации спирта 8 % по массе. Время задержки зажигания при такой концентрации спирта сокращается в 2 раза по сравнению с двухкомпонентным ВУТ при температуре 1000 °С.

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

#### Литература

1. Кашин, Е.М. Технология подготовки и газификации экологичного вида топлива / Е.М. Кашин, В.Н. Диденко // Экологическое образование и охрана окружающей среды: Технические университеты в формировании единого научно-технологического и образовательного пространства СНГ. Ассоциация технических университетов. – 2014. – С. 192–195.
2. Битюкова, В.Р. Роль тепловых электростанций в загрязнении городов России / В.Р. Битюкова // Инженерная экология – 2021: доклады международного симпозиума. – 2021. – С. 130–134.
3. Грачев, В.А. Влияние энергетических технологий на здоровье населения / В.А. Грачев, Н.И. Куряшева // Вестник НИЦ МИСИ: актуальные вопросы современной науки. – 2019. – № 18. – С. 102–123.
4. Эколого-экономическая эффективность применения альтернативных энергетических технологий для снижения антропогенной нагрузки в центральной экологической зоне байкальской природной территории / И.Ю. Иванова, А.К. Ижбулдин, Т.Ф. Тугузова, Е.П. Майсюк // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2020. – № 25–27(347–349). – С. 138–146. DOI: 10.15518/isjaee.2020.09.013
5. Хрусталева, Б.М. Технология эффективного использования углеводородсодержащих отходов в производстве многокомпонентного твердого топлива / Б.М. Хрусталева, А.Н. Пехота // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2016. – Т. 59, № 2. – С. 122–140. DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-2-122-140
6. Твердое топливо на основе отходов малоиспользуемых горючих энергоресурсов / Б.М. Хрусталева, А.Н. Пехота, Н.Т. Нгуен, Ф.М. Ву // Наука и техника. – 2021. – Т. 20, № 1. – С. 58–65. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-1-58-65

7. Герасимова, Н.П. Перспективы и возможности использования водоугольного топлива в энергетике / Н.П. Герасимова, В.В. Федчишин // *Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием.* – 2020. – С. 104–108.
8. Dmitrienko, M.A. Coal-water slurries containing petrochemicals to solve problems of air pollution by coal thermal power stations and boiler plants: an introductory review / M.A. Dmitrienko, P.A. Strizhak // *Science of Total Environment.* – 2018. – Vol. 613–614. – P. 1117–1129. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.189
9. Viebahn, P. Prospects of carbon capture and storage (CCS) in China's power sector – An integrated assessment / P. Viebahn, D. Vallentin, S. Höller // *Applied Energy.* – 2015. – Vol. 157. – P. 229–244. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.07.023
10. Environmental co-benefits of energy efficiency improvement in coal-fired power sector: a case study of Henan Province, China / K. Wang, S. Wang, L. Liu, H. Yue, R. Zhang, X. Tang // *Applied Energy.* – 2016. – Vol. 184. – P. 810–819. DOI:10.1016/j.apenergy.2016.06.059
11. Mathematical and physical modeling of the coal-water coal–water fuel particle ignition with a liquid film on the surface / V. Salomatov, G. Kuznetsov, S. Syrodoy, N. Gutareva // *Energy Reports.* – 2020. – Vol. 6. – P. 628–643. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.02.006
12. Syrodoy, S.V. The influence of radiative-convective heat transfer on ignition of the drops of coal-water fuel / S.V. Syrodoy // *Thermophysics and Aeromechanics.* – 2018. – Vol. 25, no. 3. – P. 429–443. DOI: 10.1134/S0869864318030101
13. Режимы течения топливных водоугольных суспензий в каналах распыливающих устройств / А.К. Джундубаев, М.С. Султаналиев, В.И. Мурко и др. // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии.* – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 242–249.
14. Снижение антропогенных выбросов при сжигании углей и отходов их переработки в качестве компонентов органоводоугольных суспензий / М.А. Дмитриенко, Г.С. Няшина, Н.Е. Шлегель, С.А. Шевырев // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.* – 2017. – Т. 19, № 3–4. – С. 41–52.
15. Малышев, Д.Ю. Обоснование ресурсоэффективности технологий сжигания водоугольных топлив с добавками биомассы / Д.Ю. Малышев, С.В. Сыродой // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2020. – Т. 331. – № 6. – С. 77–85.
16. Saito, M. Single droplet combustion of coal-oil/methanol/water mixtures / M. Saito, M. Sadakata, T. Sakai // *Fuel.* – 1983. – Vol. 62, no. 12. – P. 1481–1486. DOI: 10.1016/0016-2361(83)90118-7
17. Coal slurries in mixed liquid fuels: rheology and ignition characteristics / K.C. Adiga, Y.K. Pithapurwala, D.O. ShahBrij, M. Moudgil // *Fuel Processing Technology.* – 1988. – Vol. 18, no. 1. – P. 59–69. DOI: 10.1016/0378-3820(88)90074-4
18. Physical and equilibrium properties of diisopropyl ether+isopropyl alcohol+water system / A. Arce, A. Jr. Arce, J. Marti nezAgeitos, E. Rodil, O. Rodri guez A. Soto // *Fluid Phase Equilibria.* – 2000. – Vol. 170, no. 1. – P. 113–126. DOI: 10.1016/S0378-3812(00)00328-9
19. Özer, S. The effect of diesel fuel-tall oil/ethanol/methanol/isopropyl/n-butanol/fusel oil mixtures on engine performance and exhaust emissions / S. Özer // *Fuel.* – 2020. – Vol. 281. – 118671. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118671
20. Di Nicola G. Surface tension of alcohols: A scaled equation and an artificial neural network / Di Nicola G., Pierantozzi M. // *Fluid Phase Equilibria.* – 2015. – Vol. 389. – P. 16–27. DOI: 10.1016/j.fluid.2015.01.014
21. Rheological behaviour of coal–water mixtures: 1. Effects of coal type, loading and particle size / N.S. Roh, D.H. Shin, D.C. Kim, J.D. Kim // *Fuel.* – 1995. – Vol. 74. – P. 1220–1225.
22. Rheological behaviour of coal–water mixtures: 2. Effect of surfactants and temperature / N.S. Roh, D.H. Shin, D.C. Kim, J.D. Kim // *Fuel.* – 1995. – Vol. 74. – P. 1313–1318.
23. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer / S.G. Daviault, O.B. Ramadan, E.A. Matida, P.M. Hughes, R. Hughes // *Fuel.* – 2012. – Vol. 98. – P. 183–193. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.02.042
24. Lu, P. Experimental investigation on atomizing characteristics of coal–water paste for pressurized fluidized bed / P. Lu, M. Zhang // *Fuel.* – 2004. – Vol. 83, no. 16. – P. 2109–2114. DOI: 10.1016/j.fuel.2004.06.003
25. Improving the processability of coke water slurries for entrained flow gasification / L. Jampolski, A. Sängler, T. Jakobs, G. Guthausen, T. Kolb, N. Willenbacher // *Fuel.* 2016. – Vol. 185. – P. 102–111. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.07.102
26. 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. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114400
27. 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. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.04.013

