

УДК 536.37

DOI 10.17223/19988621/59/7

Д.П. Касымов, М.В. Агафонцев, В.В. Перминов, В.В. Рейно, П.С. Мартынов**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОЩНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ОБУГЛИВАНИЯ
ДРЕВЕСНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ИК-ДИАГНОСТИКИ¹**

Представлены результаты экспериментального исследования воздействия теплового потока от эталонного источника на характеристики обугливания и воспламенения древесных строительных материалов с использованием термографии. Получены значения скорости, глубины обугливания и времени воспламенения для рассматриваемых образцов. Предложена оригинальная методика постановки эксперимента с регистрацией ИК-изображения температурного поля торца исследуемого образца при воздействии на его фронтальную поверхность теплового потока. Проанализировано влияние некоторых огнезащитных составов на скорость и глубину обугливания образцов, а также время воспламенения. Полученные результаты могут служить в качестве дополнительных рекомендаций при разработке методов испытаний строительных материалов и огнезащитных составов на пожарную опасность.

Ключевые слова: *тепловой поток, древесные строительные материалы, ИК-диагностика, обугливание, воспламенение, огнезащита.*

При распространении лесных низовых и верховых пожаров выделяется большое количество тепла, которое может стать причиной воспламенения деревянных строений в населенных пунктах, расположенных близко к границе леса. В России причина увеличения числа природных пожаров, с одной стороны, связана с большой протяженностью лесных насаждений и, как следствие, повышением рисков появления пожаров, с другой – в недостаточном понимании физики природных пожаров, в частности перехода их на здания и строительные конструкции. Для обеспечения требуемого уровня пожарной безопасности нашей страны ведутся непрерывные и многоплановые работы: подготовка кадров, разработка методов и способов тушения пожаров; мониторинг и прогнозирование; совершенствование экспериментальной и учебно-материальной базы научно-исследовательских учреждений и другие. Несмотря на большой объем выполняемых работ по профилактике пожароопасных ситуаций, ежегодные показатели возникновения пожаров остаются достаточно высокими.

В работе [1] отмечено, что между закономерностями процессов возникновения и распространения лесных пожаров и пожаров в зданиях и сооружениях с применением конструкций и строительных материалов из древесины наблюдается много общего, что обусловлено органической природой лесных горючих материалов и древесины. Вопросы, связанные с эффектами от лесных и смешанных пожаров, обсуждались в работах [2–5]. Авторами отмечено, что при развитии горения в замкнутом помещении унос конвективного тепла и теплового излучения задерживается стенами этого помещения, кроме того, в помещении поддерживается опре-

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-00232).

деленная влажность, в то время как в лесу она определяется параметрами окружающей среды (осадки, время года, солнечное излучение, ветер). Также в помещении ограничен приток окислителя, в лесу же ситуация является обратной [6].

Изучение влияния пожаров на деревянные конструкции в натуральных крупномасштабных экспериментах затруднено из-за плохой воспроизводимости результатов и большой зависимости параметров экспериментов от внешних факторов [7–9]. В основном эти проблемы решаются в лабораторных условиях, позволяющих с некоторыми допущениями частично моделировать условия воздействия природных пожаров на образцы, выполненные из дерева.

В строительстве в качестве несущих конструкций, как правило, используют древесину хвойных пород, а как отделочные материалы применяется древесина лиственных пород. Одним из факторов, определяющих пожарную опасность древесины, является ее способность к воспламенению и распространению горения. В работе [3] выделены основные физико-химические процессы, протекающие при горении древесины, включающие в себя нагрев от фронта лесного пожара вследствие конвекции и излучения, сушку, пиролиз, образование конденсированных, газообразных и дисперсных продуктов пиролиза с последующим горением. Как результат над очагом горения древесины возникает конвективная колонка, содержащая дисперсные (частицы кокса и сажи) и газообразные продукты горения древесины, что представляет сложную задачу математической физики.

В литературе имеется большое количество экспериментальных работ по исследованию пожарной опасности древесины, которые свидетельствуют о влиянии различных факторов на ее пожароопасные показатели (порода и разновидность древесины, условия и продолжительность эксплуатации, влажность, интенсивность пожара и др.). Среди них можно отметить работы [1, 10–20]. 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.).

С развитием химической промышленности были разработаны средства – антипирены, которые частично или полностью предотвращают возгорание обработанных поверхностей. На рынке представлено множество подобных средств, обладающих своими техническими параметрами, расходом, степенью токсичности, а также ценовой категорией. В работе [1] отмечено, что в качестве способов огнезащиты в зданиях и сооружениях с несущими и ограждающими конструкциями из древесины наиболее широкое применение нашли конструктивные способы с помощью плитных и рулонных материалов; поверхностная и глубокая пропитка специальными огнезащитными составами (ОЗС), а также применение огнезащитных покрытий. Авторы [1] указывают на ограниченные данные по экспериментальному исследованию влияния огнезащитных покрытий на пределы огнестойкости деревянных конструкций, что подтверждает актуальность работы в данном направлении.

