

УДК 536.468

DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4646

Шифр специальности ВАК: 01.04.14

Влияние древесной биомассы в составе водоугольных суспензий на их транспортировку и сжигание

Д.Ю. Малышев[✉], Ж.А. Косторева, М.С. Тамашевич

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]dmitry.mlv@gmail.com

Аннотация. Актуальность. Перспективным топливом с точки зрения экологии являются водоугольные суспензии. Многочисленные исследования показали, что при их сжигании существенно снижаются выбросы антропогенных газов в атмосферу Земли по сравнению с выбросами при сжигании угля. Но широкомасштабное внедрение водоугольных суспензий в общий баланс выработки энергии затруднено в связи со значительной задержкой их зажигания, длительность которой может достигать нескольких десятков секунд при относительно низких температурах окислителя ($T_g \leq 1073$ К). Одним из возможных способов решения данной проблемы является применение новых технологий подготовки к сжиганию, например, использование дополнительного микроволнового нагрева топлива и введение в состав водоугольных суспензий специальных добавок, ускоряющих процесс их зажигания. Введение в состав топлива таких добавок может привести к существенному изменению реологических характеристик. **Цель.** Определение степени влияния концентрации и вида древесной добавки в составе водоугольной суспензии на реологические характеристики капель водоугольного топлива, а также возможности снижения продолжительности термической подготовки последних при воздействии на них микроволнового нагрева. **Объект.** Водоугольная суспензия на основе длиннопламенного энергетического угля с добавлением опилок и хвои сосны (Био-ВУС). **Методы.** Экспериментальные исследования по определению временных характеристик зажигания водоугольных суспензий проводились с использованием высокоскоростной видеокамеры FASTCAM. Сжигание топлива осуществлялось в проточной камере сгорания, оборудованной магнетронами для дополнительного СВЧ-нагрева топлива. Динамическая вязкость определялась с помощью вискозиметра Brookfield RVDV-II + Pro. **Результаты.** Установлено, что добавление СВЧ-нагрева позволяет существенно (до 15 %) уменьшить задержку зажигания водоугольных суспензий и Био-водоугольных суспензий при относительно низких температурах окислителя (673 К). В ходе экспериментальных исследований показано, что вид биомассы оказывает влияние на временные характеристики зажигания топлив при температуре внешней среды до 753 К, при дальнейшем повышении температуры окислителя вид добавки не оказывает значимого влияния. Показано, что при исследовании реологических характеристик водоугольных суспензий динамическая вязкость Био-водоугольных суспензий не выходит за пределы характерного значения 1200 Па·с при скорости сдвига 100 об/мин при введении в водоугольные суспензии не более 2 % опилок сосны и не более 6 % хвои сосны.

Ключевые слова: водоугольная суспензия, микроволновой нагрев, экспериментальные исследования, задержка зажигания, динамическая вязкость

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 22-79-00223).

Для цитирования: Малышев Д.Ю., Косторева Ж.А., Тамашевич М.С. Влияние древесной биомассы в составе водоугольных суспензий на их транспортировку и сжигание // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 7. – С. 71–80. DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4646

UDC 536.468

DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4646

Impact of woody biomass in the composition of coal-water suspensions on their transportation and combustion

D.Yu. Malyshev✉, Zh.A. Kostoreva, M.S. Tamashevich

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉dmitry.mlv@gmail.com

Abstract. Relevance. A promising fuel from an environmental point of view is coal-water suspensions. Multiple studies have shown that when they are burned, emissions of anthropogenic gases into the Earth's atmosphere are significantly reduced compared to emissions from coal burning. But the large-scale introduction of coal-water suspensions into the overall balance of energy production is difficult due to a significant delay in their ignition, which can reach several tens of seconds at relatively low oxidizer temperatures ($T_g \leq 1073$ K). One of the possible ways to solve this problem is the use of new technologies for preparation for combustion, for example, the use of additional microwave heating of fuel and the introduction of special additives into the composition of coal-water suspensions, which accelerate their ignition. The introduction of such additives into the fuel composition can lead to a significant change in the rheological characteristics. **Aim.** To determine the degree of impact of the concentration and type of wood additive in the composition of the coal-water suspension on the rheological characteristics of droplets of coal-water fuel, as well as the possibility of reducing the duration of thermal preparation of the latter when exposed to microwave heating. **Object.** Water-coal suspension based on long-flame thermal coal and on long-flame thermal coal with the addition of sawdust and pine needles (Bio-water-coal suspension). **Methods.** Experimental studies to determine the time characteristics of water-coal suspension ignition were carried out using a high-speed video camera FASTCAM. Fuel combustion was carried out in a flow-through combustion chamber equipped with magnetrons for additional microwave heating of the fuel. Dynamic viscosity was determined using a Brookfield RVDV-II + Pro viscometer. **Results.** It has been established that the addition of microwave heating can significantly (up to 15%) reduce the ignition delay of water-coal suspension and Bio-water-coal suspension at relatively low oxidizer temperatures (673 K). Experimental studies shown that the type of biomass affects the time characteristics of fuel ignition at ambient temperatures up to 753 K; with a further increase in the temperature of the oxidizer, the type of additive does not have a significant effect. It is shown that when studying the rheological characteristics of the water-coal suspension, the dynamic viscosity of Bio-water-coal suspension does not go beyond the characteristic value of 1200 Pa·s at a shear rate of 100 rpm when no more than 2% of pine sawdust and no more than 6% of pine needles are introduced into the water-coal suspension.

