

УДК 536.37

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ К ВОСПЛАМЕНЕНИЮ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОТОКА ГОРЯЩИХ ЧАСТИЦ

Д. П. Касымов¹, М. В. Агафонцев¹, В. В. Перминов¹, Е. Л. Лобода¹,
Ю. А. Лобода¹, В. В. Рейно², К. Е. Орлов¹

¹Томский государственный университет, 634050 Томск, denkasymov@gmail.com

²Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, 634055 Томск, reyno@iao.ru

Экспериментально исследовано взаимодействие потока горящих и тлеющих частиц с некоторыми видами горючих строительных материалов и конструкций на основе древесины. Получены значения теплового потока, генерируемого тлеющими частицами, а также проанализированы поля температуры наиболее теплонапряженных участков исследуемых конструкций. Проведена оценка темпа нагрева образцов на основании данных, полученных с использованием метода ИК-термографии. При выбранных параметрах эксперимента устойчивым к зажиганию оказался образец, имитирующий террасу. Оценка температуры в приповерхностном слое элемента террасы показала, что за 15 мин непрерывного воздействия горящими и тлеющими частицами температура в зоне максимального скопления частиц не превысила 130 °С. Наиболее склонной к зажиганию оказалась модель деревянного ограждения (время задержки зажигания ниже более чем на 15 % по сравнению с остальными конструкциями).

Ключевые слова: древесина, ИК-диагностика, огнестойкость, тепловой поток, горящие и тлеющие частицы.

DOI 10.15372/FGV20230211

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы во всем мире увеличивается количество природных пожаров, которые распространяются на зоны застройки различными объектами инфраструктуры, в том числе и на жилые дома. Эти пожары наносят не только огромный экономический ущерб, но и представляют угрозу жизни и здоровью людей. В качестве примеров таких пожаров, приведших к катастрофическим последствиям и значительному материальному ущербу, можно назвать природные пожары в Сибири и на Дальнем Востоке России в 2012 г. и 2019 г., Хакасии и Забайкалье в 2015 г., Иркутской области и Якутии в 2020–2021 гг., Ханты-Мансийском автономном округе в 2022 г., пожары в Греции 2019 г., Португалии 2019 г., Австралии 2019–2020 гг., США (Калифорния) 2018–2020 гг.,

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-71-10068).

Доложено на II Международной научной конференции «Физика и химия горения и процессов в экстремальных условиях», 12–16 июля 2022, Самара.

© Касымов Д. П., Агафонцев М. В., Перминов В. В., Лобода Е. Л., Лобода Ю. А., Рейно В. В., Орлов К. Е., 2023.

Турции 2021 г. В мае 2022 г. за сутки в Омской области сгорело более 100 строений и домов — из-за штормового ветра лесной пожар перекинулся на жилой сектор. Увеличение числа природных пожаров, с одной стороны, связано с предпочтением людей жить на лесных территориях, где повышен риск появления пожаров, с другой — с отсутствием понимания механизма перехода пожара на урбанизированные территории. Кроме того, нуждается в доработке и свод правил, регламентирующий строительство и содержание строений на лесных территориях с точки зрения пожарной безопасности. Ожидается, что влияние таких пожаров резко возрастет [1], так как довольно быстро увеличивается количество жилых построек в лесной и лесостепной зонах [2]. Кроме того, глобальное изменение климата повышает вероятность и интенсивность лесных пожаров [3], что, в свою очередь, оказывает влияние на атмосферные и глобальные климатические процессы [4, 5].

В ряде случаев определяющую роль при зажигании лесных горючих материалов и распространении пожаров играют горящие и тлеющие частицы [6, 7]. Этот процесс включает в себя три важные стадии: генерация частиц,

перенос частиц и воспламенение горючих материалов частицами. Многие исследования в этой области были сосредоточены на процессе переноса частиц, в то время как генерации частиц и воспламенению ими горючих материалов внимания уделялось мало [8]. Кроме того, необходимо учитывать склонность тех или иных строительных материалов к воспламенению в условиях точечного источника воздействия, что позволит усовершенствовать существующие технологии противопожарной организации строительства.

Последние разработки устройств, позволяющих осуществлять генерацию частиц, — генераторов частиц и проведенные с использованием этих генераторов исследования значительно расширили знания в области оценки уязвимости конструкций в условиях пожара [9, 10]. В последнее время активно ведется систематическое изучение образования горящих частиц, включающее в себя как полномасштабные исследования возгорания строительных конструкций [11], так и моделирование взаимодействия частиц с конструкциями на основе древесины [12]. В частности, исследования направлены на оценку уязвимости вентиляционных отверстий [13], элементов кровли [14], сайдингов, карнизов [15] и конструктивных элементов зданий и сооружений [16] при различных внешних параметрах окружающей среды и интенсивности пожара.