28. *Coherent structures in the near-field of swirling turbulent jets A tomographic PIV study* / S.V. Alekseenko, S.S. Abdurakipov, M.Y. Hrebtov, M.P. Tokarev, D.M. Markovich // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2018. – Vol. 70. – P. 363–379. DOI: 10.5772/intechopen.79896

29. *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, no. 6. – P. 1340–1359. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.05.011

**Гвоздяков Дмитрий Васильевич**, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории катализа и преобразования углеродсодержащих материалов с получением полезных продуктов, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово; доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; dim2003@tpu.ru.

**Зенков Андрей Викторович**, канд. техн. наук, ассистент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; avz41@tpu.ru.

**Губин Владимир Евгеньевич**, канд. техн. наук, доцент, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; gubin@tpu.ru.

**Березиков Николай Игоревич**, техник лаборатории катализа и преобразования углеродсодержащих материалов с получением полезных продуктов, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово; студент Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; nib3@tpu.ru.

**Марышева Яна Владимировна**, инженер НИЦ «Экоэнергетика 4.0» Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; marysheva@tpu.ru.

Поступила в редакцию 28 октября 2021 г.

DOI: 10.14529/power210404

## RESEARCH OF THE SPRAYING AND IGNITION CHARACTERISTICS OF COAL-WATER FUELS WITH ISOPROPYL ALCOHOL ADDITION

D.V. Gvozdyakov<sup>1, 2</sup>, dim2003@tpu.ru,

A.V. Zenkov<sup>2</sup>, avz41@tpu.ru,

V.E. Gubin<sup>2</sup>, gubin@tpu.ru,

N.I. Berezikov<sup>1, 2</sup>, nib3@tpu.ru,

Ya.V. Marysheva<sup>2</sup>, marysheva@tpu.ru

<sup>1</sup> T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation,

<sup>2</sup> Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

The article presents complex experimental studies of the effect isopropyl alcohol in the composition of coal-water fuel (CWF) has on the jet characteristics and the ignition delay time of the slurry droplets. CWF with minor additions of isopropyl alcohol (from 3 to 8%) was sprayed using a pneumatic nozzle on a specialized stand. Investigations of the ignition delay time were performed in a temperature-controlled furnace in a wide range of oxidant temperatures (from 600 to 1000 °C). The rheological characteristics of the studied fuels, i.e. viscosity, density and surface tension were measured. It was determined that replacing water in the CWF composition with isopropyl alcohol contributes to increased viscosity of the resulting fuel. However, this parameter remains within acceptable limits even at the maximum studied concentration of the third component. It was found that the introduction of isopropyl alcohol into the composition of coal-water fuel based on lean coal leads to an increase in the jet spraying angle up to 11%. This contributes to an even distribution of fuel droplets inside the combustion chamber. As a result, the number of large droplets (more than 600 microns) increases only slightly – less than 2% at an alcohol concentration of 8% by mass. The ignition delay time at such an alcohol concentration decreases by half compared to the two-component CWF at a temperature of 1000 °C.

*Keywords:* coal-water fuel, slurry, rheological properties, spraying, ignition delay time, dynamic viscosity, density, droplets size.

This work carried out with financial support in accordance with Supplementary Agreement No. 075-03-2021-138/3 on the provision of subsidies from the federal budget for the financial support of the state assignment for the provision of public services (internal number 075-GZ/H4141/687/3).

### References

1. Kashin E.M., Didenko V.N. [Technology of preparation and gasification of environmentally friendly fuel]. *Ekologicheskoye obrazovaniye i okhrana okruzhayushchey sredy: Tekhnicheskkiye universitety v formirovaniy yedinogo nauchno-tekhnologicheskogo i obrazovatel'nogo prostranstva SNG. Assotsiatsiya tekhnicheskikh universitetov* [Environmental education and environmental protection: Technical universities in the formation of a unified scientific, technological and educational space of the CIS. Association of Technical Universities], 2014, pp. 192–195. (in Russ.)
2. Bityukova V.R. [The Role of Thermal Power Plants in Pollution of Russian Cities]. *Inzhenernaya ekologiya – 2021: Doklady mezhdunarodnogo simpoziuma* [Engineering Ecology – 2021: Reports of the International Symposium], 2021, pp. 130–134. (in Russ.)