Keywords: coal-water suspension, microwave heating, experimental studies, ignition delay time, dynamic viscosity

Acknowledgements: The research was carried out due to the grant of the Russian Science Foundation (project no. 22-79-00223).

For citation: Malyshev D.Yu., Kostoreva Zh.A., Tamashevich M.S. Impact of woody biomass in the composition of coal-water suspensions on their transportation and combustion. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 7, pp. 71–80. DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4646

Введение

Наиболее распространенным топливом для тепловых электрических станций (ТЭС) остается уголь [1]. Его сжигание сопровождается выбросами, активно загрязняющими окружающую среду (твердые частицы, оксиды азота и серы, диоксид углерода и др. [2]).

Перспективной технологией сжигания угля считается сжигание последнего в составе органо-водоугольных, био-водоугольных и водоугольных суспензий (ВУС) [3–6]. Установлено, что при сжигании последних, по сравнению со сжиганием угольного топлива существенно снижаются выбросы антропогенных газов, таких как оксиды азота и серы [7–9]. Также было показано, что добавление

древесной биомассы в состав ВУС приводит к снижению выбросов оксидов углерода, азота и серы по сравнению с ВУС без добавок. Отходы лесозаготовительных предприятий (опилки, крона, кора и др.), не имеющие ценности, практически не перерабатываются и хранятся в отвалах на открытой местности [10]. Последнее приводит к выделению в окружающую среду парниковых газов (например, метана) вследствие гниения отходов. Кроме того, такое хранение нередко приводит к возникновению пожаров. Использование отходов лесопереработки и лесопиления в составе ВУС окажет благоприятное воздействие на окружающую среду и снизит опасность возникновения пожаров вблизи лесоперерабатывающих предприятий. Стоимость таких

добавок в ВУС будет определяться затратами на сбор и транспортировку.

Замещение части угольного топлива растительной компонентой ведет к снижению теплоты сгорания такого топлива. Поэтому концентрация ускоряющей процесс зажигания добавки (древесной биомассы) [11] должна быть такой, чтобы обеспечить необходимое снижение продолжительности термической подготовки топлива, но в то же время не оказывала бы существенного влияния на снижение энергетических характеристик высоко обводнённого топлива. В [10] показано, что добавление биомассы в состав ВУС до 6 % ведет к снижению теплотворной способности менее чем на 5 %, но приводит к снижению периода термической подготовки на 20–30 %.

В ВУС содержание воды варьируется в диапазоне от 40 до 60 % [12]. Высокая обводненность топлива приводит к существенному увеличению продолжительности индукционного периода. Для крупных капель (характерный размер ≈ 3 мм) задержка зажигания может составлять несколько десятков секунд при относительно низких температурах окислительной среды [13]. Традиционные способы сжигания ВУС связаны с рядом определенных технологических трудностей. Требуется существенная модернизация системы топливоподачи (перевод с твердого топлива на жидкое), осложняется работа топочно-горелочного комплекса (в связи с наличием достаточного большого объема воды в топливе существенно возрастает задержка зажигания таких топлив (может составлять несколько десятков секунд)). В работе [14] показано, что при сжигании ВУС в котле ТП-35 длина факела увеличивалась в 3–4 раза, по сравнению со сжиганием угольной пыли. Продолжительный процесс воспламенения приводит к уменьшению температуры факела на 200–300 К и ухудшению выгорания угольных частиц ВУТ (степень выгорания была ниже 83 % [14]), повышению температуры дымовых газов (на 2–5 % выше, чем при горении угля) и совокупному увеличению тепловых потерь [14].

Использование ВУС в настоящее время сопровождается высокими эксплуатационными затратами в связи с чем встречается крайне редко. На сегодняшний день рядом исследователей предложены различные способы сжигания ВУС, например, в циклонных топках. Длительное нахождение капли топлива в топочном пространстве котла позволяет обеспечить ее полное сгорание. Другим способом, позволяющим эффективно сжигать ВУС, является их подсветка более реакционным топливом (например, газом или дизельным топливом). К недостаткам данного метода можно отнести нестабильность горения иницируемого топлива, а также значительно более сложную систему управле-

ния котельным агрегатом [14]. Перспективным методом, позволяющим интенсифицировать процесс зажигания ВУС без существенной модернизации топочного пространства, можно считать добавление микроволнового нагрева, воздействующего на воду в составе ВУС. Можно предположить, что добавление СВЧ-излучения [15] будет способствовать интенсификации процесса зажигания ВУС. Стоит отметить, что на сегодняшний день недостаточно исследований, посвященных данной тематике.

Одним из преимуществ ВУС является то, что ее можно транспортировать трубопроводным транспортом. Динамическая вязкость (μ) ВУС определяет возможность ее перекачки по трубопроводам и оказывает существенное влияние на конструктивные характеристики систем топливоподачи и распыления топлива в топочных пространствах котельных агрегатов.

Введение в состав ВУС древесной биомассы может оказать влияние на вязкость жидкого топлива. На сегодняшний день не так много работ, посвященных вопросам влияния вида и концентрации древесной биомассы в составе ВУС на реологические характеристики топлива. В этой связи является актуальным определение реологических характеристик исследуемого композитного топлива.

Целью данной работы является определение влияния концентрации и вида древесной добавки в составе ВУС на реологические характеристики капель топлива, а также возможности снижения продолжительности термической подготовки топлива при воздействии микроволнового нагрева на топливо.

