

ВОДОУГОЛЬНЫЕ СУСПЕНЗИИ: ПРИГОТОВЛЕНИЕ, СВОЙСТВА, ХАРАКТЕРИСТИКИ (КРАТКИЙ ОБЗОР)

Зенков А.В.¹, Д.В. Гвоздяков Д.В.²

^{1,2}Томский Политехнический Университет, г. Томск, Россия

¹dim2003@tpu.ru

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Представлен обзор современного состояния исследований водоугольных суспензий в России и за рубежом. Водоугольные суспензии являются перспективными альтернативными видами энергетических топлив. Их использование в энергетике позволит вырабатывать тепловую и электрическую энергию. В качестве компонент таких топлив возможно использовать достаточно широкий спектр веществ. Одними из предпочтительных являются отходы различного типа. Анализ современной литературы показал достаточно широкий спектр направлений по изучению многокомпонентных водоугольных суспензий. Проанализировано влияние добавок и компонент водоугольных суспензий на их характеристики и свойства. **ЦЕЛЬ.** Представить информацию о современном состоянии исследований в области технологий приготовления, распыления и сжигания водоугольных топлив, а также о существующих и перспективных добавках к таким суспензиям. **МЕТОДЫ.** Исследование выполнено методом сбора и структурирования информации. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Проведен обзор современного состояния исследований в области технологий приготовления, распыления и сжигания водоугольных топлив, а также существующих и перспективных добавок к таким суспензиям. Установлено, что добавки в состав суспензии жидких горючих отходов и биомассы способствует снижению времени задержки зажигания. При этом такие добавки не снижают качественных характеристик распыления многокомпонентных водоугольных суспензий. Ряд компонент позволят сократить объемы эмиссии в атмосферу продуктов сгорания таких топлив. Проанализировано влияние добавок и компонент водоугольных суспензий на их характеристики и свойства. Показано, что жидкие компоненты способствуют интенсификации процессов зажигания и горения. Также, их введение в состав топлива положительно влияет на реологические свойства суспензий, характеристики их распыления, сжигания и концентрацию вредных выбросов. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Водоугольные суспензии являются перспективными альтернативными видами энергетических топлив. Их использование в энергетике позволит вырабатывать тепловую и электрическую энергию. Введение в состав водоугольных суспензий горючих компонентов позволяет существенно улучшить реологические свойства, что может улучшить характеристики хранения и транспортировки таких топлив. Установленные положительные характеристики и свойства водоугольных суспензионных дают предпосылки для полномасштабного внедрения в промышленную энергетику таких топлив.

Ключевые слова: водоугольное топливо; водоугольная суспензия; приготовление; реологические свойства; распыление; зажигание и горение.

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 22-79-00124 (2.0046.РНФ.2022).

Для цитирования: Зенков А.В., Гвоздяков Д.В. Водоугольные суспензии: приготовление, свойства, характеристики (краткий обзор) // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 4. С.83-100. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-4-83-100.

COAL-WATER SUSPENSIONS: PREPARATION, PROPERTIES, CHARACTERISTICS (A BRIEF OVERVIEW)

AV. Zenkov¹, DV. Gvozdyakov²

^{1,2}Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

¹dim2003@tpu.ru

Abstract: *RELEVANCE.* A review of the current state of research on coal-water slurries in Russia and abroad is presented. Coal-water slurries are promising alternative types of energy fuels. Their use in the energy sector will allow generating thermal and electrical energy. It is possible to use a fairly wide range of substances as components of such fuels. One of the preferred types are various waste. The analysis of modern literature has shown a fairly wide range of directions for the study of multicomponent coal-water slurries. *THE PURPOSE.* To provide information on the current state of research in the field of technologies for the preparation, spraying and combustion of coal-water fuels, as well as on existing and promising additives to such slurries. *METHODS.* The study was carried out by the method of collecting and structuring information. *RESULTS.* The review of the current state of research in the field of technologies for the preparation, spraying and combustion of coal-water fuels, as well as existing and promising additives to such slurries, was carried out. It was found that additives of liquid combustible waste and biomass contribute to reducing the ignition delay time. At the same time, such additives do not reduce the quality characteristics of spraying multicomponent coal-water slurries. A number of components reduces the amount of emissions of combustion products of such fuels into the atmosphere. The influence of additives and components of coal-water slurries on their characteristics and properties was analyzed. It was shown that liquid components contribute to the intensification of ignition and combustion processes. In addition, their introduction into the fuel composition has a positive effect on the rheological properties of slurries, the characteristics of their spraying, combustion and the concentration of harmful emissions. *CONCLUSION.* Coal-water slurries are promising alternative types of energy fuels. The introduction of combustible components into the composition of coal-water slurries can significantly improve the rheological properties, which can improve the storage and transportation characteristics of such fuels. The established positive characteristics and properties of coal-water slurries provide prerequisites for the full-scale introduction of such fuels into industrial power engineering.

Keywords: coal-water fuel, coal-water suspension, preparation, rheological properties, sputtering, ignition and combustion.

Acknowledgements: the work was carried out with the support of the Russian Science Foundation, project 22-79-00124 (2.0046.RNF.2022).

For citation: Zenkov A.V., Gvozdyakov D.V. Coal-water suspensions: preparation, properties, characteristics (a brief overview). *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023;25(4):83-100. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-4-83-100.

Введение (Introduction)

Водоугольные суспензии (ВУС) как новый, альтернативный вид котельного топлива стали активно исследоваться во второй половине XX века. Основной причиной этого стал нефтяной кризис. Рост стоимости на энергоносители заставил многие страны, не имеющие собственных месторождений нефти, искать альтернативу углеводородному топливу – мазуту. Одним из важных преимуществ ВУС большинство исследователей называют достаточно широкий спектр компонент и возможность замены традиционных котельных топлив. При этом они являются сложными многокомпонентными веществами, свойства и характеристики которых существенно зависят от типа компонент, их количества, способа приготовления.

К настоящему времени проведено достаточно большое количество теоретических и экспериментальных исследований ВУС, например [1-8].

Авторам [3] рассмотрен механизм сгорания угольных частиц и водоугольных капель при подаче распыленного водоугольного топлива в адиабатическую вихревую камеру сгорания. Представлены данные численного моделирования процесса сжигания в камере с помощью программного модуля *ANSYS FLUENT*. Показано, что результаты численного моделирования согласуются с экспериментальными данными. Разработана методика теплового расчета топки при сжигании водоугольного топлива [4]. В [7] приведены результаты экспериментальных исследований процесса воспламенения жидкостных композитных топлив на основе воды, угля и твердых продуктов пиролиза древесины. Исследователями [8] приведены результаты расчёта рассеивания выбросов тепловой электростанции, работающей на водоугольном топливе. Показано влияние специфики сгорания водоугольной смеси на состав выброса газов сжигания.

Их изучают при помощи математического моделирования, лабораторных исследований, на опытно-промышленных установках в производственных масштабах. По их результатам установлены как преимущества, так и недостатки ВУС, влияние компонент и их количества на свойства и характеристики топлива. Немаловажным являются исследования ВУС с точки зрения экономики. Современные требования к окружающей среде также внесли существенный вклад в широкий спектр изучаемых направлений таких топлив. В результате этих многочисленных исследований учеными созданы несколько типов ВУС. Например, органоугольное топливо (ОВУТ) [9-10], биотопливо (БиоВУТ) [11-12], экологичное угольное топливо (ЭкоВУТ) [13-14], спиртоугольное топливо (СВУТ) [15-16]. Основным отличием этих топлив является их компонентный состав. Именно наличие тех или иных компонент оказывает влияние на энергетические, экологические и экономические показатели угольных суспензий.

В современной литературе результаты исследований свойств и характеристик ВУС можно разделить на следующие направления: приготовление, реологические свойства, распыление, зажигание и горение, экологические показатели. В качестве основной компоненты ВУС используют уголь [17] или отходы угольных обогатительных комбинатов – фильтр-кек [18]. В качестве основной жидкой компоненты применяется вода. С целью улучшения седиментационных свойств используют различные поверхностно-активные вещества (ПАВ) [19]. Спектр добавок в ВУС (третьих и четвертых компонент) при этом достаточно широк. Их выбор, как правило, направлен на улучшение тех или иных свойств суспензии, снижение выбросов в атмосферу антропогенных веществ, утилизацию различных видов отходов.

Цель исследования: представить наиболее цитируемую информацию о современном состоянии исследований в области технологий приготовления, распыления и сжигания угольных топлив, а также о существующих и перспективных добавках к таким суспензиям.

Научная значимость исследования заключается в сборе и структурировании существующих данных о технологиях приготовления, распыления и сжигания угольных топлив, а также о существующих и перспективных добавках к таким суспензиям.

Практическая значимость исследования: результаты исследований будут полезны ученым, конструкторам, проектировщикам, занимающихся исследованиями технологий угольных топлив (от приготовления до сжигания), созданием устройств распыления таких топлив и камер сгорания для них, а также для получения представления о современном состоянии разработок в области угольных топлив.

Приготовление угольных суспензий.