3. Grachev V.A., Kurysheva N.I. [The influence of energy technologies on the health of the population]. *Vestnik NITS MISI: aktual'nyye voprosy sovremennoy nauki* [Bulletin of the SRC MISS: topical issues of modern science], 2019, no. 18, pp. 102–123. (in Russ.)
4. Ivanova I.Yu., Izhbuldin A.K., Tuguzova T.F., Maisyuk E.P. Ecological and economic efficiency of the use of alternative energy technologies to reduce of the anthropogenic load in the central ecological area of the Baikal natural territory. *International scientific journal Alternative Energy and Ecology*, 2020, no. 25–27 (347–349), pp. 138–146. (in Russ.) DOI: 10.15518/isjaee.2020.09.013
5. Khroustalev B.M., Pekhota A.N. Technology for efficient usage of hydrocarbon-containing waste in production of multi-component solid fuel. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'yedineniy SNG* [Energy. Proceedings of higher educational institutions and energy associations of the CIS], 2016, vol. 59, no. 2, pp. 122–140. (in Russ.) DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-2-122-140
6. Khroustalev B.M., Pekhota A.N., Nguyen N.T., Wu F.M. Solid fuel based on waste of low-utilized combustible energy resources. *Nauka i tekhnika* [Science and technology], 2021, vol. 20, no. 1, pp. 58–65. (in Russ.) DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-1-58-65
7. Gerasimova N. P., Fedchishin V.V. [Prospects and possibilities of using coal-water fuel in power engineering]. *Povysheniye effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri: Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Increasing the efficiency of energy production and use in Siberia: Materials of the All-Russian scientific-practical conference with international participation], 2020, pp. 104–108. (in Russ.)
8. Dmitrienko M.A., Strizhak P.A. Coal-water slurries containing petrochemicals to solve problems of air pollution by coal thermal power stations and boiler plants: an introductory review. *Science of Total Environment*, 2018, vol. 613–614, pp. 1117–1129. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.189
9. Viebahn P., Vallentin D., Höller S. Prospects of carbon capture and storage (CCS) in China's power sector – An integrated assessment. *Applied Energy*, 2015, vol. 157, pp. 229–244. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.07.023
10. Wang K., Wang S., Liu L., Yue H., Zhang R., Tang X. Environmental co-benefits of energy efficiency improvement in coal-fired power sector: a case study of Henan Province, China. *Applied Energy*, 2016, vol. 184, pp. 810–819. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.06.059
11. Salomatov V., Kuznetsov G., Syrodoy S., Gutareva N. Mathematical and physical modeling of the coal-water coal–water fuel particle ignition with a liquid film on the surface. *Energy Reports*, 2020, vol. 6, pp. 628–643. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.02.006
12. Syrodoy S.V. The influence of radiative-convective heat transfer on ignition of the drops of coal-water fuel. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 429–443. DOI: 10.1134/S0869864318030101
13. Dzhundubaev A.K., Sultanaliev M.S., Murko V.I., Kulagina L.V., Baranova M.P. [Modes of flow of fuel coal-water suspensions in the channels of spraying devices]. *Journal of Siberian Federal University. Series: Engineering and technology*, 2018, vol. 11, no. 2, pp. 242–249. (in Russ.)
14. Dmitrienko M.A., Nyashina G.S., Schlegel N.E., Shevyrev S.A. The reduction anthropogenic emission at the combustion of coals and coal processing waste as a component coal-water slurry containing petrochemicals. *Power engineering: research, equipment, technology*, 2017, vol. 19, no. 3–4, pp. 41–52. (in Russ.)
15. Malyshev D.Yu., Syrodoi S.V. [Substantiation of resource efficiency of technologies for combustion of coal-water fuels with biomass additives]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of Georesources*, 2020, vol. 331, no. 6, pp. 77–85. (in Russ.)
16. Saito M., Sadakata M., Sakai T. Single droplet combustion of coal-oil/methanol/water mixtures. *Fuel*, 1983, vol. 62, no. 12, pp. 1481–1486. DOI: 10.1016/0016-2361(83)90118-7
17. Adiga K.C., Pithapurwala Y.K., ShahBrij D.O., Moudgil M. Coal slurries in mixed liquid fuels: rheology and ignition characteristics. *Fuel Processing Technology*, 1988, vol. 18, no. 1, pp. 59–69. DOI: 10.1016/0378-3820(88)90074-4