В настоящее время при исследовании процессов горения и природных пожаров активно применяются современные методы инфракрасной (ИК) диагностики [21–25]. Следует учесть тот факт, что до сих пор в литературе имеется достаточно мало сведений по результатам применения бесконтактных методов при огневых испытаниях конструкций и строительных материалов из древесины. В частности, в работах [11, 17, 26] рассмотрен опыт применения бесконтактного метода изме-

рения температуры при лабораторных и натурных огневых испытаниях фрагментов зданий и строительных конструкций из древесины. В работах [27, 28] экспериментально проанализировано влияние различных огнезащитных составов на пожароопасные свойства хвойных и лиственных пород древесины с применением методов ИК-диагностики. Выработаны некоторые рекомендации по применению термографии при испытании древесины [29], строительных материалов на огнестойкость и пожарную опасность, однако имеющиеся данные требуют проведения дополнительных экспериментов по исследованию пожароопасных характеристик различных материалов, используемых в строительстве, методом ИК-диагностики. Разработка на основе этих данных методики испытания различных строительных конструкций, выполненных из древесины, на огнестойкость и пожарную опасность с применением термографии позволит уменьшить экономическую составляющую при проведении такого рода работ при одновременном повышении оперативности получения данных и разрешающей способности.

Целью работы является исследование воздействия эталонного источника теплового потока на характеристики обугливания и воспламенения древесных строительных материалов с использованием методов ИК-диагностики. Впервые предложена оригинальная методика по регистрации ИК-изображения торца исследуемого образца при воздействии на его фронтальную поверхность теплового потока с высокой однородностью. Кроме того проанализировано влияние некоторых огнезащитных составов для древесины на скорость обугливания образцов, а также задержки зажигания.

Лабораторное оборудование и методика проведения эксперимента

Для оценки скорости обугливания в результате теплового воздействия в лабораторных условиях была подготовлена следующая лабораторная база, изображённая на (рис. 1).

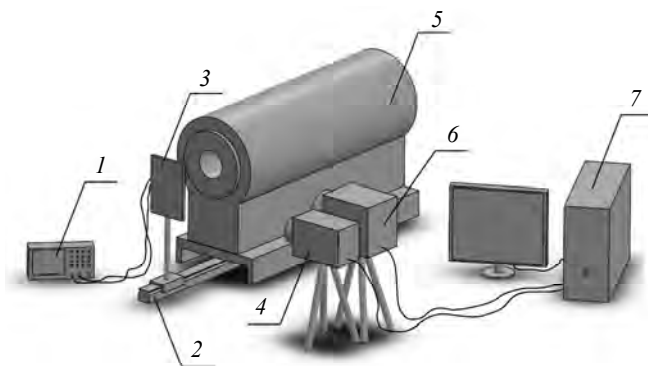


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – осциллограф Tektronix TDS-1002; 2 – оптический рельс; 3 – каретка с подставкой; 4 – видеокамера Canon HF R88; 5 – модель абсолютно черного тела; 6 – инфракрасная камера JADE J530SB; 7 – персональный компьютер

Fig. 1. Design of the experimental set-up: 1, oscilloscope Tektronix TDS-1002; 2, optical rail; 3, carriage with retainer; 4, video camera Canon HF R88; 5, blackbody model; 6, infrared camera JADE J530SB; and 7, personal computer

Экспериментальное оборудование включало: инфракрасную камеру научного класса JADE J530SB с использованием оптического фильтра, с рабочей длиной волны 2.5–2.7 мкм, позволяющего регистрировать температуру в диапазоне 300–800 °С; видеокамеру Canon HF R88 для оценки задержки зажигания рассматриваемых образцов древесных строительных материалов; излучатель АЧТ-45/100/1100 Омского завода ОАО НПП «Эталон» с диапазоном изменения температуры от 100–1100 °С, используемый в качестве модели абсолютно черного тела (АЧТ), который имитирует источник теплового излучения с излучательной способностью, близкой к 1, с апертурой равной 45 мм; датчик теплового потока Hukseflux SBG01 с рабочим диапазоном 0 – 100 кВт/м²; осциллограф Tektronix TDS-1002 для регистрации термо-ЭДС (электродвижущей силы, возникающей при использовании термопар); анализатор влажности AND MX-50 для контроля влагосодержания исследуемых образцов. Размер матрицы инфракрасной камеры 320×240 пикселей. Частота ИК-съемки составляла 5 кадров в секунду.

Использование узкополосного оптического фильтра было выбрано на основании закона Планка для плотности излучения абсолютно черного тела (АЧТ), ввиду того, что обугленный слой древесных материалов близок по своим оптическим свойствам к модели АЧТ. На основании этого была построена кривая Планка (рис. 2), соответствующая температуре 1100 °С

$$\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (1)$$

где $\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda}$ – мощность излучения, испускаемого единицей поверхности черного

тела в единичном интервале длин волн, h – постоянная Планка, k – постоянная Больцмана, c – скорость света, T – абсолютная температура черного тела, π – число Пи, λ – длина волны, e – экспонента [30].

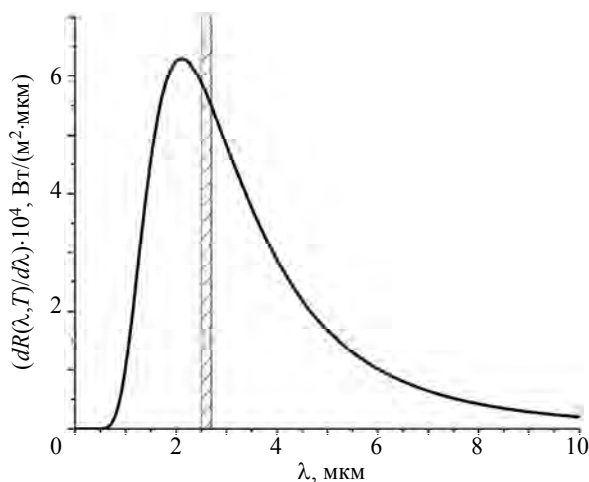


Рис. 2. Расчетная кривая Планка, соответствующая температуре 1100 °С, с выделенной рабочей спектральной полосой 2.5–2.7 мкм

Fig. 2. The calculated Planck curve corresponding to a temperature of 1100 °С with a selected operating spectral band of 2.5–2.7 μm

На основании рис. 2 можно сделать вывод о том, что использование узкополосного фильтра позволяет регистрировать инфракрасное излучение наибольшей интенсивности для выбранной температуры АЧТ. Выбор оптического фильтра с рабочей спектральной полосой 2.5–2.7 мкм позволяет уйти от влияния поглощающих свойств углекислого газа, выделяемого при горении (максимальная линия поглощения CO_2 наблюдается в основном в полосе длин волн 4.3–4.6 мкм).