Помол угля является важным этапом в процессе приготовления ВУС [20]. Измельчение угля может осуществляться двумя способами: сухой или мокрый помол. Отличительной особенностью этих способов является то, что при мокром помоле на шаровых барабанных мельницах обеспечивается получение более стабильных суспензий, что очень важно при в случаях хранения и транспортировки топлива, с хорошими реологическими показателями. При этом, такие ВУС имеют неплохие характеристики горения в отличие суспензий, приготовленных из угольной пыли сухого помола на шаровых барабанных мельницах и последующего смешения с жидкими компонентами. Процесс приготовления ВУС из угля сухого помола показан на рис. 1. Измельченный уголь, компоненты, и обычная вода помещаются в смешивающий барабан с предварительно загруженными мелющими телами (керамические или металлические шары). После этого в течение некоторого времени осуществляется перемешивание до однородного состояния суспензии [21].

Приготовление ВУС на роторных гидродинамических генераторах кавитации (рис. 2) обеспечивает сразу несколько дополнительных механизмов измельчения: ударный, трение и кавитация. Совокупность таких воздействий на ВУС обеспечивает за счет соударения твердых частиц угля об элементы камеры кавитатора, больших скоростей и схлопывания паровых пузырьков получить достаточно гомогенизированную и стабильную суспензию [22, 23].



Рис. 1. Технология приготовления ВУС при сухом помоле угля

*Источник: составлено авторами

Technology of CWS preparation with dry grinding of coal

Source: compiled by the authors

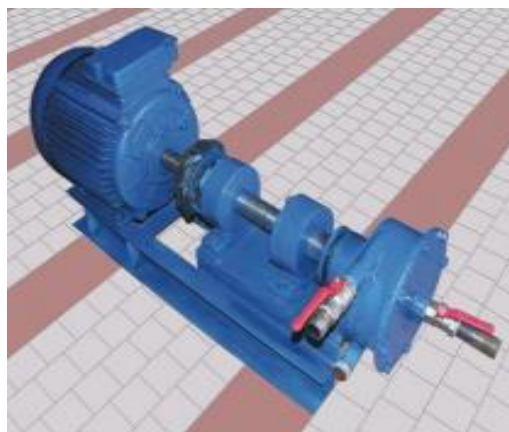


Рис. 2. Роторный гидродинамический генератор кавитации

*Источник: [21]

Rotary hydrodynamic cavitation generator

**Source: compiled [by 21]*

Для приготовления ВУС также применяется способ мокрого помола в дезинтеграторе [24]. Данный способ основан на свободном соударении частиц угля с ударными элементами корзин-роторов. При этом жидкие компоненты суспензии в соответствии с эффектом П.А. Ребиндера существенно способствуют разрушению частиц угля. Преимуществом данного способа получения ВУС являются малые энергетические и временные затраты на приготовление топлива.

Реологические свойства водоугольных суспензий

Исследованиям реологических свойств ВУС посвящено достаточно большое количество работ, например [25-28]. Необходимость изучения обусловлена тем, что такие показатели суспензии как стабильность и вязкость определяют возможность и эффективность хранения, транспортировки и распыления ВУС. Немаловажным фактором, определяющим способность суспензии к длительному хранению, является расслоение топлива [25]. Концентрации частиц угля, их гранулометрическое распределение, в зависимости от марки угля также обуславливает актуальность исследований реологических свойств. Как правило, одним из способов снижения гидравлического сопротивления при перекачивании ВУС по топливопроводу является соотношение долей мелкой и крупной фракций. Экспериментальные и теоретические исследования показали, что рост концентрации дисперсной фазы приводит к возрастанию вязкости и седиментационной устойчивости ВУС. Предельное значение концентрации (масс.) твердой компоненты суспензии на основе антрацита составляет $65 \div 66 \%$ [26].

Авторами [27] на основе результатов реологических характеристик ВУС установлено, что достижение наиболее высоких концентраций угля в суспензиях возможно в случае антрацита, но при этом системы являются наименее стабильными. При этом оптимальные концентрации пластификатора (лигносульфоната натрия), при которых наблюдаются наименьшие значения вязкости ВУС - $1,48 \text{ Па}\cdot\text{с}$, составляют $1,0\text{-}1,5 \text{ г/100 г}$ угля. Снижение вязкости водоугольных суспензий исследовано в [28]. Добавки углеродных нанотрубок и обезвоженного карбонатного шлама способствуют улучшению реологических свойств ВУС (рис. 3).

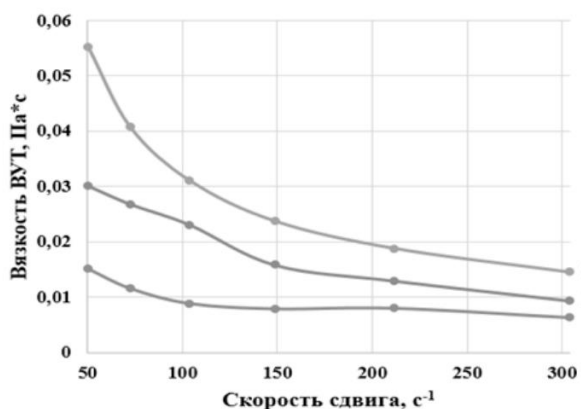


Рис. 3. Динамическая вязкость суспензий: (1), ВУТ с добавлением 0,5 мас.% карбонатного шлама (2), ВУТ с добавлением 0,0125 мас.% УНТ, диспергированных в 100 мМ растворе ДСН (3), от скорости сдвига при температуре 65°C
*Источник: [28]

Dynamic viscosity of slurries: (1), CWF with the addition of 0.5 wt.% carbonate sludge (2), CWF with the addition of 0.0125 wt.% of CNTs dispersed in 100 mM DSN solution (3) depending on the shear rate at a temperature of 65 °C
*Source: compiled by [28]

Авторами [29] установлено, что добавление поверхностно-активных веществ (ПАВ) в состав ВУТ возможно добиться достаточно низких значений вязкости топлива при массовом содержании измельченного угля от 60 до 70% (рис. 4). В работе [30] представлены результаты экспериментальных исследований морфологии ВУТ при помощи электронной микроскопии. Установлено, что одиночные частицы угля в виде взвеси хаотично распределены в объеме, а некоторые их группы образуют отдельные агломераты. Коллективом ученых [31] проанализировано влияние на изменение свойств водоугольного топлива воздействие предварительной СВЧ-обработки исходного угля (рис. 5). Показано, что такой подход позволяет снизить вязкость получаемой суспензии и, соответственно, сократить расходы при ее транспортировке по трубопроводам.

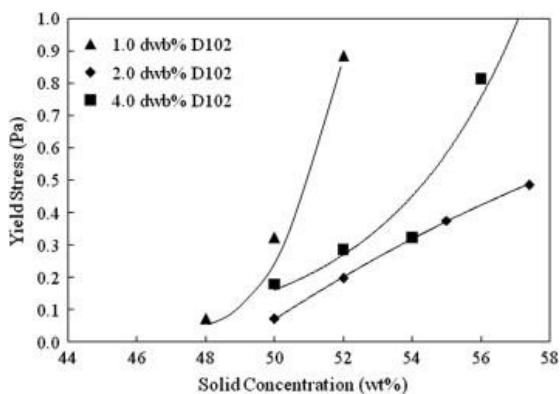


Рис. 4. Изменение текучести ВУС в зависимости от концентрации ПАВ в диапазоне от 1,0 до 4,0 % (масс.)

*Источник: [30]

The change in the fluidity of CWS depending on the concentration of surfactants in the range from 1.0 to 4.0% (wt.)

*Source: compiled by [30]

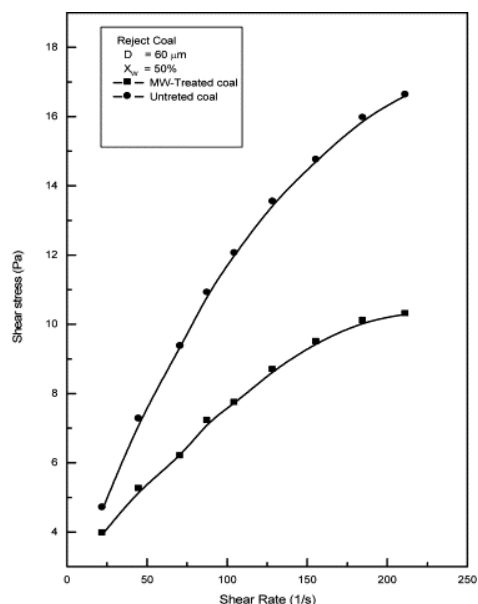


Рис. 5. Влияние СВЧ обработки на изменение динамической вязкости суспензии

*Источник: [31]

The effect of microwave treatment on the change in the dynamic viscosity of the slurry

*Source: compiled by [31]

Также, для приготовления ВУТ помимо поверхностно-активных веществ предлагается применять различного рода растворители органического происхождения [32]. Авторами [32] доказано, что такой подход позволяет разрушать водородные связи и увеличивать площадь поверхности активации в процессе сжигания ВУТ.

Результаты экспериментальных исследований вязкости и стабильности топливных суспензий представлены в [33]. Исследовано 30 композиций, полученных из угольных шламов, лигнита и каменного угля. В качестве добавок использовались древесные опилки, отработанное турбинное масло, крахмал, неонол, ксантановая и гуаровая камеди. Вязкость топливных композиций варьировалась от 106,89 до 2030,17 мПа·с при скорости сдвига 100 с⁻¹. Добавление до 10 % отработанного масла или древесных опилок повышало вязкость шлама в среднем на 50–70 %. Когда доли нефти и биомассы превышали 5% и 10% соответственно, пульпа теряла текучесть. Установлено, что массовая доля твердой части в топливах на основе угольных шламов должна быть ограничена величиной $\approx 55\%$, если планируется распыление или трубопроводный транспорт. Многофакторную оценку эффективности топливной смеси проводили с использованием шести различных вариантов распределения значимости (весового коэффициента) рассматриваемых факторов. Установлено, что наиболее предпочтительными являются топливные смеси на основе угольных шламов (т.е. отходов углепереработки) и воды. Показано, что вязкость многих топливных смесей на основе угольных шламов соответствует условиям промышленного применения топливных суспензий и жидкостей.

