

УДК 662.63

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ЗАЖИГАНИЯ ВЛАЖНОЙ ЧАСТИЦЫ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ

Ж. А. Косторева, А. А. Косторева, Д. Ю. Малышев, С. В. Сыродой

Томский политехнический университет, 634034 Томск, zhanna.kostoreva@yandex.ru

Проанализировано влияние влажности древесной биомассы на механизмы ее зажигания и горения. Исследования проводились на экспериментальной установке в условиях, соответствующих по температуре топочному пространству типичных котельных агрегатов ($873 \div 1273$ К). Установлено, что зажигание происходит в газовой фазе на расстоянии, зависящем от температуры внешней среды. Чем выше температура воздуха, тем больше расстояние от поверхности частицы до зоны начала горения газообразных продуктов пиролиза древесины. По результатам экспериментов установлено влияние вида древесной биомассы на характеристики и условия зажигания топливных частиц. Проведен анализ влияния ориентации волокон древесины в пространстве относительно направления вектора теплового потока на характеристики и условия зажигания.

Ключевые слова: частица древесины, биомасса, воспламенение, время задержки зажигания, механизм зажигания.

DOI 10.15372/FGV2023.9302
EDN DHFART

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из перспективных возобновляемых источников энергии является биомасса (отходы деревопереработки [1] и сельского хозяйства [2], лесной горючий материал [3]). Древесная биомасса имеет несколько вполне очевидных значимых преимуществ по сравнению как с традиционными энергоносителями (уголь или нефть), так и с ветрогенераторами и солнечными батареями. Во-первых, древесина является единственным углероднейтральным топливом [4]. При ее сжигании формируется диоксид углерода, который не нарушает общего баланса CO_2 в мировом геохимическом цикле углерода [5]. Во-вторых, древесная биомасса является относительно дешевым источником энергии: деревья различных видов и пород произрастают практически во всех (за исключением Антарктики и пустыни Атакама) регионах планеты. Соответственно, можно обоснованно предположить, что более активное внедрение в энергобаланс древесной биомассы приведет к сглаживанию ценовой «турбулентности» [6] на основных мировых торговых площадках, на которых торгуют энергоносителями. В-третьих (очень важное преимущество), древесная биомасса, как

правило, практически не содержит серы (во всяком случае много меньше, чем уголь). Соответственно, при ее сжигании образуется значительно меньше по сравнению с углем оксидов серы (SO_x). Также по результатам экспериментальных исследований [7] установлено, что при совместном сжигании угля с биомассой существенно снижаются концентрации оксидов азота и серы в дымовых газах по сравнению с горением только одного угля.

Все перечисленные выше преимущества создают предпосылки для активного внедрения биомассы в общий баланс тепло- и электрогенерации. Но при этом необходимо подчеркнуть, что активные попытки использования древесных отходов в качестве топлива (в странах ЕС опыты по сжиганию древесины проводились более чем на 150 ТЭС [8]) во всех экспериментах не привели к ожидаемым результатам. На настоящее время в мире насчитывается не более 15 ТЭС, работающих на древесной биомассе. Это обусловлено рядом объективных и субъективных причин. К объективным относится относительно низкая теплота сгорания биомассы: при сжигании даже самой теплотворной древесины (береза, теплота сгорания $22 \cdot 10^6$ Дж/кг) выделяется тепла меньше, чем при сжигании самого низкосортного (бурого) угля (теплота сгорания $27 \cdot 10^6$ Дж/кг) [9]. Кроме того, древесная биомасса, как прави-

ло, влажная (на практике максимальная влажность может достигать 80 % [10]). Сжигание такой биомассы существенно снижает эффективность котельного агрегата. К субъективным причинам относится проблема логистического обеспечения топливоподачи на ТЭС.