В качестве образцов древесных строительных материалов использовались популярные на рынке фанера, древесно-стружечная плита (ДСП), ориентированно-стружечная плита (ОСП). Размер исследуемого образца был равен 100×100 мм, толщина варьировалась в зависимости от материала: 18 мм для ОСП и ДСП; 21 мм для фанеры.

В качестве огне-биозащитной пропитки для древесины использовались следующие средства: «ЗОТЕКС Биопирол», «Фенилакс», «ФУКАМ», применяемые, в частности, для пиленых, строганных и бревенчатых элементов конструкций жилищного, общественного, производственного и сельскохозяйственного назначения. Расход представленных средств, обеспечивающий II группу огнезащитной стойкости (по нормам пожарной безопасности (ГОСТ 16363)), выбирался исходя из рекомендаций завода-изготовителя. В качестве технологии пропитки образцов использовалось нанесение состава кистью [31], после чего производилась их сушка. Влагосодержание рассматриваемых образцов в эксперименте не превышало 10 %.

Эксперимент проводился следующим образом. На оптический рельс устанавливалась подвижная каретка с фиксатором, на которую была закреплена подставка с исследуемым образцом (рис. 1). Далее, каретка с образцом устанавливалась напротив АЧТ с фиксированным зазором. Предварительно, с помощью блока управления, задавалась температура теплового излучателя АЧТ, которая составляла 1100 °С, а погрешность поддержания температуры – 1 °С. Расположение образца и оптико-электронной регистрирующей аппаратуры напротив АЧТ выбралось таким образом, чтобы фиксировать влияние теплового потока на торце образца (рис. 3). Тепловое воздействие продолжалось в течение 10 минут. Дополнительно, для контроля температуры на поверхности образца, были проведены термпарные измерения. В исследуемый образец устанавливались две термопары (тип К, диаметр спая 200 мкм), спай одной из которых выходил на поверхность, а другой – был заглублен на 3 мм.

Для того чтобы определить плотность излучения АЧТ на различном удалении от его апертуры, было проведено дополнительное исследование. На подвижную каретку был закреплен датчик теплового потока SBG01 (рис. 4).

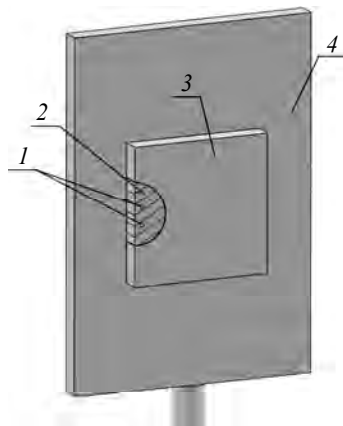


Рис. 3. Подставка с установленным образцом: 1 – отверстия для термопар; 2 – область воздействия теплового потока АЧТ; 3 – исследуемый образец; 4 – державка

Fig. 3. Retainer with a fixed sample: 1, outlet for thermocouples; 2, area of impact of the black-body heat flux; 3, studied sample; and 4, holder



Рис. 4. Измерение теплового потока от АЧТ: *a* – фотография экспериментальной установки; *b* – инфракрасное изображение установленного датчика теплового потока SBG01: 1 – выходная часть АЧТ, 2 – виртуальный измерительный инструмент программного обеспечения «Altair», с помощью которого контролировался зазор

Fig. 4. Measurement of the blackbody heat flux: (*a*) picture of the experimental setup; (*b*) infrared image of the installed heat flux sensor SBG01: 1, output part of the blackbody and 2, virtual measuring instrument in an Altair software for distance control

Перемещая каретку с датчиком, тем самым изменяя расстояние между АЧТ и датчиком теплового потока, производилась регистрация сигнала с помощью осциллографа. Полученные данные пересчитывались в соответствии с калибровкой завода изготовителя. В результате измерений максимальная плотность теплового потока (рис. 5) при зазоре 1 мм составила 40.1 кВт/м^2 , а максимальная ошибка между аппроксимационной и экспериментальной кривой составила 3.5 %.

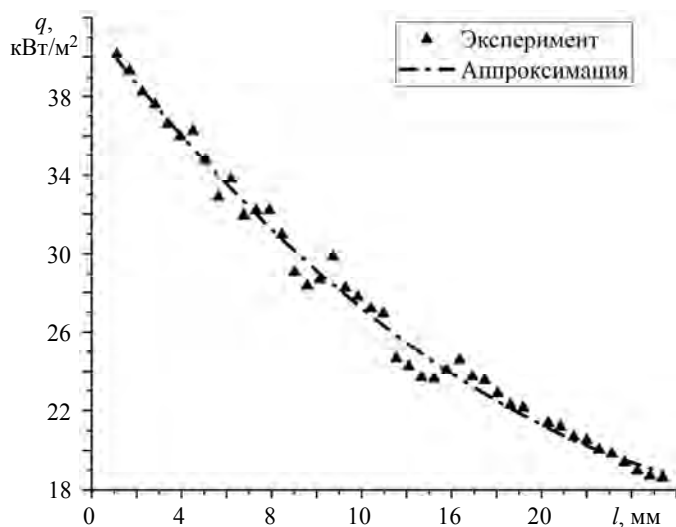


Рис. 5. Изменение теплового потока в зависимости от расстояния между датчиком и АЧТ
Fig. 5. Heat flux variation with distance between sensor and blackbody