Материалы и Методы (Materials and methods)

Устройства распыления водоугольных суспензий

Распыление водоугольной суспензии новой пневматической форсункой и его сжигание представлено в [34]. Сопло форсунки состоит из цилиндрического корпуса (внутри которого расположены газовая камера с кольцевым коническим отверстием и каналом с диффузорным соплом для подачи топлива) и соединительной арматуры (рис. 6). Диаметр корпуса 80 мм, длина корпуса 50 мм, диаметр канала 8 мм, ширина кольцевого зазора 1 мм, диаметр выходного отверстия диффузора 23, угол раскрытия диффузора 60°.

Влияние геометрии форсунки на распыление водоугольной суспензии исследовано в [35]. Для исследования разработаны три комплекта горелок с различной конструкцией (рис. 7). Конкретные конструктивные параметры трех комплектов горелок показаны в фале с дополнительной информацией 1. Среди них d_1 , d_2 , d_3 - внутренний диаметр центрального канала, внутренний диаметр и наружный диаметр кольцевого канала, A_1 , A_2 - площади центрального канала и кольцевого канала соответственно. Каждая горелка оборудована циркуляционной системой водяного охлаждения.

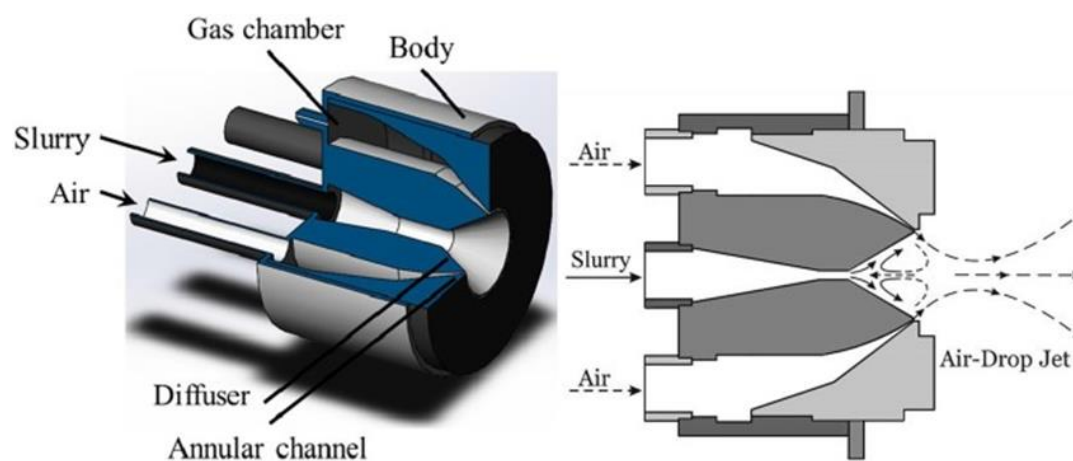


Рис. 6. Форсунка для распыления водоугольного топлива [34]

Nozzle for spraying coal-water fuel [34]

*Источник: [34]

*Source: compiled by [34]

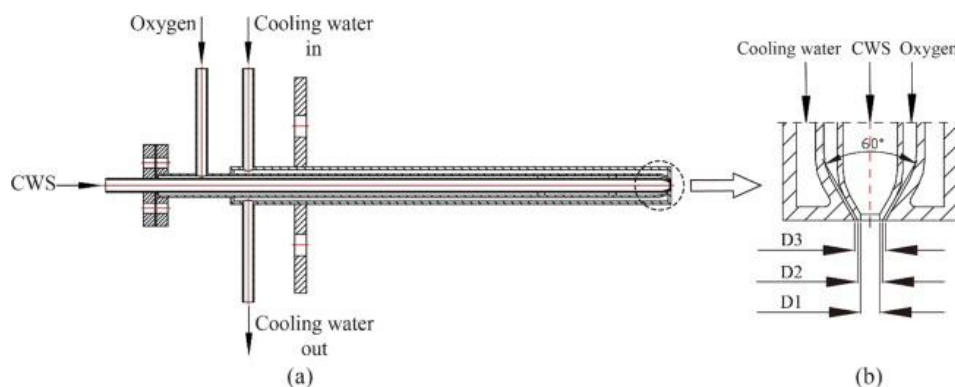


Рис. 7. Устройство распыления ВУС [35]

CWS spraying device [35]

*Источник: [35]

**Source: compiled by [35]*

Форсунка с внутренним смешением жидкости и распыляющего агента [36] позволяет формировать после распыления мелкодисперсную струю. Устройство имеет камеру смешения ВУС и распыляющего агента. Данный тип устройства распыления ВУС имеет внутреннюю камеру смешения топлива и воздуха. Недостатком данного типа форсунки является высокая вероятность засорения именно камеры смешения. В форсунках такого типа необходимо очень внимательно контролировать давление топлива и распыляющего агента с целью исключить задувание ВУС распыляющим агентом.

Результаты экспериментальных исследований износостойких керамических, твердосплавных и металлических форсунок водоугольно-шламовых котлов представлены в [37]. Форсунка (рис. 8) имеет внутренний диаметр 5,0 мм, внешний диаметр 12,0 мм и длину 10,0 мм. Конструкция используемой форсунки достаточно проста. Основной целью исследований являлась изучение эрозийного износа канала форсунки и его сопла. Топливный канал форсунок данных конструкций также с высокой долей вероятности подвержен засорению крупными частицами угля или агломератами ВУС. Усугубляется это может еще тем, что в процессе эксплуатации таких форсунок возможны сколы материала, из которого изготовлена форсунка.

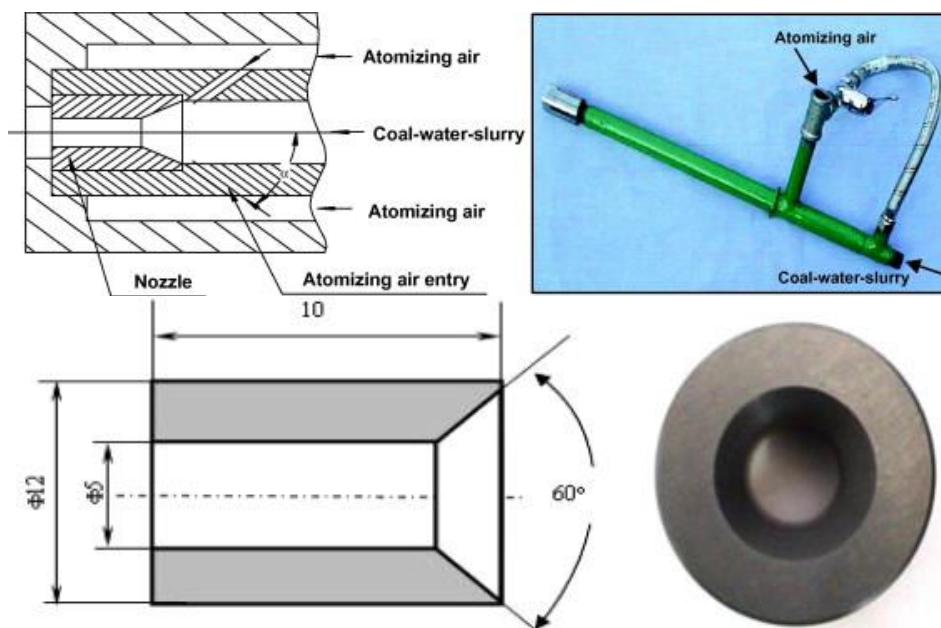


Рис. 8. Форсунка для распыления водоугольно-шламовых топлив [37]

Nozzle for spraying coal-water-slurry fuels [37]

*Источник: [37]

**Source: compiled by [37]*

Характеристики распыления суббитуминозного угля и водной суспензии нефтяного кокса из двухжидкостного вихревого распылителя с внутренним смешиванием исследованы

в [38]. Используемая форсунка имеет три входных отверстия для завихрения воздуха на основном жидкостном сердечнике, расположенном в смесительной камере внутри сопла. Затем двухфазный поток сталкивается с ударной пластиной, которая способствует дальнейшему перемешиванию. После чего, двухфазная смесь выходит из сопла через кольцевой канал, образованный штифтом. Данный тип устройства распыления ВУС имеет внутреннюю камеру смешения топлива и воздуха.

Распыление водоугольных суспензий (*Spraying of coal-water slurries*)

Распыление и разбрызгивание ВУС как правило изучается экспериментально, например [39-43]. Результаты исследований различных типов форсунок представлено в [39]. Установлено, что снижение вязкости ВУТ существенно улучшает качество распыления. Это способствует гомогенизации струи после распыления, например, форсункой с шипучим распылителем [40]. Следует отметить, что такой подход позволяет разделять жидкую и твердую компоненту ВУТ после распыления, что положительно скажется на характеристиках зажигания топлива. Эффективность распыления ВУТ двухструйной форсунки представлена в [41] (рис. 9). Установлено, что траектории капель топлива малых размеров при таком распылении ориентированы под небольшим углом относительно продольной оси распыления. Авторами [42] установлено, что при введении в состав водоугольных топлив достаточно типичных и доступных спиртов позволяет увеличить число капель малых размеров на 6-13% в сравнении с двухкомпонентным ВУТ (рис. 10).