Однако анализ публикаций последних десяти лет (например, [11–13]), посвященных проблемам использования биомассы в энергетике, показывает, что главной (или одной из главных) проблемой внедрения древесной биомассы является отсутствие общей физической теории процессов зажигания и горения частиц древесной биомассы в условиях высокотемпературного нагрева. Разработка такой теории позволит существенно упростить процедуру оптимизации формы и размеров частицы топлива, обеспечивающих малое время задержки зажигания при низких энергозатратах на дробление древесины. Поэтому обоснование возможности эффективного сжигания биомассы результатами систематических экспериментальных исследований процессов зажигания и горения частиц влажной древесины в условиях значительных вариаций размеров и форм последних является важной и не решенной пока задачей современной биоэнергетики.

Цель исследования — установление по результатам экспериментов физических особенностей механизма зажигания частиц влажной древесной биомассы.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

1.1. Экспериментальная установка

Эксперименты выполнялись на установке, фотография которой приведена на рис. 1. Основные характеристики экспериментального стенда и методика обработки результатов эксперимента аналогичны приведенным в работах [14–17].

Зажигание проводится в камере сгорания, представляющей собой полый керамический цилиндр, заполненный воздухом. Цилиндр выполнен из корунда (Al_2O_3). С целью формирования внутри камеры условий нагрева, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов (температура окислителя $T_g = 873 \div 1273$ К), на внешнюю поверхность цилиндра крепился электрический нагреватель сопротивления (нихромовая проволока), представляющий собой систе-

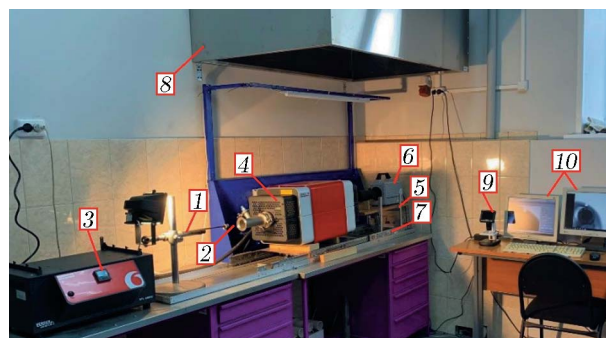


Рис. 1. Фотография экспериментального стенда:

1 — подставка для держателя, 2 — металлический держатель образца древесины, 3 — табло управления, 4 — высокотемпературная печь, 5 — передвижная платформа, 6 — высокоскоростная видеокамера, 7 — рельсы, 8 — система вентиляции, 9 — микроскоп, 10 — компьютер

му из трех автономных нагревательных секций. Температура в камере измерялась тремя хромель-алюмелевыми термопарами. Контроль и автоматизированное управление (посредством обратной связи) тепловым режимом камеры горения осуществлялись системой, состоящей из трех подсистем: нагреватель — измеритель температур — термопара, соединенных через пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор. Такая конструкция позволяет формировать по всему объему камеры сгорания в начальный период времени (перед проведением каждого отдельного эксперимента) стационарное и равномерное температурное поле.

Во избежание тепловых потерь за счет естественной конвекции торцы керамического цилиндра закрывали теплоизолирующими заслонками. Нагревательный комплекс совместно с камерой сгорания устанавливался в теплоизолированном кожухе. На оси симметрии цилиндра на расстоянии ≈ 0.5 м от его торца на металлической игле-держателе закреплялась частица древесной биомассы. С другой стороны печи находилась высокоскоростная видеокамера FASTCAM Phantom 5 (скорость видеосъемки до 10 000 кадр/с). Нагревательная и регистрационная системы располагались на подвижной, установленной на рельсы каретке.

1.2. Методика проведения эксперимента

В начальный момент времени вся нагревательно-регистрационная система начинала

двигаться по направлению к частице древесины. Перед вводом последней в печь торцевые заслонки нагревательного цилиндра открывались. При этом частицы биомассы попадали в фокус объектива высокоскоростной видеокамеры. Температура окислителя варьировалась в достаточно широком и при этом типичном (для современной котельной техники) диапазоне $873 \div 1273$ К.