Известно, что большое влияние на скорость обугливания и время задержки воспламенения древесины оказывает ее плотность и теплофизические свойства [1]. Максимально допустимый тепловой поток, при котором использование данной модели АЧТ является безопасным без повреждения аппаратной части, является порог 37.5 кВт/м^2 . Нижняя граница была подобрана экспериментальным путем. Таким образом, в качестве рабочего значения теплового потока был выбран интервал $32 - 37.5 \text{ кВт/м}^2$, который соответствует литературным данным по параметрам оценки пожароопасных свойств материалов из древесины [13].

В результате съемки на инфракрасную камеру были получены последовательности термограмм, дальнейшая обработка которых производилась с использованием программного обеспечения «Altair». Для анализа динамики изменения температуры на торце исследуемого образца была проведена следующая обработка. Зная размеры матрицы инфракрасной камеры и масштабный коэффициент (расстояние от объектива камеры до торца образца), на полученной термограмме были определены границы образца на кадре (рис. 6). Для того чтобы получить таблицу температур, соответствующую данному образцу, был произведен экспорт значений температуры, соответствующий каждому пикселю матрицы. В дальнейшем, из нее были удалены лишние значения в соответствии с ранее полученными данными о положении образца на кадре.

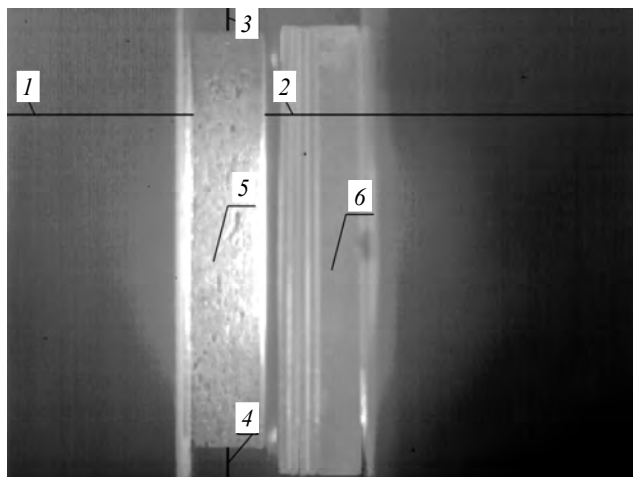


Рис. 6. Инфракрасное изображение образца ДСП: (1–4) – установленные измерительные инструменты для определения положения образца в кадре; 5 – исследуемый образец; 6 – модель АЧТ

Fig. 6. Infrared image of the chipboard sample: 1–4, installed measuring instruments for determining sample position in the frame; 5, studied sample; and 6, blackbody model

Результаты экспериментальных исследований

На рис. 7 представлена типичная последовательность термограмм распространения фронта тления на примере образца ДСП. Асимметричность распределения температуры на торце образца вызвана влиянием конвективного потока разогретых газообразных продуктов горения.

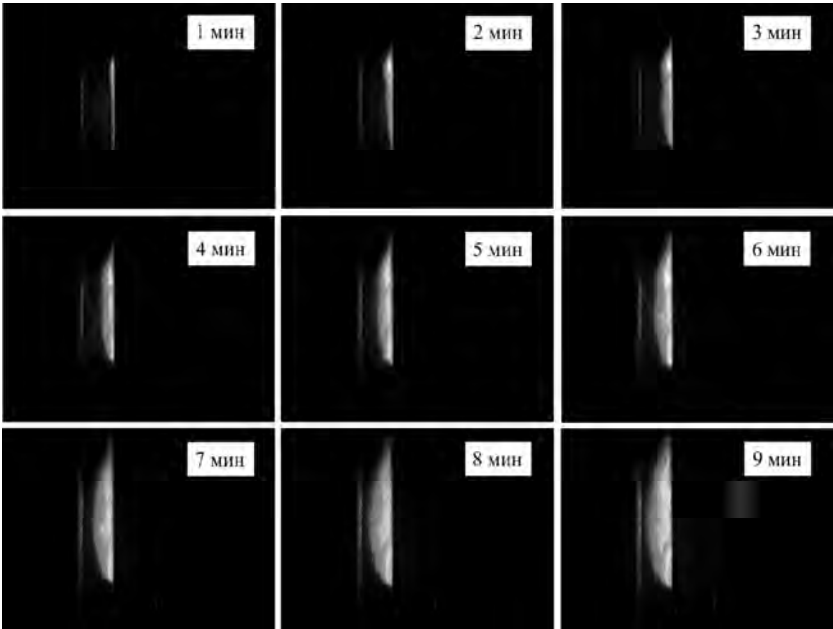


Рис. 7. Последовательность термограмм развития фронта тления на торце образца ДСП
Fig. 7. Sequence of thermograms of smouldering front propagation at the end of chipboard sample

Использование ИК-диагностики позволило оценить пожароопасные характеристики исследуемых образцов древесных строительных материалов в результате воздействия теплового потока. Данные представлены в табл. 1 (v_{char} – скорость обугливания, d_{char} – глубина обугливания).