Методика подготовки топлива

В качестве основного компонента топлива использовался типичный энергетический уголь марки Д (длиннопламенный, Листвянского месторождения Новосибирской обл.). В качестве ускоряющей процесс зажигания добавки применялись отходы лесопереработки и лесопиления (опилки сосны и хвоя сосны). На территории Томской области, по оценкам специалистов, запасы древесины (сосны) оцениваются в 28,8 % от всех лесопокрытых территорий. Таким образом, запасы растительной компоненты, которая потенциально может использоваться для интенсификации процесса зажигания водоугольного топлива, весьма велики.

Для приготовления ВУС отдельно подготавливались уголь и биомасса (опилки и хвоя сосны).

Подготовка угля необходимой фракции проходила следующим образом:

- кусковой уголь размером 10–15 см измельчался в щековой дробилке до размеров 2–3 мм;
- получившаяся фракция поступала в шаровую мельницу, где дробилась до пылевидного состояния;

- далее угольная пыль направлялась в вибросито, где просеивалась через ячейку размером 90 мкм. Просев использовался для приготовления суспензий, а угольная пыль, размер которой превышал 90 мкм, направлялась на повторное измельчение.

Древесная биомасса также подготавливалась в несколько стадий:

- на начальном этапе осуществлялась сушка массы в сушильном шкафу СУ 32 при температуре 376 К в течение 2 часов, в конце процесса сушки влажность древесной биомассы составляла $\approx 5\%$;
- следующим технологическим этапом было измельчение биомассы и ее просев через сито с ячейкой 90 мкм [16].

После подготовки компонентов топлива осуществлялось их смешение в гомогенизаторе с заданными массовыми концентрациями, приведенными в таблице. Измерение массы компонентов проводилось при помощи весов aczet CY-1003 [17] с точностью измерений 0,001 г.

Таблица. Состав исследуемых топлив

Table. Composition of the studied fuels

Уголь Д, % Long-flame coal, %	Тип биомассы Biomass type	Содержание биомассы, % Biomass concentration, %	Вода, % Water, %
50	–	–	50
48	Опилки сосны Pine sawdust	2	
46		4	
44		6	
48	Хвоя сосны Pine needles	2	
46		4	
44		6	

Методики проведения экспериментов

Экспериментальные исследования проводились на нескольких экспериментальных стендах. Для определения динамической вязкости ВУС использовался экспериментальный стенд, приведенный на рис. 1. Исследования проводились в соответствии с методикой [18].

Определение динамической вязкости осуществлялось на вискозиметре Brookfield RVDV-II + Pro. Шпиндель вискозиметра погружали в прозрачную стеклянную емкость, заполненную ВУС. Исследования проводили при различных скоростях сдвига.

На втором этапе исследований определялась одна из основных характеристик любого топлива – время термической подготовки (задержка зажигания) (t_{ign}). На рис. 2 представлен экспериментальный стенд по определению временных характеристик зажигания ВУС в условиях сложного радиационно-конвективного микроволнового нагрева.

Окислитель (кислород воздуха) нагревался в высокотемпературной печи в диапазоне от 673 до 783 К и далее подавался в камеру сгорания – 3 компрессором – 1. Капля топлива – 5 вводилась в нагретую до высоких температур окислительную среду при помощи подвижного механизма – 4. В верхней части камеры сгорания установлены четыре магнетрона – 6 таким образом, чтобы их воздействие было направлено на центральную часть камеры сгорания, куда вводилась капля топлива. Процессы термической подготовки и зажигания регистрировала высокоскоростная видеокамера – 7. Моментом задержки зажигания (t_{ign}) считался период от начала теплового воздействия (попадание частицы в фокус камеры) до первых очагов горения (появления светящихся областей) исследуемого топлива.



Рис. 1. Экспериментальная установка по измерению динамической вязкости ВУС (1 – ротационный вискозиметр; 2 – шпиндель; 3 – цилиндрический стеклянный сосуд с исследуемой суспензией; 4 – Био-ВУС)

Fig. 1. Experimental setup for measuring the dynamic viscosity of a coal-water suspension (CWS) (1 – rotational viscometer; 2 – spindle; 3 – cylindrical glass vessel with the suspension under study; 4 – Bio-CWS)

При планировании и проведении экспериментальных исследований особое внимание уделялось учету различного рода помех и ошибок. В частности, для каждого состава топлива проводили серию не менее чем из $n=10$ опытов.

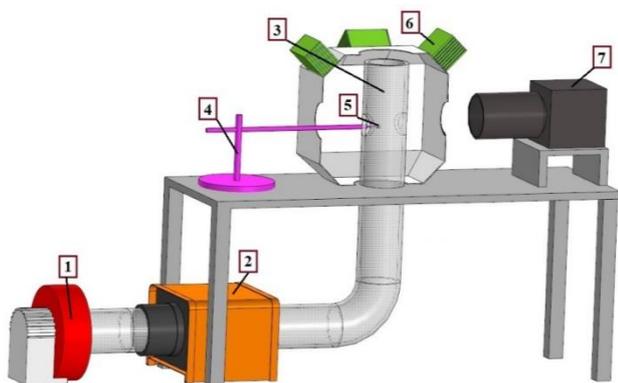


Рис. 2. Схема экспериментального стенда по определению временных характеристик: 1 – компрессор; 2 – высокотемпературная печь; 3 – камера сгорания; 4 – держатель; 5 – капля ВУС; 6 – магнетроны (4 шт); 7 – высокоскоростная видеокамера

Fig. 2. Scheme of the experimental stand for determining time characteristics: 1 – compressor; 2 – high-temperature furnace; 3 – combustion chamber; 4 – holder; 5 – CWS drop; 6 – magnetrons (4 pcs.); 7 – high-speed video camera

Установлено, что погрешность серии измерений задержки зажигания при доверительной вероятности $\alpha=0,95$ не превышала 13,1 %, для динамической вязкости погрешность составляла 7,4 % при доверительной вероятности 0,95. Методика обработки экспериментальных исследований подробно описана в [19].