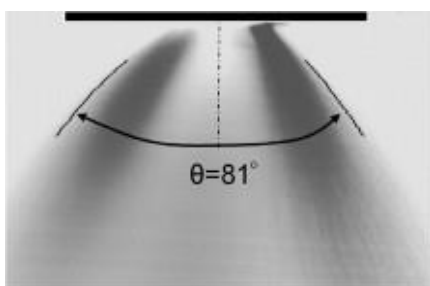


Рис. 9. Распыление ВУС двухструйной форсункой [41] *Spraying of CWS with a two-jet nozzle [41]*

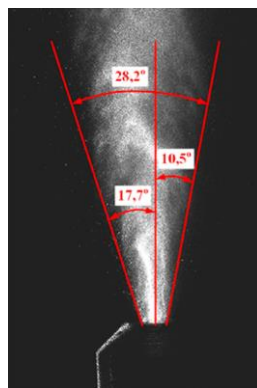


Рис. 10. Распыление ВУС форсункой с внутренним смешением [42] *Spraying of CWS with an internal mixing nozzle [42]*

*Источник: [41]

*Source: compiled by [41]

*Источник: [42]

*Source: compiled by [42]

В [43] проанализировано влияние параметров (расход, вязкость и плотность жидкости) на характеристики распыления. В качестве испытательных жидкостей использовались силиконовые масла разной вязкости. Установлено, что при высоких соотношениях газа к топливу, скорость частиц на центральной оси снижается, а скорость в радиальных положениях выше. Скорость также увеличивается по мере дальнейшего увеличения радиального расстояния от оси. При этом распределение скоростей не меняется после того, как радиальное расстояние достигает определенного предела. Этот предел уменьшается с увеличением осевой длины. Повышение вязкости увеличивает инерционную силу жидкой текучей среды, поэтому необходимо увеличить импульс распыляемого газа, чтобы он создавал достаточное напряжение сдвига в текучей среде и улучшал характеристики распыления.

Зажигание и горение водоугольных суспензий

Экспериментальные и численные исследования характеристик зажигания и горения ВУС представлены в [44-49]. Например, в [44] экспериментально установлено, что на характеристики зажигания и горения существенное влияние оказывает конвективный теплообмен. Время зажигания одиночных капель радиусом 0,25-1,5 мм при скорости окислителя возможно сократить на 20-25 секунд. Коллективом ученых [45] исследовано влияние электромагнитной обработки ВУТ на характеристики зажигания и горения. Показано, такая обработка позволяет снизить время задержки зажигания на 7,5%, температура горения при этом возрастает на 5%. Результаты экспериментальных исследований [46] показали возможность эффективного совместного сжигания отходов

нефтепродуктов с водоугольным топливом. Авторами [47] представлены результаты численного моделирования и эксперимента. Установлено, что математическое моделирование с достаточной точностью позволяет выполнять прогностические расчеты зажигания и горения капель ВУТ и при этом учитывать интенсивный нагрев, испарение влаги и термохимические реакции и т.д. Характеристики зажигания водоугольных топлив на основе лигнита и жидких продуктов пиролиза древесных отходов исследованы в [48] (рис. 11).

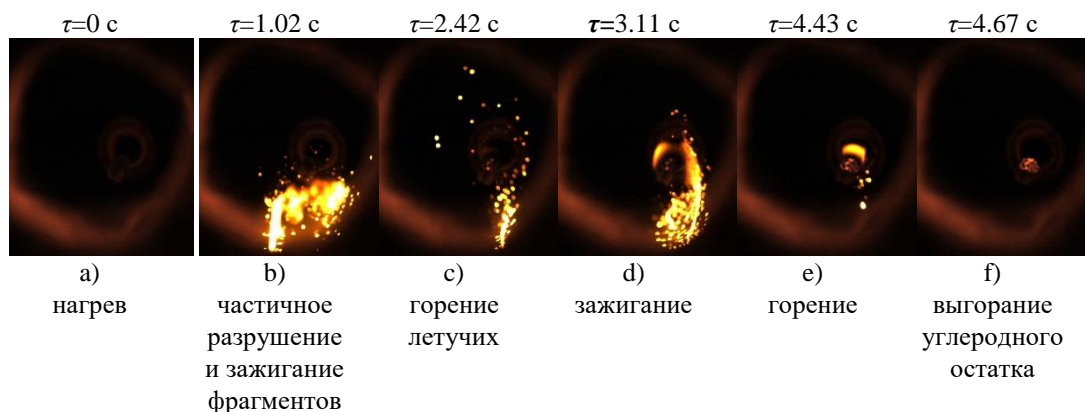


Рис. 11. Зажигание одиночных капель ВУС с добавками пирогенетической жидкости [48]

*Источник: [48]

Ignition of single drops of CWS with pyrogenetic liquid additives [48]

**Source: compiled by [48]*

Авторами [48] установлено, что время задержки зажигания одиночной капли суспензии (при температуре окислителя 1273) к увеличивается на 23% в сравнении с двухкомпонентным водоугольным топливом при замещении угля жидкими продуктами пиролиза древесных отходов (не более 10%). В случае замещения воды аналогичным по массе количеством третьей компоненты (до 10% по массе) и постоянной концентрации угля время задержки зажигания одиночной капли топлива (при температуре окислителя 1273) снижается на 26%.

Характеристики воспламенения и процессы горения угольного шлама исследованы в [49]. На основе экспериментальных результатов сделаны выводы о некоторых явлениях и закономерностях, которые могут способствовать дальнейшим исследованиям сжигания угольного шлама в котлах с псевдоожиженным слоем и способствовать полной утилизации угольного шлама. Установлено, что задержка воспламенения увеличивается с ростом расхода кислорода в диапазоне 0–30 л/мин. Когда концентрация кислорода достигает 100 %, задержка воспламенения уменьшается по мере увеличения скорости потока. Однако время задержки воспламенения сначала уменьшается, а затем увеличивается по мере того, как скорость потока продолжает увеличиваться, и O_2 % = 15–80 %, когда скорость потока достигает 5 л/мин.

Экологические показатели продуктов сгорания водоугольных суспензий

Экологические характеристики ВУС исследованы представлены в [50–54]. Например, коллективом исследователей [50] экспериментально исследовано влияние компонентного состава продуктов сгорания композитных топлив с различными добавками. Установлено, что количество оксидов серы при сжигании суспензии в составе с биомассой сокращается на 12%. При увеличении температуры в зоне горения на 300 К количество оксидов азота и серы увеличивается в 1,2–2,8 раза. Результаты экспериментальных исследований [51] показали высокую эффективность сжигания ВУТ в атмосфере кислорода. Концентрация оксидов азота в таких условиях снижается на 85%. Экспериментально исследованы [52] экологические и энергетические показатели, характеризующие горение перспективных водоугольных суспензий на основе отходов переработки угля, рапсового масла и воды. Установлено, что наиболее перспективным по экологическим характеристикам является состав на основе 90% отходов переработки угля и 10% рапсового масла. Определен состав, устойчиво подвергающийся интенсивному микровзрывному дроблению. Он основан на 9% отходов переработки угля, 10% воды и 81% рапсового масла. При этом, микровзрывное дробление материнской капли обеспечивает значительное увеличение площади поверхности шлама. Последнее увеличивает тепловыделение в единицу времени из-за выгорания топлива.

Анализ литературы показал, что водоугольные топлива достаточно активно изучаются несколько последних десятилетий. Несмотря на всесторонние исследования и широкий спектр положительных качеств ВУТ, такие топлива особо не внедряются в большой и малой энергетике. В первую очередь это связано с содержанием в них воды (40–60% по массе). В результате чего их теплотворная способность существенно уступает (примерно на 50%) обычному углю. В целом, с учетом отрицательных качеств, основной недостаток водоугольных топлив обусловлен их низкой реакционной способностью в зоне воспламенения (большие времена задержки зажигания – до 30 с). При этом, различного рода добавки к ВУТ и их количество могут существенно снизить времена задержки зажигания, но при этом, после распыления таких топлив будут образовываться достаточно крупные капли (диаметром более 1,5 мм). Одной из причин этого является увеличение вязкости и плотности топлива. В результате чего снова ухудшатся характеристики их зажигания и горения в камерах сгорания.

Антропогенные выбросы от сжигания смесевых топлив на основе угля исследованы в [53]. В данном исследовании экспериментально изучены концентрации наиболее опасных газообразных антропогенных выбросов (CO_2 , SO_2 , NO) от сжигания топлива на основе отходов. Установлены условия, при которых возможно снижение концентрации дымовых газов от сжигания исследуемых составов (замещение угольной части водой, инъекция паров воды, добавка биомассы, подбор температурного диапазона). Воздействие паров воды определяли при их вдувании в зону химической реакции вместе с воздухом и при их естественном образовании путем испарения из пробы топлива. В отличие от биомассы, снижающей выбросы оксидов серы из смесевых топлив за счет механического разбавления смеси, водяной пар, находящийся в зоне гетерогенной реакции, снижает газообразные техногенные выбросы за счет химических реакций и превращения части топливной серы и азота в неактивную форму (нейтральная к окружающей среде).

