

Научная статья
УДК 536.3, 614.84
doi: 10.17223/29491665/5/3

Исследование термического разрушения некоторых видов строительных материалов в результате воздействия радиационного теплового потока от очага пожара

Татьяна Ивановна Медведева¹, Денис Петрович Касымов^{2, 3},
Егор Леонидович Лобода^{4, 5}

^{1, 2, 4} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

^{3, 5} *Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск, Россия*

¹ *kotyayal@gmail.com*

^{2, 3} *denkasymov@gmail.com*

^{4, 5} *loboda@mail.tsu.ru*

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментальных исследований термического разрушения некоторых видов горючих строительных материалов, обработанных огнезащитными пропитками, в результате воздействия радиационного теплового потока от модельного источника тепла с характерной температурой, соответствующей максимальной температурой во фронте низового лесного пожара. Получены данные о глубине и скорости термического разрушения материалов.

Ключевые слова: природные пожары, горение, термическое разрушение, строительные материалы

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030) и в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Для цитирования: Медведева Т.И., Касымов Д.П., Лобода Е.Л. Исследование термического разрушения некоторых видов строительных материалов в результате воздействия радиационного теплового потока от очага пожара // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 5. С. 18–26. doi: 10.17223/29491665/5/3

Original article
doi: 10.17223/29491665/5/3

Study of thermal destruction of certain types of building materials as a result of exposure to radiation heat flow from a fire source

Tatyana I. Medvedeva¹, Denis P. Kasymov^{2, 3}, Egor L. Loboda^{4, 5}

^{1, 2, 4} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

^{3, 5} *V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation*

¹ *kotyayal@gmail.com*

^{2, 3} *denkasymov@gmail.com*

^{4, 5} *loboda@mail.tsu.ru*

Abstract. The article presents the results of experimental studies of the thermal destruction of certain types of combustible building materials treated with fire retardant impregnations as a result of exposure to radiation heat flow from a model heat source with a characteristic temperature corresponding to the maximum temperature in the front of a ground forest fire. Data were obtained on the depth and rate of thermal destruction of materials.

Keywords: wildland fires, combustion, flame, thermal destruction, building materials

Acknowledgments: The research was carried out with the support of the Development Program of Tomsk State University (Priority 2030) and within the framework of the state assignment of the Institute of Atmospheric Optics SB RAS.

For citation: Medvedeva, T.I., Kasymov, D.P. & Loboda, E.L. (2024) Study of thermal destruction of certain types of building materials as a result of exposure to radiation heat flow from a fire source. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 5. pp. 18–26. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/5/3

Введение

Древесина традиционно значится одним из самых популярных материалов в строительстве. В мировой практике строительной индустрии она находит массовое потребление как строительный материал для зданий и сооружений различного назначения.

Воспламенение построек в зоне раздела природной и городской сред является серьезной проблемой во всем мире из-за крупномасштабных пожаров. Для России, где леса занимают большую территорию, пожары на природно-урбанизированной территории являются значимой проблемой, а ущерб, наносимый реальному сектору экономики, исчисляется десятками и сотнями миллионов долларов в год.

Согласно [1], древесина представляет собой пористую реакционноспособную среду, физико-химические свойства которой изменяются при нагревании и горении. Данный материал может поддерживать как пламенное, так и тлеющее горение [2].

В мировой практике при оценке пожарной опасности строительных материалов и конструкций используются в основном методы испытаний, рекомендованные и утвержденные Международной организацией по стандартизации (ISO), Британскими стандартами (BS), немецкими промышленными стандартами (DIN), Французскими стандартами (NFP), Организацией по стандартизации северных стран (NORDTEST), Американским обществом по испытанию материалов (ASTM) и Национальной противопожарной ассоциацией США (NFPA). Эти системы объединяют более сотни методов, которые отличаются конструкциями приборов и установок, размерами и пространственным расположением образцов при испытаниях, источниками воздействия и зажигания, продолжительностью теплового воздействия и определяемыми показателями.