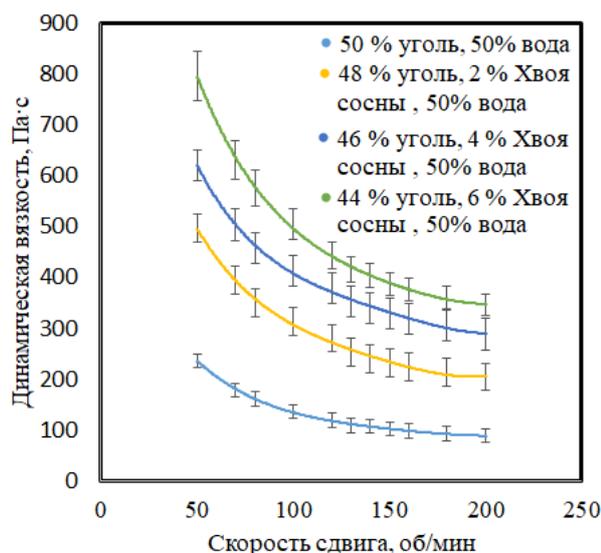
Результаты экспериментальных исследований

На рис. 3 приведены значения динамической вязкости при различных скоростях сдвига исследуемых топлив.

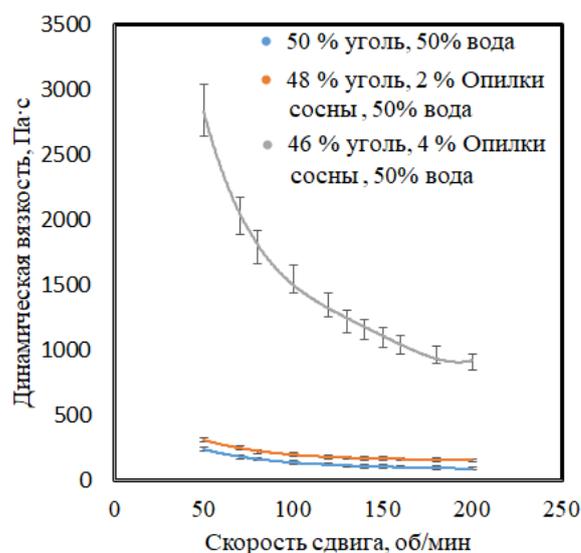
Анализ зависимостей, приведенных на рис. 3, а, показал, что добавление даже 2 % хвои сосны приводит к увеличению вязкости практически в два раза по сравнению с водоугольным топливом без введения в структуру топлива биомассы. Добавление 4 % (по массе) биомассы в ВУС приводит к увеличению вязкости в 3,2 раза, при 6 % – почти в 4 раза. На рис. 3, б приведены зависимости динамической вязкости при разных скоростях сдвига для ВУС и Био-ВУС с добавлением опилок сосны.

Доказано [18], что при величине динамической вязкости менее 1200 Па·с (при скорости сдвига 100 об/мин) суспензию можно распылять в топочное пространство котельного агрегата с минимальной вероятностью закупоривания топливных форсунок и минимизировать затраты энергии на прокачку топлива по трубопроводам. На рис. 4 приведены значения динамической вязкости при скорости сдвига 100 об/мин.

Анализ рис. 4 показал, что для составов топлива с добавлением хвои сосны показания вязкости находятся ниже порогового значения 1200 Па·с. Можно отметить, что при максимальном содержании биомассы (хвои сосны) 6 % имеется запас до порогового значения практически в два раза.



a



b

Рис. 3. Зависимости динамической вязкости ВУС от скорости сдвига при различных массовых концентрациях биомассы в составе топлива (а – хвоя сосны, б – опилки сосны)

Fig. 3. Dependences of the dynamic viscosity of CWS on shear rates at various mass concentrations of biomass in the fuel composition (a – pine needles, b – pine sawdust)

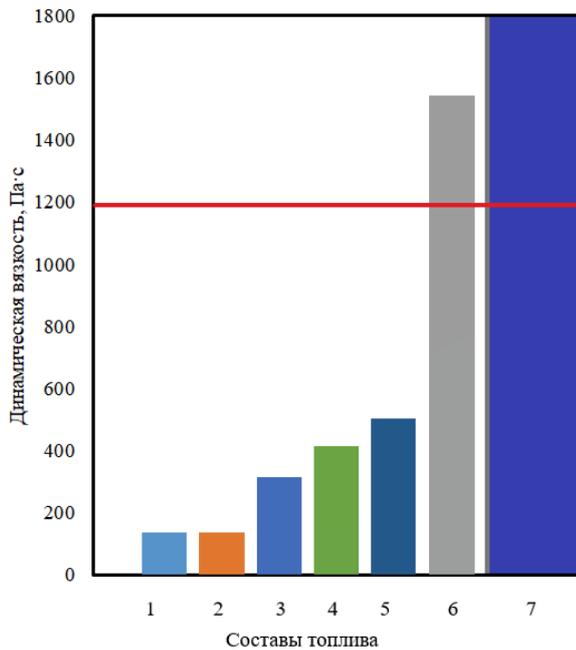


Рис. 4. Значение динамической вязкости при скорости сдвига 100 об/мин для составов ВУС: 1 – 50 % вода/50% уголь; 2 – 50 % вода/2 % опилки сосны/48 % уголь; 3 – 50 % вода/2 % хвоя сосны/48 % уголь; 4 – 50 % вода/4 % хвоя сосны/46 % уголь; 5 – 50 % вода/6 % хвоя сосны/44 % уголь; 6 – 50 % вода/4 % опилки сосны/46 % уголь; 7 – 50 % вода/6 % опилки сосны/44 % уголь