Влияние растительных добавок на концентрацию оксидов серы и азота в продуктах сгорания водоугольных шламов, содержащих нефтепродукты представлено в [54]. Установлено, что концентрация оксидов серы и азота может быть снижена на 62–87 % и 12–57 % соответственно при использовании малых масс растительных добавок (не более 10 мас. %) и сохранении высокой теплоты сгорания. Однако использование водорослей и соломы в составе навозной жижи может увеличить выбросы HCl , что требует дополнительных мер по борьбе с коррозией. Был сформулирован обобщающий критерий соотношения топливной суспензии и эффективности использования угля, чтобы проиллюстрировать существенные преимущества добавления твердых отходов завода к водоугольным суспензиям, содержащим нефтехимические. Лучшими добавками для снижения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу признаны солома и отходы подсолнечника (10 мас. %).

Компоненты водоугольных суспензий

В качестве компонент и добавок ВУС используются различные вещества. Как отмечалось выше, введение их в состав суспензий способствуют повышению эффективности сжигания таких топлив. Наиболее широко исследуются различные отходы [55–58], в том числе и производственные [48, 59–62]. Их влияние на процессы хранения (транспортировки), распыления, сжигание и экологические характеристики представлены в таблице 1.

Компоненты ВУС
CWS components

Агрегатное состояние	Тип компоненты	Эффект
Твердое	Отходы лесопереработки [55]	Существенное снижение времени задержки зажигания
	Минеральные примеси (в том числе оксиды металлов) [56]	Теплоемкость ВУС уменьшается с увеличением содержания минеральных добавок
	Фильтр-кек [57]	Сокращение объемов отходов углеобогащения, снижение выбросов оксидов серы в дымовых газах
	Нanomатериалы (углеродный наноматериал, обезвоженный карбонатный шлам) [58]	Улучшение реологических свойств ВУС
Жидкие	Пиролизная жидкость (вода) [48]	Снижение среднего размера капель ВУС после распыления и времен задержки зажигания

	Сточные воды (промышленные) [59]	Утилизация отходов, улучшение реологических свойств ВУС
	Отработанное масло [60]	Снижение времени задержки зажигания
	Рапсовое масло [61]	Интенсификация пламенного горения,
	Пиролизная нефть [62]	Снижение среднего размера капель ВУС после распыления

**Источник: составлено авторами на основе источников литературы, указанных в таблице*

Source: compiled by the authors based on the references listed in the table

Анализ наиболее популярных жидких компонент ВУС показал, что их использование довольно существенно улучшает характеристики суспензионных топлив. При этом следует отметить, что такие жидкие отходы как пиролизные жидкости могут найти широкое применение в качестве компонент ВУС. Одним из источников их получения является термическая переработка отходов лесопиления. Его привлекательность заключается в экологичности процесса и возможности получения полезных продуктов, таких как полукокс, горючий газ и пиролизное масло. Получение последнего сопровождается образованием пирогенетической жидкости ("балластового" компонента продукта), что обусловлено высокой влажностью исходного сырья (древесина). Прямая утилизация (сброс в систему канализации, отвод в почву или на открытый грунт) такой жидкости невозможна. Связано это с содержанием в ней опасных для окружающей среды соединений, таких как фенолы. При этом пирогенетическая жидкость обладает энергетической ценностью (содержит остаточные углеводороды пиролизного масла) и может быть эффективно использована в качестве компонента котельных топлив. Одним из таких видов топлива являются водоугольные суспензии. Их использование позволяет обеспечить ряд преимуществ производителям электрической и тепловой энергии по критериям энергетики, экологии и экономики.

Заключение (Conclusions)

Водоугольные суспензии являются перспективными альтернативными видами энергетических топлив. Их использование в энергетике позволит вырабатывать тепловую и электрическую энергию. В качестве компонент таких топлив возможно использовать достаточно широкий спектр компонент. Одними из предпочтительных являются отходы различного типа. Введение их в состав водоугольных суспензий позволяет существенно улучшить реологические свойства, что может улучшить характеристики хранения и транспортировки таких топлив. Добавки в состав суспензии жидких горючих отходов и биомассы способствует снижению времени задержки зажигания. При этом такие добавки не снижают качественных характеристик распыления многокомпонентных водоугольных суспензий. Ряд компонент позволят сократить объемы эмиссии в атмосферу продуктов сгорания таких топлив. Установленные положительные характеристики и свойства водоугольных суспензионных дают положительные предпосылки для полномасштабного внедрения в промышленную энергетику таких топлив. Проанализировано влияние добавок и компонент водоугольных суспензий на их характеристики и свойства. Показано, что жидкие компоненты способствуют интенсификации процессов зажигания и горения. Также, их введение в состав топлива положительно влияет на реологические свойства суспензий, характеристики ее распыления, сжигания и концентрацию вредных выбросов.

Литература

1. Бекмуратова, Б. Т. Применение водоугольного топлива в теплоэнергетике / Б. Т. Бекмуратова // Бюллетень науки и практики. – 2020. – Т. 6. – № 12. – С. 261-267. – DOI 10.33619/2414-2948/61/27. – EDN YONJIV.
2. Патент на полезную модель № 87700 U1 Российская Федерация, МПК C10L 1/32, B01F 11/02. Технологическая линия для производства водоугольного топлива и его сжигания : № 2009120319/22 : заявл. 28.05.2009 : опубл. 20.10.2009 / С. В. Алексеенко, Л. В. Карташова, И. В. Кравченко [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "ТеплоПром". – EDN YROADP.
3. Результаты численного моделирования процесса сжигания водоугольного топлива / В. И. Мурко, А. Риестерер, С. А. Цепорина [и др.] // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2-1. – С. 230-234. – EDN NUTCBT.

4. Флек, Е. С. Особенности расчета теплообмена в топке котельной установки при сжигании водоугольного топлива / Е. С. Флек // Омский научный вестник. – 2017. – № 1(151). – С. 70-73. – EDN YICGTF.

5. Патент № 2036955 С1 Российская Федерация, МПК C10L 1/32. Способ приготовления водоугольного топлива из бурых углей : № 5051567/04 : заявл. 09.07.1992 : опубл. 09.06.1995 / Г. Н. Делягин; заявитель Научно-производственное объединение "Гидротрубопровод". – EDN NNOPL.

6. Белогурова, Т. П. Исследование золоотходов на основе кавитированного водоугольного топлива / Т. П. Белогурова, А. В. Цыратьева // Наукоемкие технологии и инновации : Юбилейная Международная научно-практическая конференция, посвященная 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова (XXI научные чтения), Белгород, 09–10 октября 2014 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2014. – С. 49-53. – EDN TGVOSV.

7. Малышев, Д. Ю. Использование твердых продуктов пиролиза древесины в качестве добавки к водоугольным суспензиям / Д. Ю. Малышев, С. В. Сыродой // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век : Материалы XVII международной научно-практической конференции, Орёл, 02–04 декабря 2019 года. – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2019. – С. 281-284. – EDN MRVUXN.

8. Калинин, О. Н. Природоохранные аспекты внедрения технологии сжигания водоугольного топлива / О. Н. Калинин // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2019. – № 5(139). – С. 84-89. – EDN ZYHHWM.

9. Курганкина М.А., Вершинина К.Ю., Озерова И.П., Медведев В.В. К вопросу о переходе тепловых электрических станций с традиционных топлив на органоводоугольные топливные композиции. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 9. С. 72-82.

10. Вершинина, К. Ю. Характеристики зажигания капель органоводоугольных топлив на основе отработанных и промышленных масел / К. Ю. Вершинина, Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // Химия твердого топлива. – 2017. – № 3. – С. 63-69. – DOI 10.7868/S0023117717030100. – EDN YTAJOX.

11. 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. – DOI 10.18799/24131830/2020/6/2677. – EDN RPUFSD.

12. Малышев, Д. Ю. Влияние характерного размера капель био-водоугольного топлива на времена задержки зажигания / Д. Ю. Малышев, С. В. Сыродой // Наука молодых - будущее России : Сборник научных статей 4-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых. В 8-ми томах, Курск, 10–11 декабря 2019 года / Ответственный редактор А.А. Горохов. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. – С. 118-122. – EDN KYMWUY.

13. Сазанов, Б.В. Промышленные теплоэнергетические установки и системы: учеб. пособие для вузов [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Б.В. Сазанов, В.И. Ситас. — Электрон. дан. — Москва : Издательский дом МЭИ, 2014. — 275 с.

14. Патент № 2144059 С1 Российская Федерация, МПК C10L 1/32. Топливо : № 99102408/04 : заявл. 04.02.1999 : опубл. 10.01.2000 / Г. Н. Делягин, С. В. Ерохин, Г. П. Силенко [и др.]; заявитель Делягин Геннадий Николаевич, Ерохин Сергей Федорович, Силенко Георгий Петрович [и др.].

15. Эпштейн, С. А. Морфологические и термохимические превращения бурого угля при баротермической обработке спиртоводоугольного топлива / С. А. Эпштейн, Д. С. Худяков, Е. Г. Горлов // Химия твердого топлива. – 2004. – № 2. – С. 35-40. – EDN OXODPP.

16. Исследование характеристик распыления и зажигания водоугольных топлив с добавлением изопропилового спирта / Д. В. Гвоздяков, А. В. Зенков, В. Е. Губин [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2021. – Т. 21. – № 4. – С. 29-39. – DOI 10.14529/power210404. – EDN TRRWIE.