Скорость горения древесины вглубь является главным критерием при оценке огнестойкости и зависит от температуры окружающей среды, времени горения, влажности, вида древесины и других параметров. Чтобы понять и изменить огнестойкость древесины, необходимо знать как можно более подробно о процессах разложения. Результаты испытаний сильно зависят от различных параметров, включая изменения в составе газа, температуру, скорость нагрева и размер образца. Параметры, влияющие на скорость обугливания, достаточно широко изучены и представлены в литературе [3–10]. На основе полученных данных в настоящее время можно судить о показателях огнестойкости деревянных конструкций, однако большинство методов, используемых для оценки пожарной опасности древесины, относятся к классу

контактных методов (микротермопарная техника, метод молекулярно-пучковой зондовой масс-спектрометрии, методы термического анализа и т.д.). Проведенные исследования показали, что на время воспламенения образцов на основе древесины определяющее влияние оказывает плотность теплового потока.

Принципиально новым подходом является применение высокоточных инфракрасных камер научного класса при оценке пожароопасности строительных материалов из древесины в условиях теплового воздействия. Его перспективность заключается в высоком пространственном и временном разрешении при одновременном повышении оперативности получаемых данных.

Введение в древесину антисептиков, антипиренов, смол, а также пластификация и прессование позволяют улучшить свойства натуральной древесины и получить био- и огнестойкие материалы, обладающие повышенной прочностью, износостойкостью и формоустойчивостью [11]. В настоящее время разработано большое количество средств и способов огнезащиты древесины [2, 11], однако открытым остается вопрос оптимального состава огнезащиты и способа пропитки, так как природа и динамика реакций образования коксового слоя, играющего определяющую роль в механизме огнезащиты древесины, заметно различаются в зависимости от состава [12].

Таким образом, для оценки огнестойкости материалов и конструкций необходимо проведение экспериментов по оценке скорости и глубины термического разрушения различных строительных и изоляционных материалов в результате теплового воздействия, моделирующего воздействие пожара. С этой целью в лабораторных условиях исследовано воздействие эталонного источника теплового потока на характеристики термического разрушения древесных строительных материалов на основе древесины. Кроме того, проанализировано влияние некоторых огнезащитных составов для древесины на скорость и площадь термического разрушения образцов.

Описание экспериментальной установки и методики проведения эксперимента

Экспериментальная установка для исследования теплового воздействия на образцы горючих строительных материалов представлена на рис. 1 и включает в себя: образец 1, ИК-камеру JADEJ530SB 2, видеокамеру 3, источник теплового излучения 4 – модель абсолютно черного тела (АЧТ) – АЧТ 45/100/1100 Омского завода ОАО НПП «Эталон» с диапазоном изменения температуры от 100 до 1100 °C [13], оптический рельс 5 и кронштейн креп-

ления образца с кареткой 6. Температура излучателя выбиралась равной 1100 °С, что соответствует максимальным значениям температуры во фронте низового лесного пожара [14]. Таким образом, моделировался процесс теплового воздействия лучистым потоком от пожара.

Инфракрасная камера научно-исследовательского класса JADEJ530SB применялась для измерения поля температуры на поверхности образцов древесных строительных материалов. Она была укомплектована узкополосным оптическим фильтром с полосой пропускания 2,5–2,7 мкм. Выбор этого фильтра осуществлялся из двух соображений: диапазон измеряемых температур должен был быть достаточным и соответствующим протекающим в ходе эксперимента процессам и позволять при этом однозначно регистрировать появление

пламени. Исходя из этих условий и рекомендаций [15], был выбран упомянутый выше фильтр.

В качестве рассматриваемых образцов использовались древесные строительные материалы, которые наиболее часто встречаются в строительстве и популярны на рынке: фанера березовая ФК (сорт 4/4), древесно-стружечная плита (ДСП) с обычной поверхностью марки П-Б (класс эмиссии формальдегида Е2), ориентированно-стружечная плита (ОСП) Kronospan OSB 3 (применение в условиях умеренной влажности как внутри, так и снаружи зданий, без огнезащитной и водоотталкивающей пропитки) (рис. 2). Кроме этого, в экспериментах был использован древесный массив – осина, лиственница, ель и сосна (рис. 3).