Fig. 4. Value of dynamic viscosity at a shear rate of 100 rpm for CWS compositions: 1 – 50% water/50% coal; 2 – 50% water/2% pine sawdust/48% coal; 3 – 50% water/2% pine needles/48% coal; 4 – 50% water/4% pine needles/46% coal; 5 – 50% water/6% pine needles/44% coal; 6 – 50% water/4% pine sawdust/46% coal; 7 – 50% water/6% pine sawdust/44% coal

В этой связи можно с уверенностью сказать, что дальнейшее увеличение концентрации хвои сосны возможно. Добавление опилок (даже при относительно малых массовых концентрациях (4 % и более)) в состав топливной смеси приводит к значимому повышению динамической вязкости (более 1200 Па·с) био-водоугольного композита. Последнее обусловлено высокой адсорбционной способностью древесины. Анализ экспериментальных данных, приведенных на рис. 4, показывает, что содержание биомассы в Био-ВУС 4 и 6 % (по массе) приводит к экспоненциальному росту вязкости топлива. Такое изменение динамической вязкости ВУС окажет существенное влияние на характеристики ее распыления, транспортировку и хранение. Соответственно, можно сказать, что для стабильно-

го распыления водоугольного топлива в топках котлов необходимо создание новых видов спринклерных систем [20] или изменение технологии сжигания таких высоковязких топлив, например, сжигание ВУС с содержанием древесных опилок выше 2 % в циркулирующем кипящем слое. Исходя из вышеизложенного, дальнейшие экспериментальные исследования по изучению задержки зажигания ВУС проводились с концентрацией биомассы 2 %.

На рис. 5 представлена типичная видеорограмма процессов зажигания капель ВУС без СВЧ-излучения (рис. 5, a, c) и под воздействием микроволнового нагрева (рис. 5, b, d). Процесс термической подготовки топлива можно условно разделить на несколько последовательных стадий. В начальный момент времени кадр I характеризует начало теплового воздействия, происходит инертный нагрев капли топлива, который инициирует процесс испарения влаги. Далее влага начинает испаряться, и топливо изменяет свою текстуру с блестящей на матовую (кадр II), образуется твердый углеродистый каркас. За кадр воспламенения частицы ВУТ с временем t_{ign} принимался момент начала светимости частицы, превышающей светимость камеры сгорания (кадр III). Стоит отметить, что зажигание, как правило, происходит на поверхности частицы. Кадр IV характеризует развитое горение частицы ВУС. С момента зажигания (кадр III) до развитого горения (кадр IV) для Био-ВУС с добавлением опилок сосны проходит почти столько же времени, что и для ВУС с добавлением хвои сосны при всех видах нагрева. Следовательно, можно сделать вывод, что вид биомассы в составе ВУС не влияет на время полного охвата пламенем капель Био-ВУС при температуре окружающей среды $T=673$ К.

На рис. 6 представлены зависимости задержки зажигания (t_{ign}) ВУС с добавлением в их состав опилок и хвои сосны в условиях радиационно-конвективного и радиационно-конвективного микроволнового нагрева.

Хорошо видно, что добавление СВЧ-излучения снижает продолжительность термической подготовки частиц ВУС и Био-ВУС для всего исследуемого диапазона температур. При относительно низких температурах окислителя (673 К) влияние микроволнового нагрева максимально. Введение в состав ВУС 2 % добавок биомассы ускоряет процесс зажигания частиц топлива без СВЧ-нагрева для капель топлива с хвоей сосны на 17 %, а частиц с добавлением опилок сосны на 27 % при относительно низких температурах внешней среды.