Т а б л и ц а 1

**Скорость и глубина обугливания рассматриваемых образцов
древесных строительных материалов (осреднение по 3 опытам)
при плотности теплового потока 34.7 кВт/м²**

Материал	Фанера		ОСП		ДСП	
	v_{char} , мм/мин	d_{char} , мм	v_{char} , мм/мин	d_{char} , мм	v_{char} , мм/мин	d_{char} , мм
Без пропитки	1.38	13.77	1.42	14.29	1.42	14.19
«ЗОТЕКС Биопирол»	1.49	14.87	1.37	13.72	1.46	14.61
«Фенилакс»	1.52	15.30	1.43	14.10	1.44	14.40
«ФУКАМ»	1.13	11.34	1.47	14.65	1.07	12.47

В результате проведенных исследований с использованием термопар и инфракрасной камеры было получено хорошее согласование данных по максимальной температуре на поверхности, подверженной тепловому воздействию. В частности, для рассматриваемых образцов без использования огнезащитной пропитки, среднее значение температуры на поверхности составило 650 °С, а с использованием пропитки 820 °С.

Литературный обзор по теме исследования показал, что в настоящее время отсутствуют сведения по оценке скорости и глубины обугливания рассмотренных в настоящей работе древесных строительных материалов. Для верификации полученных экспериментальных данных было проведено сравнение с работой [1], в которой обобщены результаты по средней скорости обугливания древесины лиственных и хвойных пород в зависимости от интенсивности внешнего теплового потока в интервале 10–40 кВт/м². Ввиду того, что в составе исследуемых образцов присутствуют дополнительные связующие компоненты (синтетические смолы и пр.), для сравнения была выбрана фанера как материал, наиболее близкий по составу к массиву березы. Расхождение результатов составило 30 %. Авторы полагают, что это связано с многослойной структурой материала фанеры.

Время воспламенения образцов в результате теплового воздействия ($q = 37.5$ кВт/м²) представлены в табл. 2.

Таблица 2

Время воспламенения образцов

Тип материала	Огнезащитный состав	Время воспламенения*, с
ОСП	Без пропитки	24
	«ЗОТЕКС Биопирол»	32
	«Фенилакс»	30
	«ФУКАМ»	30
Фанера	Без пропитки	23
	«ЗОТЕКС Биопирол»	52
	«Фенилакс»	38
	«ФУКАМ»	43
ДСП	Без пропитки	35
	«ЗОТЕКС Биопирол»	38
	«Фенилакс»	37
	«ФУКАМ»	53

* осреднение производилось по 6 повторениям.

Следует отметить, что при выбранных параметрах эксперимента для необработанных материалов быстрее всего загорались образцы фанеры и ОСП, а время загорания ДСП увеличивалось на 30 %. Это связано, по-видимому, с различиями в химическом составе, структуре материала и разной степенью впитываемости. В частности, применение огнезащитных составов для образцов фанеры увеличивало время воспламенения в 1.7–2 раза. Похожий эффект наблюдался для образца ДСП с пропиткой «ФУКАМ» – увеличение времени воспламенения в 1.5 раза. Для остальных случаев вклад в увеличение времени воспламенения составил не более 20 %.

Результаты проведенных экспериментов показывают, что наличие огнезащитной пропитки на поверхности материала увеличивает время загорания образца, но не исключает возможности появления пламени на поверхности. Это может быть обусловлено образованием на поверхности карбонизированного слоя, кокса, препятствующего быстрому прогреву образца. Анализ полученных данных показывает, что вклад рассмотренных огнезащитных составов на увеличение времени воспламенения образца минимален с учетом выбранного способа пропитки, что подтверждается в работе [31].

Заключение

Предложена оригинальная методика постановки эксперимента с регистрацией ИК-изображения температурного поля торца исследуемого образца при воздействии на его фронтальную поверхность теплового потока. Использование в качестве излучателя теплового потока эталонного излучателя АЧТ позволяет иметь исследователю источник тепла с высокой однородностью плотности теплового потока, большой диапазон задаваемых температур с погрешностью поддержания 1.0 °C задаваемой температуры.

Проведено экспериментальное исследование влияния мощности теплового потока на характеристики воспламенения и обугливания древесных строительных материалов с применением бесконтактных методов ИК-диагностики в узких спектральных диапазонах инфракрасных длин волн. Показано, что эффективность обработки поверхностными огнезащитными пропитками разных производителей поверхностей выбранных строительных материалов не превышает 30 % на основе метода определения времени воспламенения, скорости и глубины обугливания.