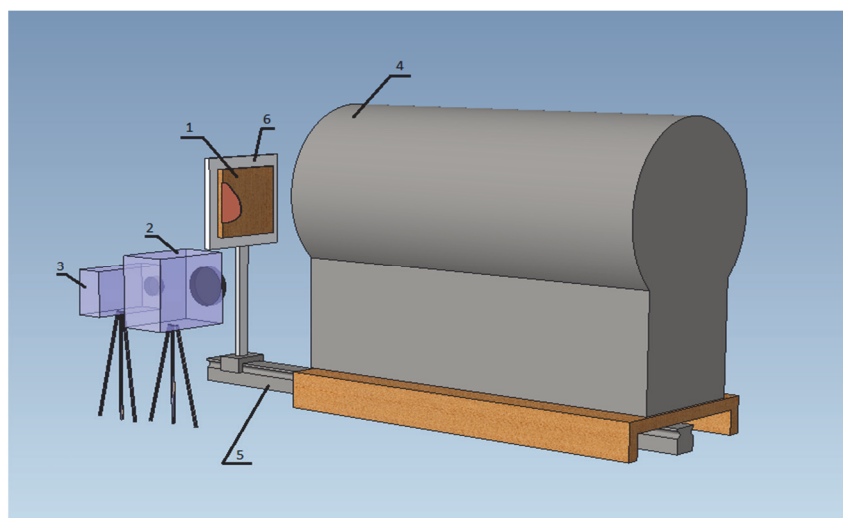


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – образец; 2 – инфракрасная камера JADE J530SB; 3 – видеокамера; 4 – модель абсолютно черного тела; 5 – оптический рельс; 6 – каретка с подставкой

Fig. 1. Experimental setup: 1 – sample; 2 – infrared camera JADE J530SB; 3 – video camera; 4 – black body model; 5 – optical rail; 6 – carriage with stand

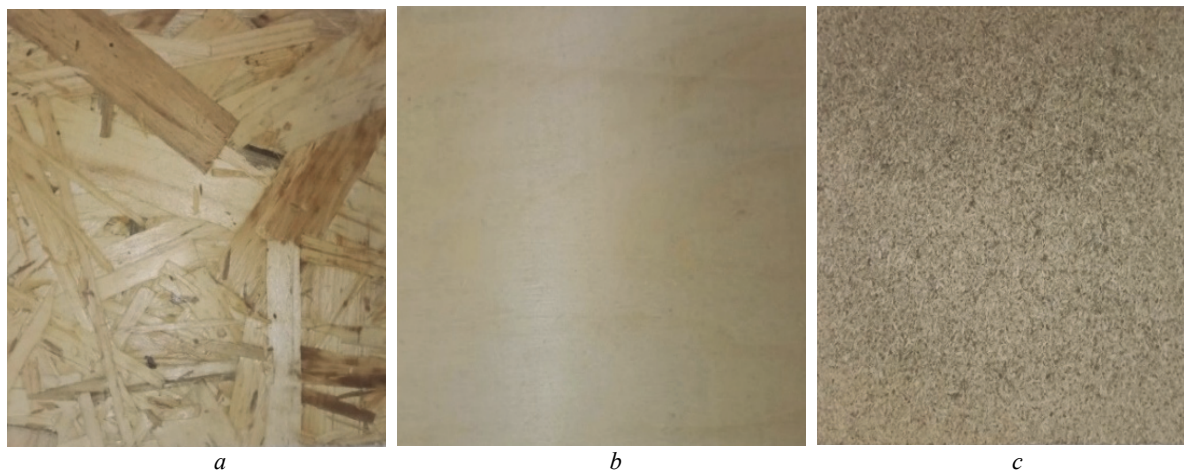


Рис. 2. Исследуемые образцы: а – ориентированно-стружечная плита (ОСП); б – фанера; с – древесно-стружечная плита (ДСП)

Fig. 2. Test samples: а – oriented strand board (OSB); б – plywood; с – particle board (chipboard)



Рис. 3. Исследуемые образцы: осина, лиственница, сосна, ель

Fig. 3. Test samples: aspen, larch, pine, spruce

Рассматриваемые образцы предварительно обрабатывались различными огнезащитными составами (огнебиозащитная пропитка для древесины «ФУКАМ», «ЗОТЕКС Биопирол», «МИГ-09»). Процедура поверхностной пропитки заключалась в нанесении на поверхность древесины и изделий из дерева водных растворов огнезащитных составов (антипиренов). Метод поверхностной пропитки применяется в основном для огнезащиты готовых деревянных конструкций, которые эксплуатируются в условиях, исключающих попадание влаги на защищаемые поверхности.