Период времени от попадания частицы биомассы в фокус камеры до появления первого очага пламени вблизи поверхности частицы считался временем задержки зажигания (t_{ign}). Для определения временных характеристик процесса воспламенения проводились в идентичных условиях серии из 15 экспериментов при каждом значении температуры внешней среды T_g .

Методом статистической обработки [18] определялась случайная погрешность измерения t_{ign} . Количество опытов могло варьироваться (но не менее десяти) для достижения необходимой достоверности определения t_{ign} . Систематическая погрешность определения основных измеряемых параметров (T_g , t_{ign}) составляла не более 1 %. Особое внимание уделялось видеорегистрации частицы и области вблизи ее поверхности в период от начала теплового воздействия до появления области устойчивого горения (пламя занимает значительную часть объема воздуха вокруг частицы).

1.3. Экспериментальное топливо

В экспериментах использовались частицы древесной биомассы, вырезанные из монолитных сухих фрагментов древесины больших размеров, четырех пород дерева — береза, осина, сосна и кедр, влажность которых составляла $42 \div 45$ % (зажигание сухих частиц такой древесины исследовано в [19]). На первом этапе проводилась процедура фрагментации большого образца древесной биомассы: от доски при помощи пильного инструмента отделялись фрагменты пластинообразной формы толщиной 3 мм. Фрагменты биомассы, толщина которых отличалась от эталонных более чем на 1 %, отбраковывались. Из отобранных пластин при помощи лазерного станка с ЧПУ нарезали образцы древесины в форме куба с характерным размером $\delta = 3$ мм. На третьем этапе при помощи шлифовального и фрезерного

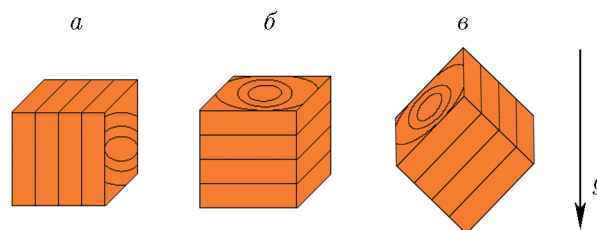


Рис. 2. Варианты положения частиц древесины в пространстве в зависимости от положения волокон

устройств проводилась подготовка поверхности частиц и придание им соответствующих размеров и формы. В итоге получали образцы с характерными размерами куба $\delta = 3$ мм и относительной влажностью $42 \div 45$ %.

Древесина, как правило, является средой с анизотропной теплопроводностью. Поэтому в проведенных экспериментах варьировалось положение частиц относительно направления вектора силы тяжести (рис. 2) (известно [20], что процессы термогравитационной конвекции во многих случаях оказывают значимое влияние на условия и характеристики зажигания конденсированных веществ).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 3 приведены типичные видеок cadры процесса воспламенения частиц влажной древесной биомассы (кедр) при температуре внешней среды 873 К. Светлые зоны на кадрах вне частицы соответствуют первым очагам газофазного горения продуктов пиролиза древесины.

Хорошо видно, что ориентация частиц в пространстве не оказывает существенного влияния на время задержки зажигания. Видно также, что горение газообразных продуктов пиролиза древесины начинается в малой окрестности угловых точек образца. На рис. 3 идентифицированы моменты времени, соответствующие первым признакам горения. Установлено, что уже через $0.005 \div 0.015$ с пламя охватывает весь образец — горение происходит вблизи всех шести его граней.