Полученные результаты могут служить в качестве дополнительных рекомендаций при разработке методов испытаний строительных материалов и огнезащитных составов на пожарную опасность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б. Горение и пожарная опасность древесины // Пожаровзрывобезопасность. 2012. № 21 (1). С. 19–32.
2. Chandler C., Cheney P., Thomas P., Trabaud L., Williams D. Forest fire behavior and effects (Fire in Forestry). New York: John Wiley and Sons, 1983. V. 1. 450 p.
3. Гришин А. М. Общая физико-математическая модель зажигания и горения древесины // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2010. № 2. С. 60–70. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000461276>
4. North M., Stephens S., Collins B.M. Using fire to increase the scale, benefits, and future maintenance of fuels treatments // J. Forestry. 2012. V. 110. Iss. 7. P. 392–401. DOI: <https://doi.org/10.5849/jof.12-021>.
5. Campbell J.L., Ager A.A. Forest wildfire, fuel reduction treatments, and landscape carbon stocks: A sensitivity analysis // Journal of Environmental Management. 2013. V. 121. P. 124–132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.02.009>.
6. Rehm R.G., Hamins A., Baum H.R., McGrattan K.B., Evans D.D. Community-scale fire spread // Proceedings of the California's 2001 Wildfire Conference, California. 2002. P. 126–139.
7. Morandini F., Silvani X. Experimental investigation of the physical mechanisms governing the spread of wildfires // Int. J. Wildland Fire. 2010. V. 19. Iss. 5. P. 570–582. DOI: 10.1071/WF08113.
8. Filkov A.I., Prohanov S.A., Mueller E., Kasymov D.P., Martynov P., Houssami M., Thomas J.C., Skowronski N., Butler B., Gallagher M.R., Clark K., Mell W., Kremens R., Hadden R.M., Simeoni A. Investigation of firebrand production during prescribed fires conducted in a pine forest // Proceedings of the Combustion Institute. 2017. V. 36. Iss. 2. P. 3263–3270. DOI: 10.1016/j.proci.2016.06.125.
9. Sullivan A. L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 1: Physical and quasi-physical models // Int. J. Wildland Fire. 2009. V. 18. P. 349–368. DOI: <https://doi.org/10.1071/WF06143>.
10. Babrauskas V. Charring rate of wood as a tool for fire investigations // Fire Safety Journal. 2005. V. 40. P. 528–554. DOI: 10.1016/j.firesaf.2005.05.006.
11. Grishin A.M., Filkov A.I., Loboda E.L., Reyno V.V., Kozlov A.V., Kuznetsov V.T., Kasymov D.P., Andreyuk S.M., Ivanov A.I. A Field Experiment on Grass Fire Effects on Wooden Constructions and Peat Layer Ignition // Int. J. Wildland Fire. 2014. V. 23. P. 445–449.

12. Hirle S., Balog K. The effect of the heat flux on the self-ignition of oriented strand board // Research Papers Faculty of Materials Science and Technology in Trnava. 2017. V. 25. Iss. 40. P. 123–129.
13. Bartlett A.I., Hadden R.M., Bisby L.A. A review of factors affecting the burning behaviour of wood for application to tall timber construction // Fire Technology. 2019. V. 55. Iss. 1. P. 1–49.
14. Hedayati F., Yang W., Zhou A. Effects of moisture content and heating condition on pyrolysis and combustion properties of structural fuels // Fire and Materials. 2018. V. 42. Iss. 7. P. 741–749.
15. Polishchuk E.Yu., Sivenkov A.B., Kenzhehan S.K. Heating and charring of timber constructions with thin-layer fire protection // Magazine of Civil Engineering. 2018. V. 81. Iss. 5. P. 3–14. DOI: 10.18720/MCE.81.1.
16. Hasburgh L. E., Stone D. S., Zelinka S. L. Laboratory investigation of fire transfer from exterior wood decks to buildings in the Wildland–Urban interface // Fire Technology. 2017. V. 53. Iss. 2. P. 517–534. DOI:10.1007/s10694-016-0588-0.
17. Vermesi I., Di Domizio M.J., Richter F., Weckman E.J., Rein G. Pyrolysis and spontaneous ignition of wood under transient irradiation: Experiments and a-priori predictions // Fire Safety Journal. 2017. V. 91. P. 218–225. DOI:10.1016/j.firesaf.2017.03.081.
18. Мельников В.С., Хасанов И.Р., Кириллов С.В., Васильев В.Г., Ванин С.А., Щербаков М.И., Гарсков Р.В. Термографирование при огневых испытаниях фрагментов зданий и строительных конструкций // Пожарная безопасность. 2015. № 3. С. 83–90.
19. Мельников В.С., Хасанов И.Р., Кириллов С.В., Васильев В.Г., Ванин С.А., Потемкин С.А. Натурные огневые испытания фрагментов зданий из сэндвич-панелей // Пожарная безопасность. 2016. № 2. С. 120–127.
20. Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б. Горение древесины и ее пожароопасные свойства: монография. М.: Академия ГПС, 2010. 262 с.
21. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: ИД Спектр, 2009. 544 с.
22. O'Brien J.J., Loudermilk E.L., Hornsby B., Hudak A.T., Bright B.C., Dickinson M.B., Hiers J.K., Teske C., Ottmar R.D. High-resolution infrared thermography for capturing wildland fire behaviour: RxCADRE 2012 // Int. J. Wildland Fire. 2016. V. 25. P. 62–75. DOI: 10.1071/WF14165.
23. Rios O., Pastor E., Valero M.M., Planas E. Short-term fire front spread prediction using inverse modelling and airborne infrared images // Int. J. Wildland Fire. 2016. V. 25. P. 1033–1047. DOI: <http://dx.doi.org/10.1071/WF16031>.
24. Sofan P., Bruce D., Jones E., Marsden J. Detecting peatland combustion using shortwave and thermal infrared landsat-8 data // Advances in Forest Fire Research. 2018. P. 969–979. DOI: https://doi.org/10.14195/978-989-26-16-506_106.
25. Valero M.M., Jimenez D., Butler B., Mata C., Rios O., Pastor E., Planas E. On the use of compact thermal cameras for quantitative wildfire monitoring // Advances in Forest Fire Research. 2018. P. 1077–1086. DOI: https://doi.org/10.14195/978-989-26-16-506_119.
26. Лобода Е.Л., Касымов Д.П., Фильков А.И., Рейно В.В., Агафонцев М.В. Некоторые аспекты исследования в полевых и лабораторных условиях природных пожаров с применением термографии // Актуальные проблемы пожарной безопасности: тез. докл. XXX Междунар. науч.-практ. конф. М.: ВНИИПО. 2018. С. 295–300.
27. Kasymov D.P., Agafontsev M.V., Perminov V.V. Estimation of the influence of wood-fire retardants on fire behavior of some types of wood construction materials // J. Physics: Conference Series. 2018. V. 1105. P. 1–7. DOI: 10.1088/1742-6596/1105/1/012039.
28. Kasymov D.P., Agafontsev M.V., Perminov V.V., Martynov P. Investigation of the ignition of wood structural materials (with and without fire retardant treatment) under the influence of a model fire of irregular intensity // EPJ Web Conf. 2019. V. 196. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201919600038>.
29. Лобода Е.Л., Матвиенко О.В., Агафонцев М.В., Рейно В.В. Применение термографии для оценки масштабов турбулентности в пламени // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 12. С. 1001–1006. DOI: 10.15372/AOO20181210.

30. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. М.: Мир, 1988. 416 с.
31. Chernenko V.A. Technology of wood impregnation by polymeric compositions // Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. V. 7. Iss. 58. P. 32–52. DOI: 10.18720/CUBS.58.3.

Статья поступила 21.01.2019 г.

Kasymov D.P., Agafontsev M.V., Perminov V.V., Reyno V.V., Martynov P.S. 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

DOI 10.17223/19988621/59/7

Keywords: heat flux, wood construction materials, infrared diagnostics, charring, ignition, fire protection.

Much heat is released during the propagation of ground and crown fires, which can be a reason of wood construction firing in the settlements located near the forest border. There are a great number of experimental studies on the fire hazard of wooden materials. However, the available data require additional experimental results to study the fire-hazardous characteristics of various construction materials by using infrared diagnostics.

The paper presents the results of experimental study of the impact of heat flux emitted by a standard source on the charring and ignition characteristics of wood construction materials using thermography. The effect of various fire retardants on the charring rate and depth of the samples as well as the ignition time are analyzed. The following widespread wood construction materials are used as studied samples: plywood, chipboard, and oriented strand board.

As a result of experimental studies carried out using thermocouples and infrared camera, a good agreement in the maximum temperature on the surface exposed to the heat effect was obtained. The use of the fire retardant impregnation results in an increase in the ignition time of the sample. At the same time it does not eliminate a possibility of the flame occurrence on the sample surface. The experimental method proposed in this paper allows one to estimate the charring depth and rate of the material exposed to the heat flux effect, and to determine the ignition time.

Financial support. This study was supported by the Russian Science Foundation (project No. 18-79-00232).

KASYMOV Denis Petrovich (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: denkasymov@gmail.com

AGAFONTSEV Mikhail Vladimirovich (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: kim75mva@gmail.com

PERMINOV Vladislav Valer'evich (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ya.vladperminov2013@yandex.ru

REYNO Vladimir Vladimirovich (V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russian Federation). E-mail: reyno@iao.ru

MARTYNOV Pavel Sergeevich (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: martypavel@bk.ru

REFERENCES

1. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. (2012) Gorenje i požarnaya opasnost' drevesiny [Combustion and fire safety of wooden materials]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and Explosion Safety*. 21(1). pp. 19–32.
2. Chandler C., Cheney P., Thomas P., Traub L., Williams D. (1983) *Fire in Forestry. Forest fire behavior and effects. Vol. 1*. New York: John Wiley and Sons.
3. Grishin A.M. (2010) Obshchaya fiziko-matematicheskaya model' zazhiganiya i goreniya drevesiny [Physical and mathematical model of ignition and combustion of wooden materials]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2(10). pp. 60–70.
4. North M., Stephens S., Collins B.M. (2012) Using fire to increase the scale, benefits, and future maintenance of fuels treatments. *Journal of Forestry*. 110(7). pp. 392–401. DOI: 10.5849/jof.12-021.
5. Campbell J.L., Ager A.A. (2013) Forest wildfire, fuel reduction treatments, and landscape carbon stocks: A sensitivity analysis. *Journal of Environmental Management*. 121. pp. 124–132. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.02.009.
6. Rehm R.G., Hamins A., Baum H.R., McGrattan K.B., Evans D.D. (2002) Community-scale fire spread. *Proceedings of the California's 2001 Wildfire Conference*. pp. 126–139.
7. Morandini F., Silvani X. (2010) Experimental investigation of the physical mechanisms governing the spread of wildfires. *International Journal of Wildland Fire*. 19(5). pp. 570–582. DOI: 10.1071/WF08113.
8. Filkov A.I., Prohanov S.A., Mueller E., Kasymov D.P., Martynov P., Houssami M., Thomas J.C., Skowronski N., Butler B., Gallagher M.R., Clark K., Mell W., Kremens R., Hadden R.M., Simeoni A. (2017) Investigation of firebrand production during prescribed fires conducted in a pine forest. *Proceedings of the Combustion Institute*. 36(2). pp. 3263–3270. DOI: 10.1016/j.proci.2016.06.125.
9. Sullivan A.L. (2009) Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 1: Physical and quasi-physical models. *International Journal of Wildland Fire*. 18(4). pp. 349–368. DOI: 10.1071/WF06143.
10. Babrauskas V. (2005) Charring rate of wood as a tool for fire investigations. *Fire Safety Journal*. 40(6). pp. 528–554. DOI:10.1016/j.firesaf.2005.05.006.
11. Grishin A.M., Filkov A.I., Loboda E.L., Reyno V.V., Kozlov A.V., Kuznetsov V.T., Kasymov D.P., Andreyuk S.M., Ivanov A.I. (2014) A Field experiment on grass fire effects on wooden constructions and peat layer ignition. *International Journal of Wildland Fire*. 23(3). pp. 445–449. DOI: 10.1071/WF12069.
12. Hirle S., Balog K. (2017) The effect of the heat flux on the self-ignition of oriented strand board. *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology in Trnava*. 25(40). pp. 123–129. DOI:10.1515/rput-2017-0014.
13. Bartlett A.I., Hadden R.M., Bisby L.A. (2019) A review of factors affecting the burning behaviour of wood for application to tall timber construction. *Fire Technology*. 55(1). pp. 1–49. DOI: 10.1007/s10694-018-0787-y.
14. Hedayati F., Yang W., Zhou A. (2018) Effects of moisture content and heating condition on pyrolysis and combustion properties of structural fuels. *Fire and Materials*. 42(7). pp. 741–749. DOI: 10.1002/fam.2528.
15. 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.
16. Hasburgh L.E., Stone D.S., Zelinka S.L. (2017) Laboratory investigation of fire transfer from exterior wood decks to buildings in the Wildland–Urban interface. *Fire Technology*. 53(2). pp. 517–534. DOI:10.1007/s10694-016-0588-0.
17. Vermesi I., Di Domizio M.J., Richter F., Weckman E.J., Rein G. (2017) Pyrolysis and spontaneous ignition of wood under transient irradiation: Experiments and a-priori predictions. *Fire Safety Journal*. 91. pp. 218–225. DOI:10.1016/j.firesaf.2017.03.081.