Отметим, что при поверхностной обработке огнезащитой глубина, на которую проникают антипирены в древесину, не больше 1 мм (поперек волокон) и не больше 5 мм (вдоль волокон), а при высыхании на древесине обычно образуется налет в виде мелких кристаллов.

На рис. 4 представлена кривая зависимости плотности теплового потока, воздействующего на обра-

зец, от расстояния от среза АЧТ, полученная с помощью датчика теплового потока DBG01. Расчет значений в соответствии с калибровкой завода изготовителя производился по методике [4].

Эксперимент проводился следующим образом. На оптический рельс устанавливалась подвижная каретка с фиксатором, на которой была закреплена подставка с образцом (см. рис. 1). После этого каретку с образцом устанавливали напротив АЧТ на определенном расстоянии для соответствующего значения теплового потока.

Расположение образца и оптико-электронной регистрирующей аппаратуры напротив нагревателя выбиралось таким образом, чтобы фиксировать влияние заданного значения теплового потока на торце образца. Тепловое воздействие на образец осуществлялось в течение 10 мин. Во время всего эксперимента производилась непрерывная съемка на ИК-камеру торцевой части образца при тепловом воздействии.

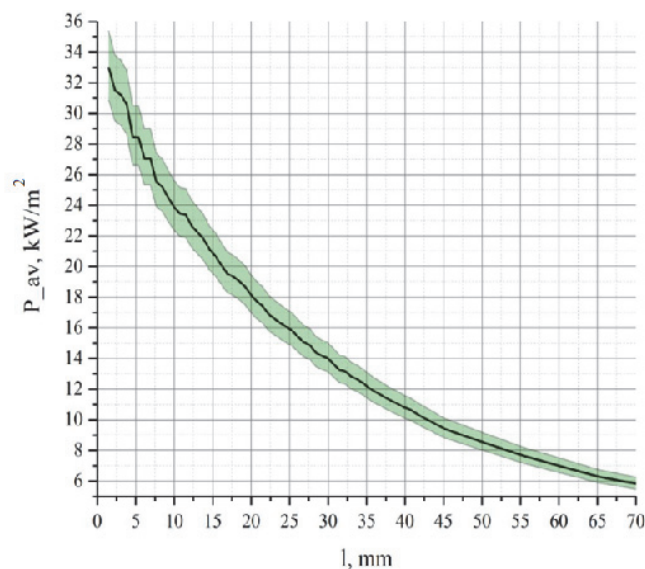


Рис. 4. Изменение теплового потока в зависимости от расстояния между датчиком и АЧТ

Fig. 4. Change in heat flow depending on the distance between the sensor and the black body

По результатам съемки на ИК-камеру были получены последовательности термограмм процесса термического разрушения торцевой части исследуемого образца, дальнейшая обработка которых производилась с использованием программного обеспечения «Altair».

Результаты экспериментов и их анализ

В результате были получены зависимости изменения площади термического разрушения от времени

при тепловом воздействии заданной интенсивности для рассмотренных образцов в отсутствие и при наличии поверхностной огнезащиты. Результаты представлены на рис. 5, *a–d*. Доверительные интервалы были рассчитаны с вероятностью 95%.

Максимальная площадь термического разложения у ДСП (по прошествии 10 мин теплового воздействия) без огнезащитной пропитки составила приблизительно 740,13 мм², что является на 4,6% меньше, чем у фанеры, и на 22,8% меньше, чем у ОСП.