17. Баранова, М. П. Сжигание водоугольных суспензионных топлив из низкометаморфизованных углей / М. П. Баранова, Т. А. Кулагина, С. В. Лебедев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – № 9. – С. 24-26. – EDN TMLUHW.

18. Олейникова М.И. Получение водоугольного топлива из шламов углеобогащения. Охрана окружающей среды и заповедное дело. 2020. № 1. С. 132-144.

19. Баранова, М. П. Влияние пластифицирующих добавок на реологические характеристики водоугольных суспензий из углей разной степени метаморфизма / М. П.

Баранова // Труды Красноярского государственного технического университета. – 2006. – № 2-3. – С. 143-147. – EDN HJJJDM.

20. Борзов, А. И. Приготовление водоугольных суспензий из бурых углей с использованием различных мельничных устройств / А. И. Борзов, М. П. Баранова // Химия твердого топлива. – 2006. – № 4. – С. 40-45. – EDN HVJHKZ.

21. С.В. Алексеенко, Л.И. Мальцев, И.В. Кравченко, А.А. Дектерев, В.А. Кузнецов. Обзор работ по приготовлению водоугольного топлива и его сжиганию в котлах. Горение и плазмохимия. 19 (2021) 265-277.

22. Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Губин В.Е., Ведяшкин М.В. К вопросу об исследовании структуры потока водоугольного топлива в процессе его пневмомеханического распыла. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2018. Т. 18. № 4. С. 5-12.

23. Мальцев Л.И., Кравченко И.В., Кравченко А.И., Самборский В.Е. Прикладные аспекты технологии приготовления и сжигания водоугольного топлива. Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2011. № 1 (6). С. 25-30.

24. Морозов А.Г., Коренюгина Н.В. Гидроударные технологии в производстве водоугольного топлива. Уголь. 2009. № 11 (1003). С. 54-56.

25. Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О., Мирошникова М.В. Экспериментальные исследования реологических характеристик и гидравлических параметров транспортирования водоугольного топлива. International scientific and practical conference world science. 2017. Том 1. №12 (28). С. 35-42.

26. Егурнов А.И., Борок С.Д., Тевтуль Я.Ю. Взаимосвязь параметров состояния водоугольного суспензионного топлива. Современная наука. Исследования, идеи, результаты, технологии. 2014. №2. 15. 49-53.

27. Савицкий Д.П., Макаров А.С., Егурнов А.И. Физико-химические свойства водоугольного топлива. Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2012. №1 (9). С. 10-14.

28. Э.Р. Зверева, Г.Р. Ахметвалиева, А.О. Макарова, Д.В. Ермолаев, Ю.К. Монгуш, А.Р. Шайхутдинова, О.С. Зуева. Изменение реологических свойств водоугольных суспензий в присутствии наноматериалов. Вестник казанского государственного энергетического университета. 2017. №3 (35). С. 76-83.

29. R. Chen, M. Wilson, Y.K. Leong, P. Bryant, H. Yang, D.K. Zhang. Preparation and rheology of biochar, lignite char and coal slurry fuels. Fuel, 90 (4) (2011), pp. 1689-1695.

30. Agnieszka Kijo-Kleczkowska. Combustion of coal-water suspensions. Fuel. Volume 90, Issue 2, February 2011, Pages 865-877.

31. B. C. Meikap, N. K. Purohit, V. Mahadevan. Effect of microwave pretreatment of coal for improvement of rheological characteristics of coal–water slurries. Journal of Colloid and Interface Science. Volume 281, Issue 1, 1 January 2005, Pages 225-235.

32. Y.-J. Shin, Y.-H. Shen. Preparation of coal slurry with organic solvents. Chemosphere, 68 (2) (2007), pp. 389-393.

33. G.V. Kuznetsov, S. Romanov, K.Yu. Vershinina, P.A. Strizhak. Rheological characteristics and stability of fuel slurries based on coal processing waste, biomass and used oil. Fuel. Volume 302, 15 October 2021, 121203.

34. E.Yu. Shadrin, I.S. Anufriev, E.B. Butakov, E.P. Kopyev, S.V. Alekseenko, L.I. Maltsev, O.V. Sharypov. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner. Fuel. Volume 303, 1 November 2021, 121182.

35. Xiaoxiang Wu, Qinghua Guo, Yan Gong, Jieyu Liu, Xiang Luo, Tao Wu, Guangsu Yu. Influence of burner geometry on atomization of coal water slurry in an entrained-flow gasifier. Chemical Engineering Science. Volume 247, 16 January 2022, 117088.

36. D.V. Gvozdyakov, A.V. Zenkov, S.V. Lavrinenko, Ya.V. Marysheva, K.B. Larionov. Spraying characteristics of alcohol-coal-water slurries with low coal content. Chemical Engineering & Technology. 2022. Vol. 45, iss. 5. P. 936-945.

37. Deng Jianxin, Ding Zeliang, Zhou Houming, Tan Yuanqiang. 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. Volume 27, Issue 5, September 2009, Pages 919-926.

38. Stephane G. Daviault, Omar B. Ramadan, Edgar A. Matida, Patrick M. Hughes, Robin Hughes. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer. Fuel. Volume 98, August 2012, Pages 183-193.

39. Ping Lu, Mingyao Zhang. Experimental investigation on atomizing characteristics of coal-water paste for pressurized fluidized bed. *Fuel*. Volume 83, Issue 16, November 2004, Pages 2109-2114.
40. Xiuyuan Ma, Yufeng Duan, Meng Liu. Atomization of petroleum-coke sludge slurry using effervescent atomizer. *Experimental Thermal and Fluid Science*. Volume 46, April 2013, Pages 131-138.
41. Stephane G. Daviault, Omar B. Ramadan, Edgar A. Matida, Patrick M. Hughes, Robin Hughes. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer. *Fuel*. Volume 98, August 2012, Pages 183-193.
42. Dmitry Gvozdyakov, Andrey Zenkov. Improvement of atomization characteristics of coal-water slurries. *Energy*. Volume 230, 1 September 2021, 120900.
43. Hsu, T.C., Yang, S.I. Viscosity effects of spray characteristics in air-blast atomizer. *Key Engineering Materials*. Volume 656-657, 2015, Pages 142-147.
44. D.O. Glushkov, S.V. Syrodoy, A.V. Zakharevich, P.A. Strizhak. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: analysis of key aspects. *Fuel Process. Technol.*, 148 (2016), pp. 224-235.
45. V.A. Pinchuk, T.A. Sharabura, A.V. Kuzmin. Improvement of coal-water fuel combustion characteristics by using of electromagnetic treatment. *Fuel Processing Technology*. Volume 167, 1 December 2017, Pages 61-68.
46. Jianguo Liu, Xiumin Jiang, Lingsheng Zhou, Hui Wang, Xiangxin Han. Co-firing of oil sludge with coal-water slurry in an industrial internal circulating fluidized bed boiler. *Journal of Hazardous Materials*. Volume 167, Issues 1–3, 15 August 2009, Pages 817-823.
47. V.V. Salomatov, G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.Y. Gutareva. Ignition of coal-water fuel particles under the conditions of intense heat. *Applied Thermal Engineering*. Volume 106, 5 August 2016, Pages 561-569.
48. D.V. Gvozdyakov, A.V. Zenkov, A. Zh. Kaltaev. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liquid pyrolysis products of wood waste. *Energy*. Volume 257, 15 October 2022, 124813.
49. Kun Zhou, Qizhao Lin, Hongwei Hu, Huiqing Hu, Lanbo Song. The ignition characteristics and combustion processes of the single coal slime particle under different hot-coflow conditions in N_2/O_2 atmosphere. *Energy*. Volume 136, 1 October 2017, Pages 173-184.
50. A.D. Nikitin, G.S. Nyashina, A.F. Ryzhkov, P.A. Strizhak. Anthropogenic emissions from the combustion of composite coal-based fuels. *Sci. Total Environ.*, 772 (2021), p. 144909.
51. Christian Gaber, Philipp Wachter, Martin Demuth, Christoph Hochenauer. Experimental investigation and demonstration of pilot-scale combustion of oil-water emulsions and coal-water slurry with pronounced water contents at elevated temperatures with the use of pure oxygen. *Fuel*. Volume 282, 15 December 2020, 118692.
52. D.V. Antonov, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak, D.S. Romanov. Micro-explosive droplet fragmentation of environmentally promising coal-water slurries containing petrochemicals. *Fuel*. Volume 283, 1 January 2021, 118949.
53. A.D. Nikitin, G.S. Nyashina, A.F. Ryzhkov, P.A. Strizhak. Anthropogenic emissions from the combustion of composite coal-based fuels. *Science of The Total Environment*. Volume 772, 10 June 2021, 144909.
54. G.S. Nyashina, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak. Effects of plant additives on the concentration of sulfur and nitrogen oxides in the combustion products of coal-water slurries containing petrochemicals. *Environmental Pollution*. Volume 258, March 2020, 113682.
55. Сыродой С.В., Малышев Д.Ю., Косторева Ж.А. Совместное зажигание водоугольной суспензии и древесной биомассы. *Промышленная энергетика*. 2020. № 5. С. 44-49.
56. Пинчук В.А., Шарабура Т.А., Кузьмин А.В. Экспериментальные исследования коэффициента теплопроводности и теплоемкости водоугольного топлива. *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. 2016. № 1 (17). С. 55-67.
57. Мурко В.И., Таилаков О.В., Хмяляинен В.А., Шеховцова В.О. Развитие экологически чистых технологий по использованию отходов обогащения и сжигания угля. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2016. № 10. С. 249-258.
58. Зверева Э.Р., Ахметвалиева Г.Р., Макарова А.О., Ермолаев Д.В., Монгуш Ю.К.О., Шайхутдинова А.Р., Зуева О.С. Изменение реологических свойств водоугольных суспензий в присутствии наноматериалов. *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2017. № 3 (35). С. 76-83.