18. Mel'nikov V.S., Khasanov I.R., Kirillov S.V., Vasil'ev V.G., Vanin S.A., Shcherbakov M.I., Garskov R.V. (2015) Termografirovanie pri ognevnykh ispytaniyakh fragmentov zdaniy i stroitel'nykh konstruksiy [Thermography of the buildings and their elements at fire tests]. *Pozharnaya bezopasnost'*. 3. pp. 83–90.
19. Mel'nikov V.S., Khasanov I.R., Kirillov S.V., Vasil'ev V.G., Vanin S.A., Potemkin S.A. (2016) Naturnye ognеvye ispytaniya fragmentov zdaniy iz sendvich-paneley [Full-scale fire tests of building elements made of sandwich panels]. *Pozharnaya bezopasnost'*. 2. pp. 120–127.
20. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. (2010) *Gorenie drevesiny i eye pozharoopasnye svoystva* [Combustion and fire-hazardous properties of wooden material]. Moscow: Akademiya GPS.
21. Vavilov V.P. (2009) *Infrakrasnaya termografiya i teplovoy kontrol'* [Infrared thermography and heat control]. Moscow: Spector.
22. O'Brien J.J., Loudermilk E.L., Hornsby B., Hudak A.T., Bright B.C., Dickinson M.B., Hiers J.K., Teske C., Ottmar R.D. (2016) High-resolution infrared thermography for capturing wildland fire behaviour: RxCADRE 2012. *International Journal of Wildland Fire*. 25. pp. 62–75. DOI:10.1071/WF14165.
23. Rios O., Pastor E., Valero M.M., Planas E. (2016) Short-term fire front spread prediction using inverse modelling and airborne infrared images. *International Journal of Wildland Fire*. 25. pp. 1033–1047. DOI: 10.1071/WF16031.
24. Sofan P., Bruce D., Jones E., Marsden J. (2018) Detecting peatland combustion using short-wave and thermal infrared landsat-8 data. *Advances in Forest Fire Research*. pp. 969–979. DOI: 10.14195/978-989-26-16-506_106.
25. Valero M.M., Jimenez D., Butler B., Mata C., Rios O., Pastor E., Planas E. (2018) On the use of compact thermal cameras for quantitative wildfire monitoring. *Advances in Forest Fire Research*. pp. 1077–1086. DOI: 10.14195/978-989-26-16-506_119.
26. Loboda E.L., Kasymov D.P., Filkov A.I., Reyno V.V., Agafontsev M.V. (2018) Nekotorye aspekty issledovaniya v polevykh i laboratornykh usloviyakh prirodnykh pozharov s primeneniem termografii [Some aspects of the research of wildfires using thermography in the field and laboratory conditions]. *Aktual'nye problemy pozharной bezopasnosti: tezisy dokladov: XXX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii – Current Problems of Fire Safety: Theses of Reports of XXX International Research and Practical Conference*. pp. 295–300.
27. Kasymov D.P., Agafontsev M.V., Perminov V.V. (2018) Estimation of the influence of wood-fire retardants on fire behavior of some types of wood construction materials. *Journal of Physics: Conference Series*. 1105. pp. 1–7. DOI: 10.1088/1742-6596/1105/1/012039.
28. Kasymov D.P., Agafontsev M.V., Perminov V.V., Matrynov P. (2019) Investigation of the ignition of wood structural materials (with and without fire retardant treatment) under the influence of a model fire of irregular intensity. *EPJ Web Conf*. 196. DOI: 10.1051/epjconf/201919600038.
29. Loboda E.L., Matvienko O.V., Agafontsev M.V., Reyno V.V. (2018) Primenenie termografii dlya otsenki masshtabov turbulentnosti v plameni [The use of thermography for assessment of the magnitude of flame turbulence]. *Optika atmosfery i okeana*. 31(12). pp. 1001–1006. DOI: 10.15372/AOO20181210.
30. Gossorg Zh. (1988) *Infrakrasnaya termografiya* [Infrared thermography]. Moscow: Mir.
31. Chernenko V.A. (2017) Technology of wood impregnation by polymeric compositions. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 7(58). pp. 32–52. DOI: 10.18720/CUBS.58.3.

Received: January 21, 2019