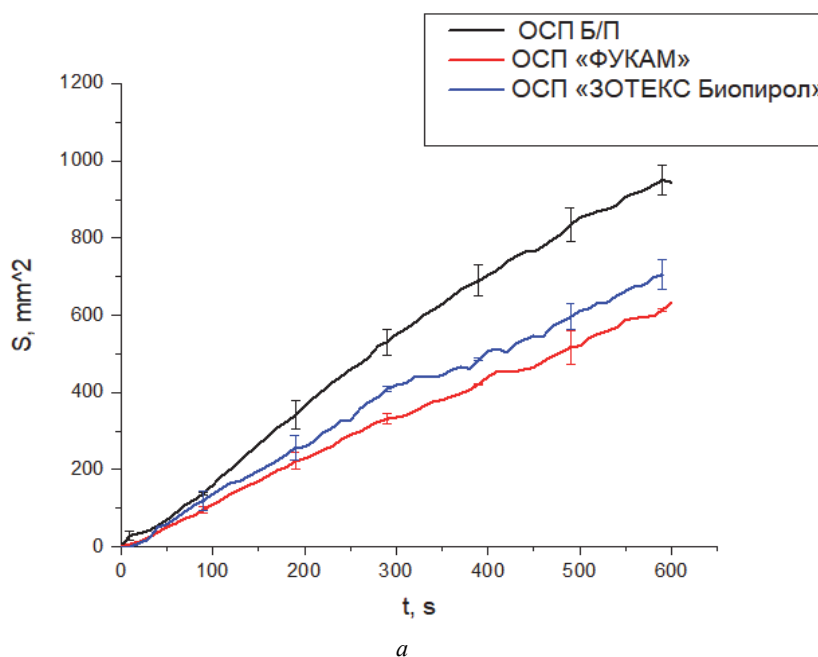


Рис. 5 (начало). График изменения площади обугливания торца материала во времени при 30 кВт/м²

Fig. 5 (beginning). Graph of changes in the charring area of the end of the material over time at 30 kW/m²

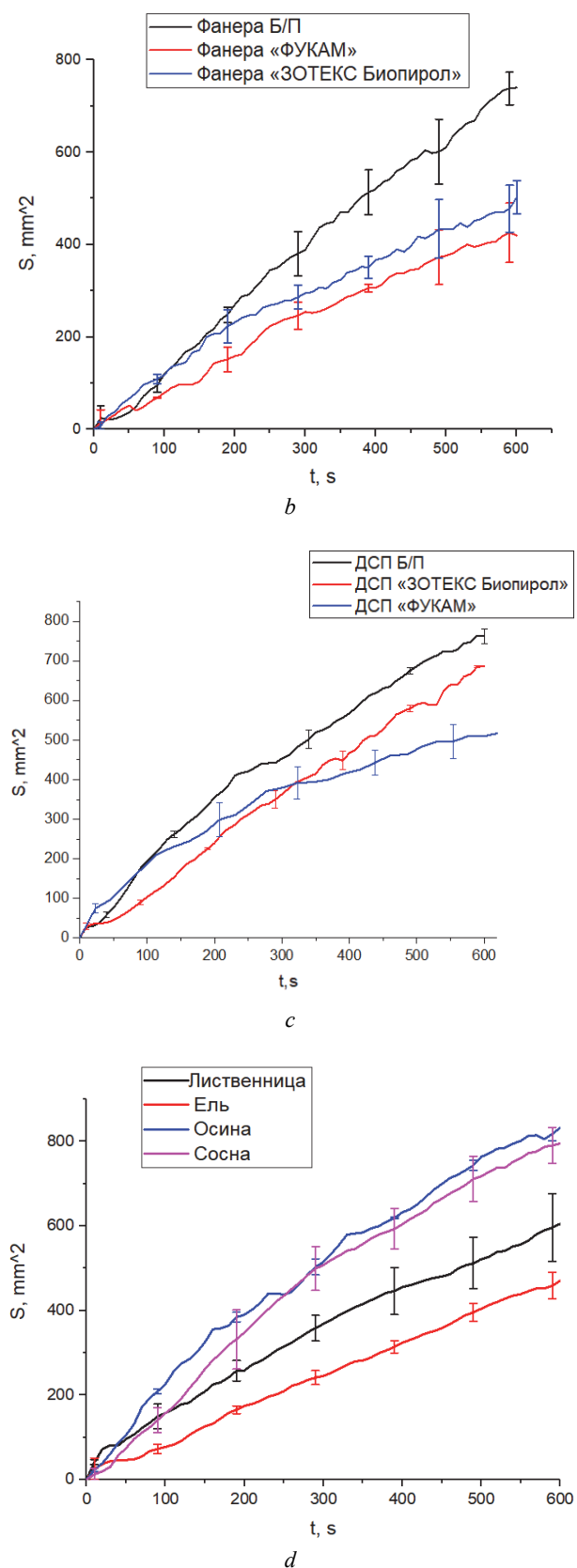


Рис. 5 (окончание). График изменения площади обугливания торца материала во времени при 30 кВт/м²

Fig. 5 (end). Graph of changes in the charring area of the end of the material over time at 30 kW/m²

1. При сравнении разных материалов, обработанных пропиткой «ФУКАМ», наибольшая площадь термического разложения наблюдалась у фанеры (по прошествии 10 мин теплового воздействия) и составила 425,81 мм², что является на 31,9% меньше, чем у ОСП, и на 38,1% меньше, чем у ДСП.