На рис. 4 приведены типичные видеок cadры процесса зажигания влажных частиц кедр при температуре внешней среды 1073 К. Из сравнения рис. 3 и 4 следует, что увеличение на 200 К температуры воздуха, в который

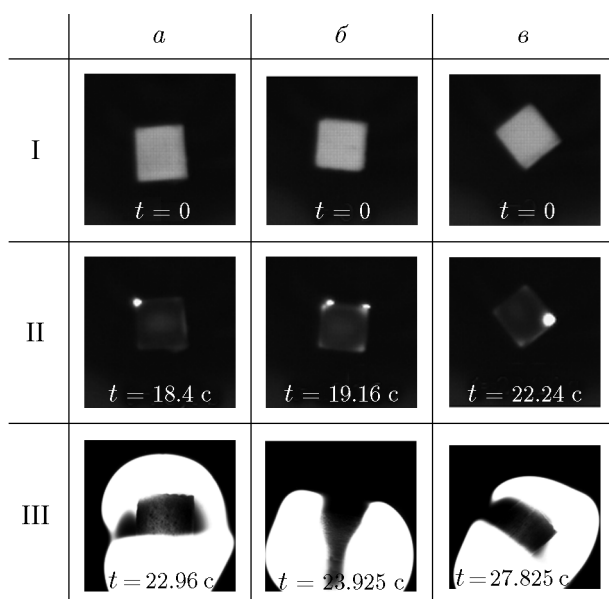


Рис. 3. Кадры типичной видеогаммы процесса воспламенения частиц влажной древесной биомассы (кедр) при температуре окислителя $T_g = 873 \text{ K}$ (конфигурация частиц *a*, *б*, *в* соответствует схеме, приведенной на рис. 2)

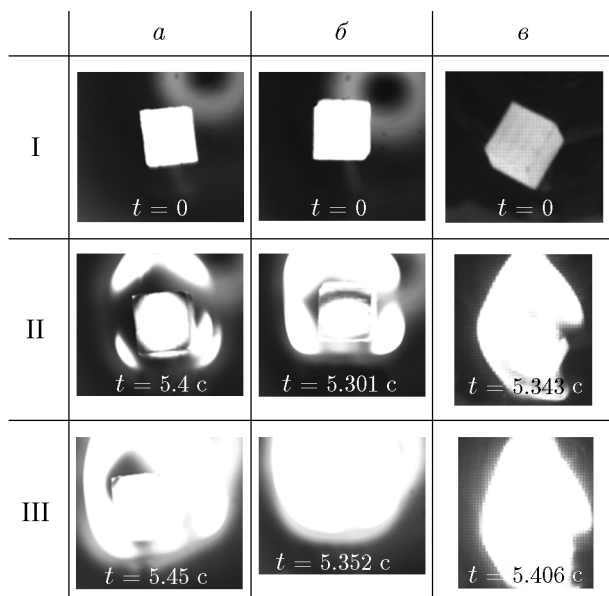


Рис. 4. Кадры типичной видеогаммы процесса воспламенения частиц влажной древесной биомассы (кедр) при температуре окислителя $T_g = 1073 \text{ K}$ (конфигурация частиц *a*, *б*, *в* соответствует схеме, приведенной на рис. 2)

вводится частица, в 4–5 раз снижает время задержки зажигания. При этом ориентация частиц в пространстве не оказывает существенного влияния на время задержки зажигания. Кадры рис. 4 свидетельствуют о газофазном