59. Кравченко О.В., Андриенко Е.Ю. Энергетические и экологические аспекты использования фенольных сточных вод в качестве компонента водоугольных топлив. *Экология и промышленность*. 2011. № 3 (28). С. 67-71.

60. Ksenia Yu. Vershinina, Vadim V. Dorokhov, Daniil S. Romanov, Pavel A. Strizhak. Combustion dynamics of droplets of aqueous slurries based on coal slime and waste oil. *Journal of the Energy Institute*. Volume 104, October 2022, Pages 98-111.

61. Ksenia Yu. Vershinina, Vadim V. Dorokhov, Daniil S. Romanov, Pavel A. Strizhak. Combustion stages of waste-derived blends burned as pellets, layers, and droplets of slurry. *Energy*. Volume 251, 15 July 2022, 123897.

62. Dmitriy Gvozdyakov, Andrey Zenkov. Influence of petrochemicals on jet characteristics after coal-water fuel spraying. *Fuel Processing Technology*. Volume 218, July 2021, 106864.

Авторы публикации

Зенков Андрей Викторович – канд. техн. наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Томского Политехнического Университета. *ORCID 0000-0002-7763-3266*, *avz41@tpu.ru*.

Гвоздяков Дмитрий Васильевич – канд. техн. наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Томского Политехнического Университета. *ORCID 0000-0002-7866-9180*, *dim2003@tpu.ru*.

References

1. Bekmuratova, B. T. The use of coal-water fuel in thermal power engineering / B. T. Bekmuratova. *Bulletin of Science and practice*. 2020. Vol. 6. No. 12. pp. 261-267. DOI 10.33619/2414-2948/61/27. EDN YONJIV.

2. Utility model Patent No. 87700 U1 Russian Federation, IPC C10L 1/32, B01F 11/02. Technological line for the production of coal-water fuel and its combustion : No. 2009120319/22 : application 28.05.2009 : publ. 20.10.2009 / S. V. Alekseenko, L. V. Kartashova, I. V. Kravchenko [et al.] ; applicant Limited Liability Company «TeploProm». EDN YROADP.

3. Results of numerical modeling of the process of burning coal–water fuel / V. I. Murko, A. Riesterer, S. A. Tsetsorina [et al.]. *Polzunovsky vestnik*. 2011. № 2-1. pp. 230-234. EDN NUTCBT.

4. Fleck, E. S. Features of calculation of heat exchange in the furnace of a boiler plant when burning coal-water fuel / E. S. Fleck. *Omsk scientific Bulletin*. 2017. № 1(151). Pp. 70-73. EDN YICGTF.

5. Patent No. 2036955 C1 Russian Federation, IPC C10L 1/32. Method of preparation of coal-water fuel from brown coals : No. 5051567/04 : application. 09.07.1992 : publ. 09.06.1995 / G. N. Delyagin; applicant Scientific and Production Association "Hydrotruboprovod". EDN NNOPL.

6. Belogurova, T. P. *Research of ash wastes based on cavitated coal-water fuel* / T. P. Belogurova, A.V. Tsyratyeva. High-tech technologies and innovations : Jubilee International scientific and Practical Conference dedicated to the 60th anniversary of V.G. Shukhov BSTU (XXI scientific readings), Belgorod, October 09-10, 2014. – Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2014. – pp. 49-53. – EDN TGVOSV.

7. Malyshev, D. Yu. *The use of solid wood pyrolysis products as an additive to coal-water suspensions* / D. Yu. Malyshev, S. V. Syrodoy. Energy and resource conservation – XXI century : Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference, Orel, 02-04 December 2019. – The Eagle: OSU named after I.S. Turgenev, 2019. – pp. 281-284. – EDN MRVUXN.

8. Kalinikhin, O. N. Environmental aspects of the introduction of coal-water fuel combustion technology / O. N. Kalinikhin. *Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture*. 2019. № 5(139). Pp. 84-89. EDN ZYHHWM.

9. Kurgankina M.A., Vershinina K.Yu., Ozerova I.P., Medvedev V.V. *On the issue of the transition of thermal power plants from traditional fuels to organo-coal fuel compositions*. Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering. 2018. Vol. 329. No. 9. pp. 72-82.

10. Vershinina, K. Yu. *Characteristics of ignition of droplets of organovodocarbon fuels based on spent and industrial oils 1* / K. Yu. Vershinina, D. O. Glushkov, P. A. Strizhak.

Chemistry of solid fuels. 2017. No. 3. PP. 63-69. DOI 10.7868/S0023117717030100. EDN YTAJOX.

11. Malyshev D. Yu. Substantiation of resource efficiency of technologies for burning coal-water fuels with biomass additives / D. Yu. Malyshev, S. V. Syrodoy. *Izvestiya Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*. 2020. vol. 331. No. 6. pp. 77-85. DOI 10.18799/24131830/2020/6/2677. EDN RPUFSD.

12. Malyshev D. Yu. *The influence of the characteristic size of bio-coal fuel droplets on ignition delay times* / D. Yu. Malyshev, S. V. Syrodoy. Science of the young - the future of Russia: Collection of scientific articles of the 4th International Scientific Conference of Promising developments of Young Scientists. In 8 volumes, Kursk, December 10-11, 2019 / Responsible editor A.A. Gorokhov. Kursk: Southwest State University, 2019. pp. 118-122. EDN KYMWUY.

13. Sazanov, B.V. *Industrial thermal power plants and systems: textbook. manual for universities* [Electronic resource] : textbook. manual / B.V. Sazanov, V.I. Sitas. Electron. dan. Moscow : Publishing House of MEI, 2014. 275 p.

14. Patent No. 2144059 C1 Russian Federation, IPC C10L 1/32. Fuel : No. 99102408/04 : application 04.02.1999 : publ. 10.01.2000 / G. N. Delyagin, S. V. Erokhin, G. P. Silenko [et al.]; the applicant Delyagin Gennady Nikolaevich, Erokhin Sergey Fedorovich, Silenko Georgy Petrovich [and others].

15. Epstein, S. A. Morphological and thermochemical transformations of brown coal during barothermal treatment of alcohol-coal fuel / S. A. Epstein, D. S. Khudyakov, E. G. Gorlov. *Chemistry of solid fuel*. 2004. No. 2. pp. 35-40. EDN OXODPP.

16. Investigation of the characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels with the addition of isopropyl alcohol / D. V. Gvozdyakov, A.V. Zenkov, V. E. Gubin [et al.]. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy*. 2021. Vol. 21. No. 4. pp. 29-39. DOI 10.14529/power210404. EDN TRRWIE.

17. Baranova, M. P. Burning of water-coal suspension fuels from low-metamorphosed coals / M. P. Baranova, T. A. Kulagina, S. V. Lebede. *Chemical and oil and gas engineering*. 2009. No. 9. pp. 24-26. EDN TMLUHW.

18. Oleinikova M.I. Obtaining coal-water fuel from coal-enrichment sludge. *Environmental protection and conservation*. 2020. No. 1. pp. 132-144.

19. Baranova, M. P. *The influence of plasticizing additives on the rheological characteristics of coal-water suspensions from coals of varying degrees of metamorphism* / M. P. Baranova. Proceedings of the Krasnoyarsk State Technical University. - 2006. No. 2-3. pp. 143-147. EDN HIJJDM.

20. Borzov, A. I. *Preparation of coal-water suspensions from brown coals using various mill devices* / A. I. Borzov, M. P. Baranova. *Chemistry of solid fuels*. 2006. No. 4. pp. 40-45. EDN HVJHKZ.

21. S.V. Alekseenko, L.I. Maltsev, I.V. Kravchenko, A.A. Dekterev, V.A. Kuznetsov. Overview of works on the preparation of coal-water fuel and its combustion in boilers. *Gorenje and plasmochemistry*. 19 (2021) 265-277.

22. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Gubin V.E., Vedyashkin M.V. On the study of the structure of the flow of coal-water fuel in the process of its pneumomechanical spraying. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy*. 2018. Vol. 18. No. 4. pp. 5-12.

23. Maltsev L.I., Kravchenko I.V., Kravchenko A.I., Samborsky V.E. Applied aspects of technology of preparation and combustion of coal-water fuel. *Modern science: research, ideas, results, technologies*. 2011. No. 1 (6). pp. 25-30.

24. Morozov A.G., Korenyugina N.V. Hydraulic shock technologies in the production of coal-water fuel. *Coal*. 2009. No. 11 (1003). pp. 54-56.

25. Chernetskaya-Beletskaya N.B., Baranov I.O., Miroshnikova M.V. Experimental studies of rheological characteristics and hydraulic parameters of coal-water fuel transportation. *International scientific and practical conference world science*. 2017. Volume 1. No.12 (28). pp. 35-42.

26. Egurnov A.I., Boruk S.D., Teutul Ya.Yu. Relationship of parameters of the state of coal-water suspension fuel. *Modern science. Research, ideas, results, technologies*. 2014. №2. 15. C. r49-53.