2. Аналогично среди материалов, обработанных огнезащитным составом «ЗОТЕКС Биопирол» (по прошествии 10 мин теплового воздействия), наибольшей площадью термического разложения со значением 754,14 мм² характеризовалась фанера, что является на 13,6% больше, чем у ДСП, и на 7,04% больше, чем у ОСП.

С помощью программного обеспечения «Altair» определена глубина термического разрушения материалов в разные моменты времени эксперимента, результаты представлены в табл. 1. Сравнительный анализ по табл. 1 показывает, что температура поверхности ОСП превышала 850 °С.

В табл. 2 указана максимальная температура образцов в течение 10 мин, результаты усреднялись по 3 экспериментам. По результатам измерения максимальной температуры поверхности древесных строительных материалов при мощности теплового потока 30 кВт/м² в течение 10 мин можно сказать, что самая высокая температура достигалась у образцов без пропитки при выбранных параметрах эксперимента.

Зная изменение глубины обугливания за выбранный момент времени, был произведен расчет по формуле

$$v_{char} = \frac{d_{char}}{t}. \quad (1)$$

Скорость обугливания равна отношению глубины обугливания ко временному промежутку. Полученные значения скорости (полное время сжигания 10 мин) обугливания усреднялись по 3 экспериментам (табл. 3).

Таблица 1

Глубина и скорость обугливания образцов при мощности теплового потока 30 кВт/м²

Время эксперимента	ОСП без пропитки d_{char} , мм	ОСП без пропитки, T , °С
1 мин	2,6	896
3 мин	7,9	886
5 мин	12,1	879
7 мин	14,2	860

Таблица 2

Максимальная температура древесных строительных материалов при мощности теплового потока 30 кВт/м² в течение 10 мин

Материал	ОСП, T , °С	ДСП, T , °С	Фанера, T , °С
Без пропитки	896	895	880
«ФУКАМ»	874	852	874
«ЗОТЕКС Биопирол»	882	861	870

Таблица 3

Скорость обугливания древесных строительных материалов при мощности теплового потока 30 кВт/м² за 10 мин с поверхностной пропиткой

Материал	ОСП		ДСП		Фанера	
	v_{char} , мм/мин	d_{char} , мм	v_{char} , мм/мин	d_{char} , мм	v_{char} , мм/мин	d_{char} , мм
Без пропитки	1,5	14,9	1,4	13,9	1,4	13,6
«ФУКАМ»	1,2	11,6	1,2	12,1	1,2	12,4
«ЗОТЕКС Биопирол»	1,5	14,5	1,3	13,1	1,2	12,1

Если сравнивать поверхностные пропитки, то видно, что у материалов ОСП и ДСП с пропиткой «ФУКАМ» глубина обугливания оказалась меньше, чем в пропитке «ЗОТЕКС Биопирол». А в случае фанеры глубина обугливания с пропиткой «ЗОТЕКС Биопирол» оказалась меньше, чем с пропиткой «ФУКАМ». Это может быть связано с разной структурой образцов.

Выводы

Проведено экспериментальное исследование влияния мощности теплового потока на характеристики

термического разрушения рассмотренных древесных строительных материалов с применением бесконтактных методов ИК-диагностики в узком спектральном интервале инфракрасных длин волн.

В результате проведенных экспериментов определены скорости термического разрушения плоских образцов, подверженных тепловому воздействию от модельного источника излучения, моделирующего радиационный тепловой поток от очага пожара. Кроме того, определена величина глубины термического разрушения образцов древесины в зависимости от

сорта древесины, а также типа применяемого огнезащитного состава. В частности, с помощью методов ИК-диагностики оценена максимальная температура на поверхности образцов в результате теплового воздействия.