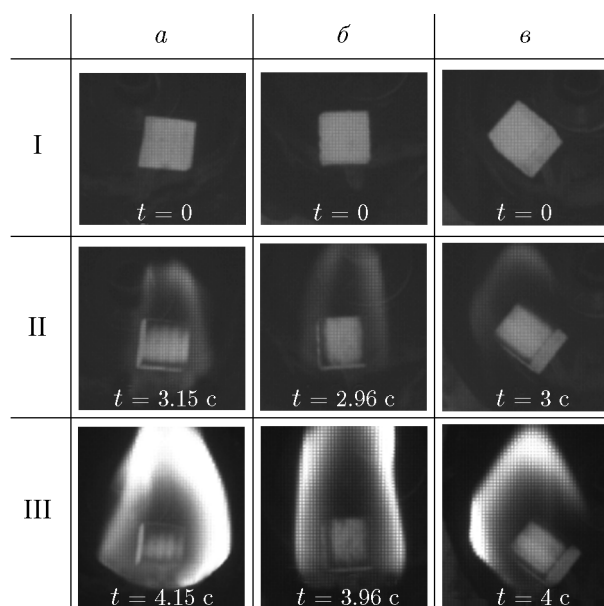


Рис. 5. Кадры типичной видеогаммы процесса воспламенения частиц влажной древесной биомассы (кедр) при температуре окислителя $T_g = 1273 \text{ K}$ (конфигурация частиц *a*, *б*, *в* соответствует схеме, приведенной на рис. 2)

механизме зажигания частиц влажной древесины кедр.

На рис. 5 представлены аналогичные рис. 3, 4 кадры при температуре внешней среды 1273 K . При такой достаточно высокой температуре зажигание происходит на расстоянии от поверхности граней образца, существенно большем, чем при температурах 873 и 1073 K . Повышение температуры среды приводит к смещению вверх зоны интенсивной химической реакции газообразных продуктов пиролиза древесины и воздуха (при меньшей температуре 873 K зажигание наблюдается в окрестности не только верхних, но и нижних угловых точек частиц древесины).

Установленные закономерности можно объяснить тем, что с ростом температуры увеличивается скорость испарения влаги и термического разложения древесины в слое, из которого влага уже удалена. Интенсивное испарение воды снижает температуру смеси паров воды и горючих газообразных продуктов пиролиза, и ее становится недостаточно для зажигания этой смеси у поверхности частицы. Только после вдува на достаточно большое расстояние от поверхности частицы горючие газы прогреваются в результате теплообмена с горячим воздухом до температур, при

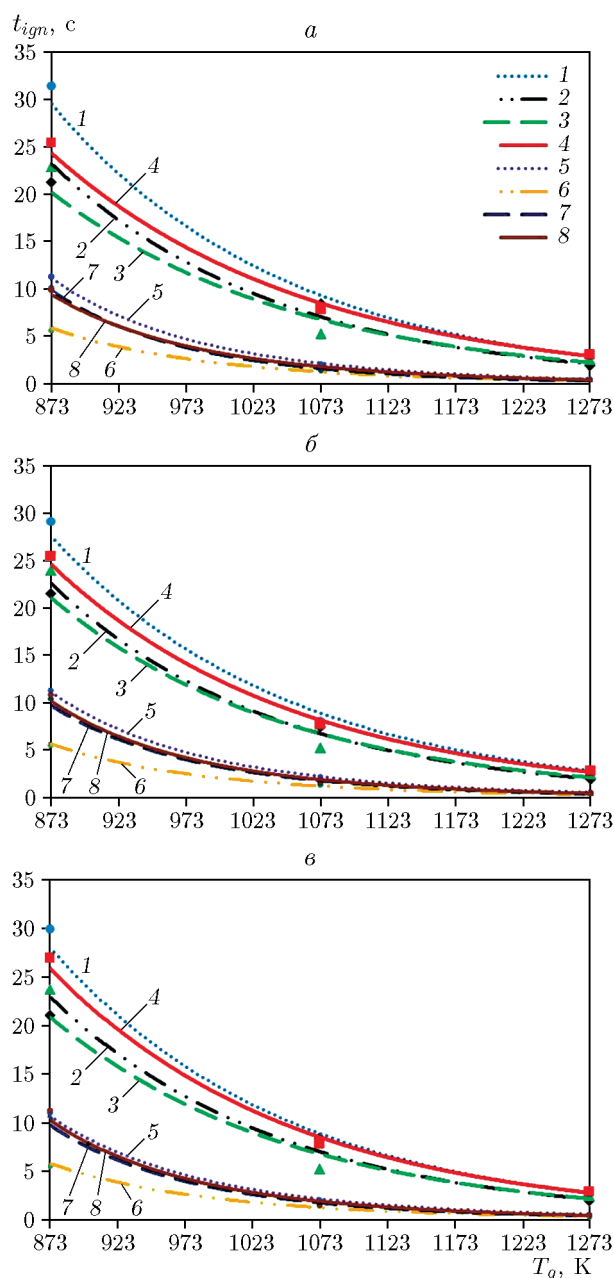


Рис. 6. Зависимость времени задержки зажигания частиц древесной биомассы от температуры внешней среды:

ориентация древесины в пространстве соответствует рис. 2; линии: 1 — береза влажная, 2 — осина влажная, 3 — кедр влажный, 4 — сосна влажная, 5 — береза сухая [19], 6 — осина сухая [19], 7 — кедр сухой [19], 8 — сосна сухая [19]

которых возможно зажигание. После начала газофазного горения выделяющаяся теплота интенсифицирует распространение горения вокруг всей частицы.

На рис. 6 приведены зависимости времени задержки зажигания частиц четырех видов

биомассы (сухих и влажных) от температуры внешней среды (воздуха). Видно, что с ростом температуры влажность частиц оказывает всё меньшее влияние на значения t_{ign} . При низких температурах (873 К) времена задержки зажигания сухих и влажных частиц всех четырех видов древесины отличаются в 2 ÷ 2.5 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов выполненных экспериментов можно сделать вывод, что зажигание частиц влажной древесной биомассы происходит в газовой фазе на расстоянии, зависящем от температуры внешней среды: чем больше температура воздуха, тем больше расстояние от поверхности частицы до зоны начала горения газообразных продуктов пиролиза древесины.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-00223).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhou J., Tabata T. Economic, societal, and environmental evaluation of woody biomass heat utilization: A case study in Kobe, Japan // *Renew. Energy*. — 2022. — V. 188. — P. 256–268. — DOI: 10.1016/j.renene.2022.02.043.
2. Vandecasteele B., Boogaerts Ch., Vandaele E. Combining woody biomass for combustion with green waste composting: Effect of removal of woody biomass on compost quality // *Waste Manage.* — 2016. — V. 58. — P. 169–180. — DOI: 10.1016/j.wasman.2016.09.012.
3. Silva J. P., Teixeira S., Grilo E., Peters B., Teixeira J. C. Analysis and monitoring of the combustion performance in a biomass power plant // *Cleaner Eng. Technol.* — 2021. — V. 5. — P. 100334. — DOI: 10.1016/j.clet.2021.100334.
4. Briones-Hidrovo A., Copa J., Tarelho L. A. C., Gonçalves C., da Costa T. P., Dias A. C. Environmental and energy performance of residual forest biomass for electricity generation: Gasification vs. combustion // *J. Cleaner Production*. — 2021. — V. 289. — P. 125680. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125680.