18. Arce A., Arce A. Jr., Martínez-Ageitos J., Rodil E., Rodríguez O, Soto A. Physical and equilibrium properties of diisopropyl ether+isopropyl alcohol+water system. *Fluid Phase Equilibria*, 2000, vol. 170, no. 1, pp. 113–126. DOI: 10.1016/S0378-3812(00)00328-9
19. Özer S. The effect of diesel fuel-tall oil/ethanol/methanol/isopropyl/n-butanol/fusel oil mixtures on engine performance and exhaust emissions. *Fuel*, 2020, vol. 281, 118671. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118671
20. Di Nicola G., Pierantozzi M. Surface tension of alcohols: A scaled equation and an artificial neural network. *Fluid Phase Equilibria*, 2015, vol. 389, pp. 16–27. DOI: 10.1016/j.fluid.2015.01.014
21. Roh N.S., Shin D.H., Kim D.C., Kim J.D. Rheological behaviour of coal–water mixtures: 1. Effects of coal type, loading and particle size. *Fuel*, 1995, vol. 74, pp. 1220–1225.
22. Roh N.S., Shin D.H., Kim D.C., Kim J.D. Rheological behaviour of coal–water mixtures: 2. Effect of surfactants and temperature. *Fuel*, 1995, vol. 74, pp. 1313–1318.
23. Daviault S.G., Ramadan O.B., Matida E.A., Hughes P.M., Hughes R. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer. *Fuel*, 2012, vol. 98, pp. 183–193. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.02.042
24. Lu P., Zhang M. Experimental investigation on atomizing characteristics of coal–water paste for pressurized fluidized bed. *Fuel*, 2004, vol. 83, no. 16, pp. 2109–2114. DOI: 10.1016/j.fuel.2004.06.003
25. Jampolski L., Sängler A., Jakobs T., Guthausen G., Kolb T., Willenbacher N. Improving the processability of coke water slurries for entrained flow gasification. *Fuel*, 2016, vol. 185, pp. 102–111. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.07.102
26. 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. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114400
27. 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. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.04.013
28. Alekseenko S.V., Abdurakipov S.S., Hrebtov M.Y., Tokarev M.P., Markovich D.M. Coherent structures in the near-field of swirling turbulent jets A tomographic PIV study. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2018, vol. 70, pp. 363–379. DOI: 10.5772/intechopen.79896
29. 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, no. 6, pp. 1340–1359. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.05.011

Received 28 October 2021

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Исследование характеристик распыления и зажигания водоугольных топлив с добавлением изопропилового спирта / Д.В. Гвоздяков, А.В. Зенков, В.Е. Губин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 29–39. DOI: 10.14529/power210404

#### FOR CITATION

Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Gubin V.E., Berezikov N.I., Marysheva Ya.V. Research of the Spraying and Ignition Characteristics of Coal-Water Fuels with Isopropyl Alcohol Addition. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 29–39. (in Russ.) DOI: 10.14529/power210404

---