Список источников

1. Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б. Горение и пожарная опасность древесины // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21, № 1. С. 19–32.
2. Babrauskas V. Charring rate of wood as a tool for fire investigations // Fire Safety Journal. 2005. Vol. 40. P. 528–554. doi: 10.1016/j.firesaf.2005.05.006
3. Гришин А.М. Общая физико-математическая модель зажигания и горения древесины // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2010. № 2. С. 60–70.
4. Касымов Д.П., Агафонцев М.В., Перминов В.В., Рейно В.В., Мартынов П.С. Исследование влияния мощности теплового потока на характеристики воспламенения и обугливания древесных строительных материалов с применением методов ИК-диагностики // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2019. № 59. С. 65–78.
5. Kasymov D.P., Agafontsev M.V., Marty'nov P. et al. Thermography of Wood-Base Panels During Fire Tests in Laboratory and Field Conditions // Wood and Fire Safety : Proceedings of the 9th international conference on Wood & Fire Safety 2020. [Cham] : Springer Nature, 2020. P. 203–209.
6. Гилетич А.Н., Хасанов И.Р., Макеев А.А. Пожарная безопасность многоэтажных зданий из деревянных конструкций // Пожарная безопасность. 2014. № 2. С. 116–125.
7. Леонович А.А. Огнезащита древесины и древесных материалов. СПб. : РИО ЛТА, 1994. 148 с.
8. Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б. Горение древесины и ее пожароопасные свойства. М. : Академия ГПС, 2010. 262 с.
9. Lowden L., Hull T. Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction // Fire Science Reviews. 2013. № 2 (4). P. 1–19.
10. Медведева Т.И., Агафонцев М.В., Касымов Д.П. Исследование влияния типа огнезащиты и способа ее нанесения на пожарную опасность древесины // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии : материалы XXII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко. Томск, 2021. С. 77–79.
11. Aseeva R., Serkov B., Sivenkov A. Fire Protection of Timber Building Structures and Constructions // Fire Behavior and Fire Protection in Timber Buildings. 2014. P. 199–226. doi: 10.1007/978-94-007-7460-5_9
12. Полищук Е.Ю., Сивенков А.Б., Кенжехан С.К. Прогрев и обугливание деревянных конструкций с тонкослойной огнезащитой // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 5(81). С. 3–14. doi: 10.18720/MCE.81.1
13. Агафонцев М.В., Касымов Д.П., Рейно В.В., Лобода Е.Л. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018660031 «Tempfild-v.1. Построение и анализ поля температуры по данным, полученным при помощи инфракрасной камеры JADEJ530SB», зарег. 28.08.2018 г.
14. Гришин А.М., Филков А.И., Лобода Е.Л., Кузнецов В.Т., Рейно В.В., Руди Ю.А. Физическое моделирование степных пожаров в природных условиях // Пожарная безопасность. 2010. № 2. С. 100–105.
15. Лобода Е.Л., Рейно В.В., Агафонцев М.В. Выбор спектрального интервала для измерения полей температуры в пламени и регистрации экранированных пламенем высокотемпературных объектов с применением методов ИК-диагностики // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 2. С. 124–128.

References

1. Aseeva, R.M., Serkov, B.B. & Sivenkov, A.B. (2012) Gorenie i pozharinaia opasnost' drevesiny [Combustion and fire safety of wooden materials]. *Pozharovzryvobezopasnost – Fire and Explosion Safety*. 21 (1). pp. 19–32.
2. Babrauskas, V. (2005) Charring rate of wood as a tool for fire investigations. *Fire Safety Journal*. 40. pp. 528–554. doi: 10.1016/j.firesaf.2005.05.006
3. Grishin, A.M. (2010) General physical-mathematical model of ignition and burning of wood. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Matematika I Mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2 (10). pp. 60–70. (In Russian)
4. Kasymov, D.P., Agafontsev, M.V., Perminov, V.V., Reyno, V.V. & Martynov, P.S. (2019) Experimental study of the influence of heat flux capacity on the ignition and charring characteristics of wood construction materials by using infrared diagnostics. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Matematika I Mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 59. pp. 65–78. (In Russian). doi 10.17223/19988621/59/7
5. Kasymov, D.P., Agafontsev, M.V., Marty'nov, P. & et al. (2020) Thermography of Wood-Base Panels During Fire Tests in Laboratory and Field Conditions. *Wood and Fire Safety : Proceedings of the 9th international conference on Wood & Fire Safety*. [Cham] : Springer Nature. pp. 203–209.
6. Giletich, A.N., Khasanov, I.R. & Makeev, A.A. (2014) Fire safety of multistoreyed buildings of wooden structures. *Fire safety*. 2. pp. 116–125. (In Russian).
7. Leonovich, A.A. (1994) *Ognezashchita drevesiny i drevesnykh materialov* [Fire protection of wood and wood materials]. Textbook. Saint Petersburg : LTA.
8. Aseeva, R.M., Serkov, B.B. & Sivenkov, A.B. (2010) *Gorenie drevesiny i ee požaroopasnye svoystva* [Wood combustion and its fire hazardous properties]. Moscow : Academy of GPS.
9. Lowden, L. & Hull, T. (2013) Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. *Fire Science Reviews*. 2(4). pp. 1–19.
10. Medvedeva, T.I., Agafontsev, M.V. & Kasymov, D.P. (2021) Issledovanie vliianiia tipa ognezashchity i sposoba ee naneseniia na požarnuiu opasnost' drevesiny [Study of the influence of the type of fire protection and the method of its application on the fire hazard