5. Kreutz T. G., Larson E. D., Elsidio C., Martelli E., Greig C., Williams R. H. Techno-economic prospects for producing Fischer-Tropsch jet fuel and electricity from lignite and woody biomass with CO₂ capture for EOR // Appl. Energy. — 2020. — V. 279. — 115841. — DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115841.
6. Jåstad E. O., Bolkesjø T. F., Trømborg E., Rørstad P. K. The role of woody biomass for reduction of fossil GHG emissions in the future North European energy sector // Appl. Energy. — 2020. — V. 274. — 115360. — DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115360.
7. Kuznetsov G. V., Yankovski S. A. Conditions and characteristics in ignition of composite fuels based on coal with the addition of wood // Therm. Eng. — 2019. — V. 66. — P. 133–137. — DOI: 10.1134/S0040601519020010.
8. Hansson J., Berndes G., Johnsson F., Kjærstad J. Co-firing biomass with coal for electricity generation — An assessment of the potential in EU27 // Energy Policy. — 2009. — V. 37, N 4. — P. 1444–1455. — DOI: 10.1016/j.enpol.2008.12.007.
9. Kuznetsov G. V., Yankovskii S. A., Tolokol'nikov A. A., Cherednik I. V. Mechanism of the suppression of sulfur oxides in the oxidative thermolysis products of coals upon their combustion in a mixture with dispersed wood // Solid Fuel Chem. — 2020. — V. 54. — P. 311–317. — DOI: 10.3103/S0361521920030076.
10. Asante B., Ye H., Nopens M., Schmidt G., Krause A. Influence of wood moisture content on the hardened state properties of geopolymer wood composites // Composites. Part A. — 2022. — V. 152. — 106680. — DOI: 10.1016/j.compositesa.2021.106680.
11. Míguez J. L., Porteiro J., Behrendt F., Blanco D., Patino D., Dieguez-Alonso A. Review of the use of additives to mitigate operational problems associated with the combustion of biomass with high content in ash-forming species // Renew. Sustain. Energy Rev. — 2021. — V. 141. — 110502. — DOI: 10.1016/j.rser.2020.110502.
12. Wang L., Hustad J. E., Skreiberg Ø., Skjevraak G., Grønli M. A critical review on additives to reduce ash related operation problems in biomass combustion applications // Energy Procedia. — 2012. — V. 20. — P. 20–29. — DOI: 10.1016/j.egypro.2012.03.004.
13. Clancy J. M., Curtis J., Ó'Gallachóir B. Modelling national policy making to promote bioenergy in heat, transport and electricity to 2030 — Interactions, impacts and conflicts // Energy Policy. — 2018. — V. 123. — P. 579–593. — DOI: 10.1016/j.enpol.2018.08.012.
14. Kuznetsov G. V., Syrodoy S. V., Gutareva N. Y., Kostoreva A. A., Kostoreva Zh. A. Ignition of the wood biomass particles under conditions of near-surface fragmentation of the fuel layer // Fuel. — 2019. — V. 252. — P. 19–36. — DOI: 10.1016/j.fuel.2019.03.126.
15. Kuznetsov G. V., Syrodoy S. V., Kostoreva A. A., Kostoreva Zh. A., Nigay N. A. Effect of concentration and relative position of wood and coal particles on the characteristics of the mixture ignition process // Fuel. — 2020. — V. 274. — 117843. — DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117843.
16. Syrodoy S. V., Kuznetsov G. V., Kostoreva Zh. A., Zabrodina I. K., Malyshev D. Yu. Ignition of a group of the woody biomass particles // Thermal Sci. Eng. Prog. — 2021. — V. 25. — 101017. — DOI: 10.1016/j.tsep.2021.101017.
17. Kuznetsov G. V., Syrodoy S. V., Kostoreva Zh. A., Malyshev D. V., Gutareva N. Yu. The effect of the distance between wood and coal particles on the characteristics of their joint ignition under conditions of high-temperature radiation-convective heating // J. Energy Inst. — 2021. — V. 97. — P. 13–26. — DOI: 10.1016/j.joei.2021.03.019.
18. Gosset W. S. The probable error of a mean // Biometrika. — 1908. — V. 6. — P. 1–25. — DOI: 10.2307/2331554.
19. Kuznetsov G. V., Syrodoy S. V., Kostoreva Zh. A., Kostoreva A. A., Malyshev D. Yu., Nigay N. A., Gutareva N. Yu. Influence of a cubic wood particle orientation in space on the characteristics and conditions of its ignition // Biomass Bioenergy. — 2023. — V. 170. — 106704. — DOI: 10.1016/j.biombioe.2023.106704.
20. Кузнецов Г. В., Максимов В. И., Шеремет М. А. Естественная конвекция в замкнутом параллелепипеде при наличии локального источника энергии // ПМТФ. — 2013. — Т. 54, № 4. — С. 86–95. — EDN: QZQGIX.

Поступила в редакцию 25.01.2023.

После доработки 07.02.2023.

Принята к публикации 05.04.2023.