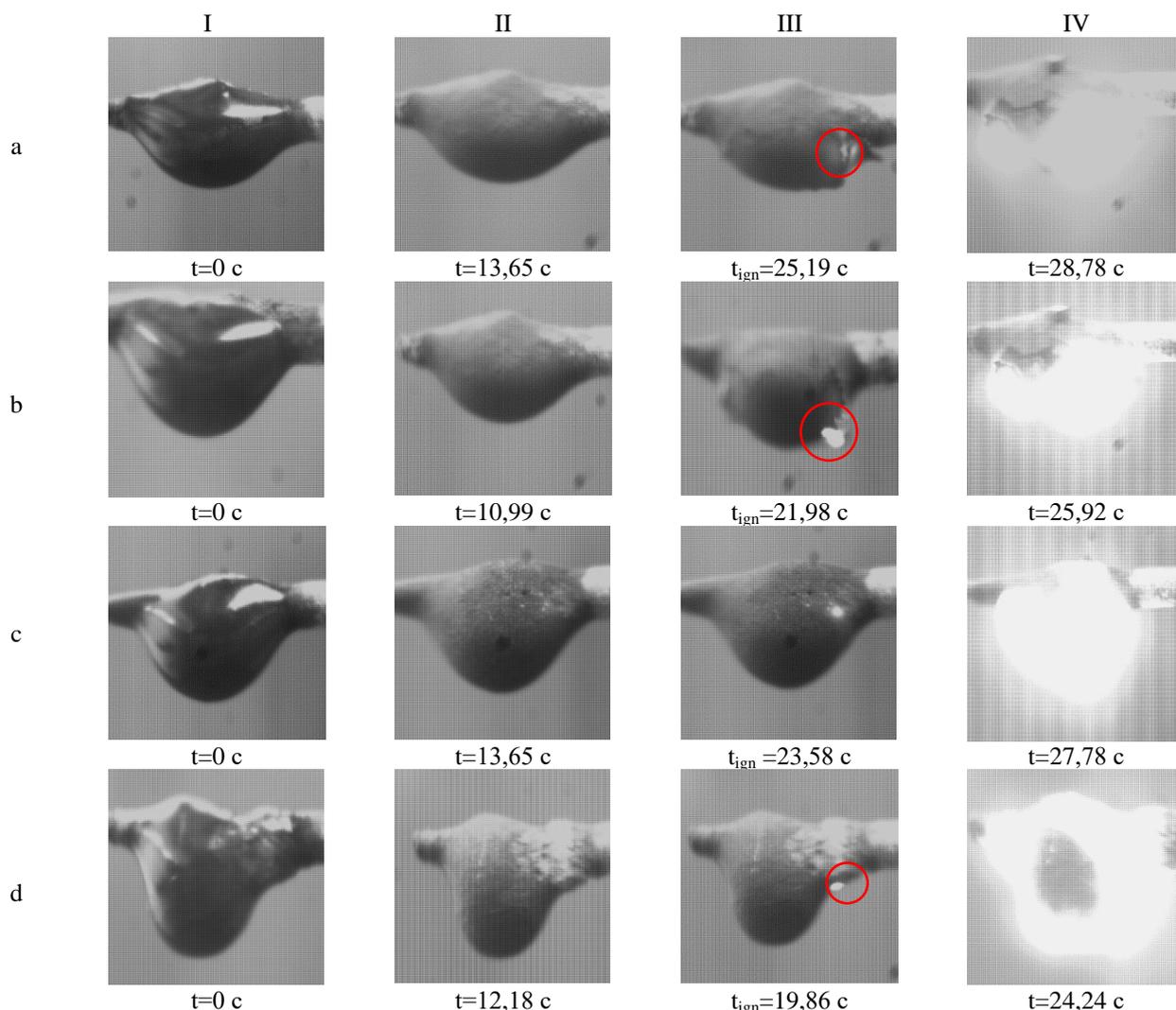


Рис. 5. Кадры типичной видеозаписи процесса воспламенения ВУС с добавлением древесной биомассы при температуре 673 К: а) ВУС с добавлением сосны хвои без СВЧ; б) ВУС с добавлением сосны хвои с СВЧ; в) ВУС с добавлением сосны опилок без СВЧ; г) ВУС с добавлением сосны опилок с СВЧ

Fig. 5. Frames of a typical videogram of CWS ignition with woody biomass addition at a temperature of 673 K: а) CWS with the addition of pine needles without microwave; б) CWS with the addition of pine needles with microwave; в) CWS with the addition of pine sawdust without microwave; г) CWS with the addition of pine sawdust with microwave

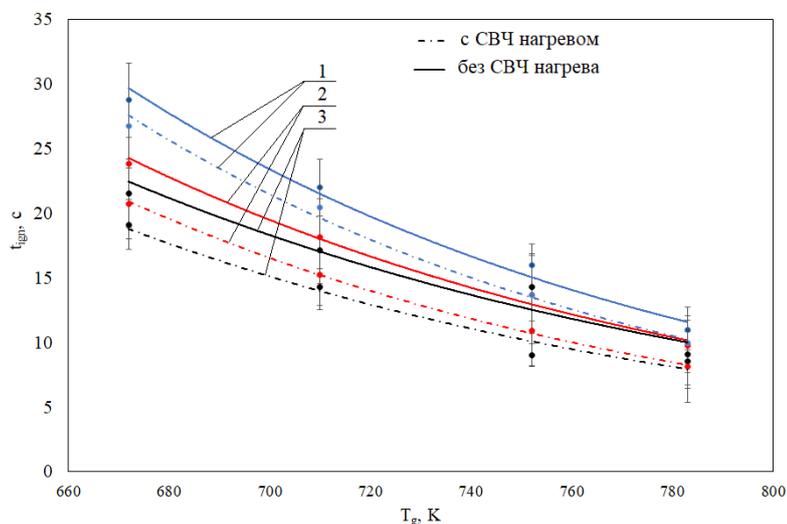


Рис. 6. Зависимости задержки зажигания ВУС от температуры окислительной среды для составов ВУС: 1 – 50 % вода/50% уголь; 2 – 50 % вода/2 % хвоя сосны/48 % уголь; 3 – 50 % вода/2 % опилки сосны/48 % уголь

Fig. 6. Dependence of CWS ignition delay times on the temperature of the oxidizing medium for CWS compositions: 1 – 50% water/50% coal; 2 – 50% water/2% pine needles/48% coal; 3 – 50% water/2% sawdust pine/48% coal

При радиационно-конвективном микроволновом нагреве добавление в ВУС 2 % хвои сосны снижает t_{ign} до 30 % и до 35 % при добавлении 2 % опилок сосны при температуре внешней среды 673 К.