27. Savitsky D.P., Makarov A.S., Egurnov A.I. Physico-chemical properties of coal-water fuel. *Modern science: research, ideas, results, technologies*. 2012. No. 1 (9). pp. 10-14.

28. E.R. Zvereva, G.R. Akhmetvalieva, A.O. Makarova, D.V. Ermolaev, Y.K. Mongush, A.R. Shaykhutdinova, O.S. Zueva. Changes in rheological properties of coal-water suspensions in the presence of nanomaterials. *Bulletin of the Kazan State Energy University*. 2017. No.3 (35). pp. 76-83.

29. R. Chen, M. Wilson, Y.K. Leong, P. Bryant, H. Yang, D.K. Zhang. Preparation and rheology of biochar, lignite char and coal slurry fuels. *Fuel*, 90 (4) (2011), pp. 1689-1695.
30. Agnieszka Kijo-Kleczkowska. *Combustion of coal-water suspensions*. Fuel. Volume 90, Issue 2, February 2011, Pages 865-877.
31. B. C. Meikap, N. K. Purohit, V. Mahadevan. Effect of microwave pretreatment of coal for improvement of rheological characteristics of coal–water slurries. *Journal of Colloid and Interface Science*. Volume 281, Issue 1, 1 January 2005, Pages 225-235.
32. Y.-J. Shin, Y.-H. Shen. Preparation of coal slurry with organic solvents. *Chemosphere*, 68 (2) (2007), pp. 389-393.
33. G.V. Kuznetsov, S. Romanov, K.Yu. Vershinina, P.A. Strizhak. Rheological characteristics and stability of fuel slurries based on coal processing waste, biomass and used oil. *Fuel*. Volume 302, 15 October 2021, 121203.
34. E.Yu. Shadrin, I.S. Anufriev, E.B. Butakov, E.P. Kopyev, S.V. Alekseenko, L.I. Maltsev, O.V. Sharypov. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner. *Fuel*. Volume 303, 1 November 2021, 121182.
35. Xiaoxiang Wu, Qinghua Guo, Yan Gong, Jieyu Liu, Xiang Luo, Tao Wu, Guangsu Yu. Influence of burner geometry on atomization of coal water slurry in an entrained-flow gasifier. *Chemical Engineering Science*. Volume 247, 16 January 2022, 117088.
36. D.V. Gvozdyakov, A.V. Zenkov, S.V. Lavrinenko, Ya.V. Marysheva, K.B. Larionov. Spraying characteristics of alcohol-coal-water slurries with low coal content. *Chemical Engineering & Technology*. 2022. Vol. 45, iss. 5. P. 936-945.
37. Deng Jianxin, Ding Zeliang, Zhou Houming, Tan Yuanqiang. 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*. Volume 27, Issue 5, September 2009, Pages 919-926.
38. Stephane G. Daviault, Omar B. Ramadan, Edgar A. Matida, Patrick M. Hughes, Robin Hughes. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer. *Fuel*. Volume 98, August 2012, Pages 183-193.
39. Ping Lu, Mingyao Zhang. Experimental investigation on atomizing characteristics of coal–water paste for pressurized fluidized bed. *Fuel*. Volume 83, Issue 16, November 2004, Pages 2109-2114.
40. Xiuyuan Ma, Yufeng Duan, Meng Liu. Atomization of petroleum-coke sludge slurry using effervescent atomizer. *Experimental Thermal and Fluid Science*. Volume 46, April 2013, Pages 131-138.
41. Stephane G. Daviault, Omar B. Ramadan, Edgar A. Matida, Patrick M. Hughes, Robin Hughes. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer. *Fuel*. Volume 98, August 2012, Pages 183-193.
42. Dmitry Gvozdyakov, Andrey Zenkov. Improvement of atomization characteristics of coal-water slurries. *Energy*. Volume 230, 1 September 2021, 120900.
43. Hsu, T.C., Yang, S.I. Viscosity effects of spray characteristics in air-blast atomizer. *Key Engineering Materials*. Volume 656-657, 2015, Pages 142-147.
44. D.O. Glushkov, S.V. Syrodo, A.V. Zakharevich, P.A. Strizhak. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: analysis of key aspects. *Fuel Process. Technol.*, 148 (2016), pp. 224-235.
45. V.A. Pinchuk, T.A. Sharabura, A.V. Kuzmin. Improvement of coal-water fuel combustion characteristics by using of electromagnetic treatment. *Fuel Processing Technology*. Volume 167, 1 December 2017, Pages 61-68.
46. Jianguo Liu, Xiumin Jiang, Lingsheng Zhou, Hui Wang, Xiangxin Han. Co-firing of oil sludge with coal–water slurry in an industrial internal circulating fluidized bed boiler. *Journal of Hazardous Materials*. Volume 167, Issues 1–3, 15 August 2009, Pages 817-823.
47. V.V. Salomatov, G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodo, N.Y. Gutareva. Ignition of coal-water fuel particles under the conditions of intense heat. *Applied Thermal Engineering*. Volume 106, 5 August 2016, Pages 561-569.
48. D.V. Gvozdyakov, A.V. Zenkov, A. Zh. Kaltaev. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liquid pyrolysis products of wood waste. *Energy*. Volume 257, 15 October 2022, 124813.
49. Kun Zhou, Qizhao Lin, Hongwei Hu, Huiqing Hu, Lanbo Song. The ignition characteristics and combustion processes of the single coal slime particle under different hot-coflow conditions in N₂/O₂ atmosphere. *Energy*. Volume 136, 1 October 2017, Pages 173-184.
50. A.D. Nikitin, G.S. Nyashina, A.F. Ryzhkov, P.A. Strizhak. Anthropogenic emissions from the combustion of composite coal-based fuels. *Sci. Total Environ.*, 772 (2021), p. 144909.

51. Christian Gaber, Philipp Wachter, Martin Demuth, Christoph Hochenauer. Experimental investigation and demonstration of pilot-scale combustion of oil-water emulsions and coal-water slurry with pronounced water contents at elevated temperatures with the use of pure oxygen. *Fuel*. Volume 282, 15 December 2020, 118692.
52. D.V. Antonov, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak, D.S. Romanov. Micro-explosive droplet fragmentation of environmentally promising coal-water slurries containing petrochemicals. *Fuel*. Volume 283, 1 January 2021, 118949.
53. A.D. Nikitin, G.S. Nyashina, A.F. Ryzhkov, P.A. Strizhak. Anthropogenic emissions from the combustion of composite coal-based fuels. *Science of The Total Environment*. Volume 772, 10 June 2021, 144909.
54. G.S. Nyashina, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak. Effects of plant additives on the concentration of sulfur and nitrogen oxides in the combustion products of coal-water slurries containing petrochemicals. *Environmental Pollution*. Volume 258, March 2020, 113682.
55. Syrodoy S.V., Malyshev D.Yu., Kostoreva Zh.A. Joint ignition of coal-water suspension and wood biomass. *Industrial energy*. 2020. No. 5. pp. 44-49.
56. Pinchuk V.A., Sharabura T.A., Kuzmin A.V. Experimental studies of the coefficient of thermal conductivity and heat capacity of coal-water fuel. *Modern science: research, ideas, results, technologies*. 2016. No. 1 (17). pp. 55-67.
57. Murko V.I., Tayakov O.V., Khamalyainen V.A., Shekhovtsova V.O. Development of environmentally friendly technologies for the use of coal enrichment and combustion waste. *Mining information and Analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2016. No. 10. pp. 249-258.
58. Zvereva E.R., Akhmetvalieva G.R., Makarova A.O., Ermolaev D.V., Mongush Yu.K.O., Shaikhutdinova A.R., Zueva O.S. Changes in rheological properties of coal-water suspensions in the presence of nanomaterials. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. 2017. No. 3 (35). pp. 76-83.
59. Kravchenko O.V., Andrienko E.Yu. Energy and environmental aspects of the use of phenolic wastewater as a component of coal-water fuels. *Ecology and industry*. 2011. No. 3 (28). pp. 67-71.
60. Ksenia Yu. Vershinina, Vadim V. Dorokhov, Daniil S. Romanov, Pavel A. Strizhak. Combustion dynamics of droplets of aqueous slurries based on coal slime and waste oil. *Journal of the Energy Institute*. Volume 104, October 2022, Pages 98-111.
61. Ksenia Yu. Vershinina, Vadim V. Dorokhov, Daniil S. Romanov, Pavel A. Strizhak. Combustion stages of waste-derived blends burned as pellets, layers, and droplets of slurry. *Energy*. Volume 251, 15 July 2022, 123897.
62. Dmitriy Gvozdyakov, Andrey Zenkov. Influence of petrochemicals on jet characteristics after coal-water fuel spraying. *Fuel Processing Technology*. Volume 218, July 2021, 106864.

Authors of the publication

Andrey V. Zenkov – The Butakov Research Center of Engineering School of Energy and Power Engineering of Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia. *ORCID* 0000-0002-7763-3266, *avz41@tpu.ru*.

Dmitry V. Gvozdyakov – The Butakov Research Center of Engineering School of Energy and Power Engineering of Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia. *ORCID* 0000-0002-7866-9180, *dim2003@tpu.ru*.

Шифр научной специальности: 2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки).

Получено 02.08.2023г.

Отредактировано 09.08.2023г.

Принято 10.08.2023г.