- of wood]. In: *Sopriazhennyye zadachi mekhaniki reagiruiushchikh sred, informatiki i ekologii* [Related problems of mechanics of reacting media, computer science and ecology]. Materials of the XXII All-Russian Scientific Conference with international participation, dedicated to the 100th anniversary of the birth of Academician N.N. Yanenko. Tomsk. pp. 77–79.
11. Aseeva, R.M., Serkov, B.B. & Sivenkov, A.B. (2014) Fire Protection of Timber Building Structures and Constructions. *Fire Behavior and Fire Protection in Timber Buildings*. doi: 10.1007/978-94-007-7460-5_9
 12. Polishchuk, E.Yu., Sivenkov, A.B. & Kenzhehan, S.K. (2018) Heating and charring of timber constructions with thin-layer fire protection. *Magazine of Civil Engineering*. 81 (5). pp. 3–14. doi: 10.18720/MCE.81.1
 13. Agafontsev, M.V., Kasymov, D.P., Reino, V.V. & Loboda, E.L. (2018) *Tempfild-v.1. Postroenie i analiz polia temperatury po dannym, poluchennym pri pomoshchi infrakrasnoi kamery JADEJ530SB* [Tempfild-v.1. Construction and analysis of the temperature field based on data obtained using the JADE J530SB infrared camera]. Certificate of state registration of computer program 2018660031
 14. Grishin, A.M., Filkov, A.I., Loboda, E.L., Kuznetsov, V.T., Reino, V.V. & Rudi, Yu.A. (2010) Physical modeling of steppe fires in natural conditions. *Fire Safety*. 2. pp. 100–105. (In Russian)
 15. Loboda, E.L., Reino, V.V. & Agafontsev, M.V. (2015) Vybor spektral'nogo intervala dlia izmereniia polei temperatury v plameni i registratsii ekranirovannykh plamenem vysokotemperaturnykh ob'ektov s primeneniem metodov IK-diagnostics [Selection of a spectral interval for measuring temperature fields in a flame and recording high-temperature objects shielded by a flame using IR diagnostic methods]. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 58(2). pp. 124–128.

Информация об авторах:

Медведева Татьяна Ивановна – аспирант кафедры физической и вычислительной механики Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: kotyua1@gmail.com

Касымов Денис Петрович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физической и вычислительной механики Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); старший научный сотрудник Лаборатории прогнозирования состояния атмосферы Института оптики атмосферы СО РАН (Томск, Россия). E-mail: denkasymov@gmail.com

Лобода Егор Леонидович – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физической и вычислительной механики Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); главный научный сотрудник Лаборатории прогнозирования состояния атмосферы Института оптики атмосферы СО РАН (Томск, Россия). E-mail: loboda@mail.tsu.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Medvedeva Tatyana I., Postgraduate Student, Department of Physical and Computational Mechanics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: kotyua1@gmail.com

Kasymov Denis P., Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Physical and Computational Mechanics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); Senior Researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: denkasymov@gmail.com

Loboda Egor L., Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Department of Physical and Computational Mechanics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); Chief Researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: loboda@mail.tsu.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 25.03.2024; одобрена после рецензирования 08.04.2024; принята к публикации 16.05.2024

The article was submitted 25.03.2024; approved after reviewing 08.04.2024; accepted for publication 16.05.2024