Следовательно, можно сделать обобщённый вывод о том, что введение в состав ВУС 2 % опилок сосны (по массе) и добавление СВЧ-подсветки ВУС приводит к существенному снижению (до 40 %) продолжительности термической подготовки (t_{ign}) последних. Установленные при проведении экспериментов закономерности иллюстрируют возможность реализации технологии сжигания ВУС (в составе которой присутствует биомасса) с воздействием микроволнового нагрева.

Заключение

1. Дополнительный микроволновый нагрев и добавление биомассы – опилок сосны – позволяют уменьшить время задержки зажигания ВУС при температуре окружающей среды $T=673$ К до 35 %.
2. Наибольшее влияние микроволнового нагрева наблюдается в области относительно низких температур ($T \leq 700$ К).
3. Динамическая вязкость Био-ВУС не превышает порогового значения 1200 Па·с при скорости сдвига 100 об/мин для капель топлива с добавлением не более 2 % опилок сосны и не более 6 % хвои сосны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Coal consumption-environmental sustainability nexus in developed and developing major coal-consuming economies / A. Alhassan, I. Ozturk, M.F. Al-Zyoud, F.V. Bekun // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10. – e.25619.
2. Simultaneous removal of sulfur dioxide and nitrogen oxide from flue gas by phosphorus sludge: The performance and absorption mechanism / Y. Yin, X. Wang, L. Xu, Y. Nie, Y. Mei // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. – 2024. – Vol. 65. – P. 212–221.
3. The mixtures of bio-oil derived from different biomass and coal/char as biofuels: combustion characteristics / P. Feng, X. Li, J. Wang, J. Li, H. Wang, L. He // *Energy*. – 2021. – Vol. 224. – P. 120132.
4. Effect of co-combustion of coal with biomass on the morphology of soot / M. Si, J. Liu, Y. Zhang, B. Liu, Z. Luo, Q. Cheng // *Renewable Energy*. – 2024. – Vol. 226. – P. 120374.
5. Делягин Г.Н. Вопросы теории горения водоугольной суспензии в потоке воздуха // *Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий*. – М.: Наука, 1967. – С. 45–55.
6. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Kaltaev A.Zh. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liquid pyrolysis products of wood waste // *Energy*. – 2022. – Vol. 257. – P. 123813.
7. Mathematical modeling of the thermochemical processes of nitrogen oxides sequestration during combustion of wood-coal mixture particles/ G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.Yu. Gutareva, N.A. Nigay // *Journal of the Energy Institute* – 2021. – Vol. 96. – P. 280–293.
8. Dorokhov V.V., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Anthropogenic emissions from coal-water slurry combustion: Influence of component composition and registration methods // *Environmental Research*. – 2023. – Vol. 223. – P. 115444.
9. Investigation on combustion, gaseous pollutants emission and ash characteristics during co-combustion of semicoke and coal slime / R. Zhao, R. Dai, T. Chen, J. Qin, J. Zhang, J. Wu // *Journal of Environmental Chemical Engineering* – 2021. – Vol. 9. – P. 106249.
10. Characteristics and conditions for ignition of bio-coal mixtures based on coal and forest combustible material / S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, N.Y. Gutareva, Zh.A. Kostoreva, A.A. Kostoreva, N.A. Nigay // *Journal of the Energy Institute*. – 2020. – Vol. 93. – P. 1978–1992.
11. Experimental study of the influence of synergistic effects on the co-firing characteristics of biomass and coal / Y. Pu, H. Wang, X. Wang, M. Lim, B. Yao, H. Yang, C. Lou // *Journal of the Energy Institute*. – 2024. – Vol. 115. – P. 101687.
12. Influence of the type of woody biomass on energy and environmental characteristics of the thermal preparation processes and ignition of bio-water-coal fuel particles / S.V. Syrodoy, D.Yu. Malyshev, N.A. Nigay, M.V. Purin // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2024. – Vol. 184. – P. 736–746.
13. Justification of the use of forest waste in the power industry as one of the components of BIO-coal-water suspension fuel / G.V. Kuznetsov, D.Yu. Malyshev, S.V. Syrodoy, N.Yu. Gutareva, M.V. Purin, Zh.A. Kostoreva // *Energy*. – 2022. – Vol. 239. – P. 121677.
14. Осинцев К.В. Разработка системы сжигания водоугольной суспензии // *Теплоэнергетика*. – 2014. – № 1. – С. 5–11.
15. Bioenergy production by integrated microwave-assisted torrefaction and pyrolysis / A.M. Aziz, H. Mohamed, D. Kania, H.C. Ong, B.S. Zainal, H. Junoh, P.J. Ker, A.S. Silitonga // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2024. – Vol. 191. – P. 114097.
16. Characteristics and conditions for ignition of bio-coal mixtures based on coal and forest combustible material/ S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, N.Y. Gutareva, Zh.A. Kostoreva, A.A. Kostoreva, N.A. Nigay // *Journal of the Energy Institute* – 2020. – Vol. 93. – P. 1978–1992.
17. Весы 1000гp 0,001г Aczet CY-1003. URL: <https://www.totural.ru/catalog/72734096/72734319> (дата обращения 01.04.2024).
18. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Kaltaev A.Zh. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liquid pyrolysis products of wood waste // *Energy*. – 2022. – Vol. 257. – P. 124813.
19. Крайнов А.В., Ташлыков А.А., Юхнов В.Е. Лабораторный практикум по теоретическим основам теплотехники. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 111 с.
20. Baharmi M., Givechi S. Full title: a novel approach for determining the reliability of sprinkler systems: a case study // *Result in Engineering* – 2023. – Vol. 17. – P.100843

Информация об авторах

Дмитрий Юрьевич Малышев, кандидат технических наук, доцент Инженерной школы энергетики НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. dmitry.mlv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1048-9466>

Жанна Андреевна Косторева, кандидат технических наук, ассистент Инженерной школы энергетики НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. zhanna.kostoreva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0545-9211>

Максим Сергеевич Тамашевич, аспирант Инженерной школы энергетики НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. maksimtamashевич@mail.ru

Потупила в редакцию: 05.04.2024

Поступила после рецензирования: 07.05.2024

Принята к публикации: 16.05.2024

REFERENCES

1. Alhassan A., Ozturk I., Al-Zyoued M.F., Bekun F.V. Coal consumption-environmental sustainability nexus in developed and developing major coal-consuming economies. *Heliyon*, 2024, vol. 10, e.25619.
2. Yin Y., Wang X., Xu L., Nie Y., Mei Y. Simultaneous removal of sulfur dioxide and nitrogen oxide from flue gas by phosphorus sludge: the performance and absorption mechanism. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2024, vol. 65, pp. 212–221.
3. Feng P., Li X., Wang J., Li J., Wang H., He L. The mixtures of bio-oil derived from different biomass and coal/char as biofuels: combustion characteristics. *Energy*, 2021, vol. 224, pp. 120132.
4. Si M., Liu M., Zhang Y., Liu B., Luo Z., Cheng Q. Effect of co-combustion of coal with biomass on the morphology of soot. *Renewable Energy*, 2024, vol. 226, pp. 120374.
5. Delyagin G.N. Questions of the theory of combustion of coal-water suspension in an air flow. *Combustion of highly water-cut fuel in the form of coal-water suspension*. Moscow, Nauka Publ., 1967. pp. 45–55. (In Russ.)
6. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Kaltaev A.Zh. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liquid pyrolysis products of wood waste. *Energy*, 2022, vol. 257, pp. 123813.
7. Kuznetsov G.V., Syrodoy S. V., Gutareva N.Yu., Nigay N.A. Mathematical modeling of the thermochemical processes of nitrogen oxides sequestration during combustion of wood-coal mixture particles. *Journal of the Energy Institute*, 2021, vol. 96, pp. 280–293.
8. Dorokhov V.V., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Anthropogenic emissions from coal-water slurry combustion: Influence of component composition and registration methods. *Environmental Research*, 2023, vol. 223, pp. 115444.
9. Zhao R., Dai R., Chen T., Qin J., Zhang J., Wu J. Investigation on combustion, gaseous pollutants emission and ash characteristics during co-combustion of semicoke and coal slime. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, vol. 9, pp. 106249.
10. Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Gutareva N.Y., Kostoreva Zh.A., Kostoreva A.A., Nigay N.A. Characteristics and conditions for ignition of bio-coal mixtures based on coal and forest combustible material. *Journal of the Energy Institute*, 2020, vol. 93, pp. 1978–1992.
11. Pu Y., Wang H., Wang X., Lim M., Yao B., Yang H., Lou C. Experimental study of the influence of synergistic effects on the co-firing characteristics of biomass and coal. *Journal of the Energy Institute*, 2024, vol. 115, pp. 101687.
12. Syrodoy S.V., Malyshev D. Yu., Nigay N.A., Purin M.V. Influence of the type of woody biomass on energy and environmental characteristics of the thermal preparation processes and ignition of bio-water-coal fuel particles. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, vol. 184, pp. 736–746.
13. Kuznetsov G.V., Malyshev D.Yu., Syrodoy S.V., Gutareva N.Yu., Purin M.V., Kostoreva Zh.A. Justification of the use of forest waste in the power industry as one of the components OF BIO-coal-water suspension fuel. *Energy*, 2022, vol. 239, pp. 121677.
14. Osintsev K.V. Development of a system for burning coal-water suspension. *Thermal power engineering*, 2014, no. 1, pp. 5–11. (In Russ.)
15. Aziz A. M., Mohamed H., Kania D., Ong H.C., Zainal B.S., Junoh H., Ker P.J., Silitonga A.S. Bioenergy production by integrated microwave-assisted torrefaction and pyrolysis *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, vol. 191, pp. 114097.
16. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Yu., Kostoreva Zh.A., Kostoreva A.A., Nigay N.A. Characteristics and conditions for ignition of bio-coal mixtures based on coal and forest combustible material. *Journal of the Energy Institute*, 2020, vol. 93, pp. 1978–1992.
17. *Scales 1000g 0.001g Aczet CY-1003*. (In Russ.) Available at: <https://www.totural.ru/catalog/72734096/72734319/> (accessed 1 April 2024).
18. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Kaltaev A. Zh. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liquid pyrolysis products of wood waste. *Energy*, 2022, vol. 257, pp. 124813.
19. Krainov A.V., Tashlykov A.A., Yukhnov V.E. *Laboratory workshop on the theoretical foundations of heat engineering*. Tomsk, TPU Publ., 2014. 111 p. (In Russ.)
20. Baharmi M., Givechi S. Full title: a novel approach for determining the reliability of sprinkler systems: a case study. *Result in Engineering*, 2023, vol. 17, pp. 100843.

Information about the authors

Dmitriy Yu. Malyshev, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. dmitry.mlv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1048-9466>

Zhanna A. Kostoreva, Cand. Sc., Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. zhanna.kostoreva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0545-9211>

Maxim S. Tamashevich, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. maksimtimashevich@mail.ru

Received: 05.04.2024

Revised: 07.05.2024

Accepted: 16.05.2024