На сегодняшний день при исследовании процессов горения и природных пожаров активно применяются современные методы инфракрасной (ИК) диагностики [17–21]. Выработаны некоторые рекомендации по применению термографии при испытании древесины и других строительных материалов на огнестойкость и пожарную опасность. Эта работа требует проведения дополнительных экспериментов. Применение ИК-диагностики позволяет оценить поле истинных температур в динамике при лабораторных и натурных огневых испытаниях элементов зданий и строительных сооружений из древесины [22–24]. Разработка на основе этих данных методики испытания строительных конструкций, выполненных из древесины, на огнестойкость и пожарную опасность с применением термографии позволит уменьшить экономическую составляющую при проведении такого рода работ и одновременно повысит оперативность получения данных, разрешающую способность и

информативность. Следует отметить, что задача не сводится лишь к практическим аспектам противопожарной защиты зданий и сооружений на основе древесины, но и является делом для улучшения физико-математической теории природных пожаров, понимания процессов образования, переноса горящих частиц и их потенциала в воспламенении горючих материалов и инициировании пятнистых пожаров.

Целью работы является физическое моделирование взаимодействия потока горящих и тлеющих частиц с некоторыми видами горючих строительных материалов и конструкций на основе древесины (на примере модели террасы, ограждения комбинированного типа, а также внутреннего угла) с последующей оценкой их теплофизических параметров (поле температуры, темп нагрева образца, тепловые потоки, а также время задержки зажигания).

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились в большой аэрозольной камере Института оптики атмосферы СО РАН, входящей в состав центра коллективного пользования «Атмосфера». Объем камеры составляет 2000 м³. Работа в этой камере позволяет избавиться от эффекта бокового и встречного ветра, неизбежно присутствующего при полевых работах и влияющего на характеристики летящих частиц.

На рис. 1 представлена экспериментальная площадка с размещенным на ней оборудованием.

Экспериментальное оборудование включало в себя: инфракрасную камеру научного класса JADE J530SB с узкополосным оптическим фильтром с рабочей длиной волны $2.5 \div 2.7$ мкм, позволяющим регистрировать температуру в диапазоне $300 \div 1500$ °С (выбор которого обусловлен большой интенсивностью излучения паров воды и углекислого газа в используемом спектральном диапазоне) и объективом с фокусным расстоянием 50 мм; видеокамеры Canon LEGRIA HF R86 («Canon Inc.», Китай) и Sony FDR X3000 («Sony Group Corporation», Китай) для оценки задержки зажигания образцов древесных строительных материалов и фиксации процесса генерации и переноса частиц; термопары типа К с диаметром спая 200 мкм для оценки поля температуры вблизи поверхности деревянных образцов; датчик теплового потока Hukseflux SBG01 с

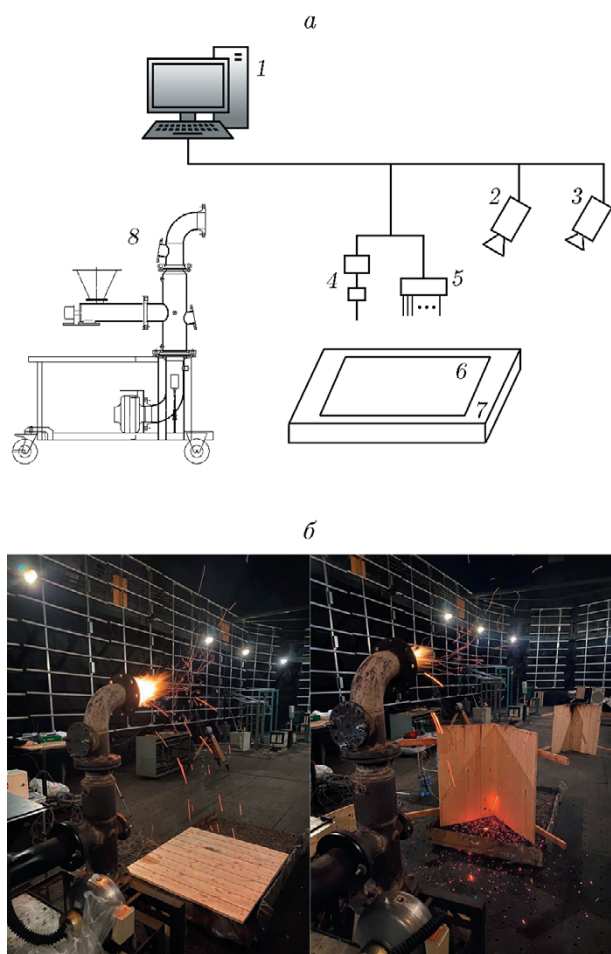


Рис. 1. Экспериментальная площадка: схема (а) и фотографии с места проведения эксперимента (б):

1 — персональный компьютер, 2 — инфракрасная камера JADE J530SB, 3 — видеокамера Sony FDR X3000, 4, 5 — система регистрации данных (модуль регистрации термодатных измерений, датчик теплового потока SBG01 с осциллографом АКИП-74824А), 6 — конструкция из древесины (в данном случае — модель террасы), 7 — подстилающая поверхность в виде короба с грунтом, 8 — генератор горящих и тлеющих частиц

рабочим диапазоном $0 \div 100 \text{ кВт/м}^2$; АКИП-74824А для регистрации термоЭДС; анализатор влажности AND MX-50 (AND, Япония) для контроля влагосодержания исследуемых образцов. Размер матрицы инфракрасной камеры 320×240 пкс, частота регистрации 7 кадр/с. Расстояние от выходной части генератора частиц до тепловизора 1.7 м. Физический размер области, в которой проводятся измерения инфракрасной камерой, 0.71×0.53 м.

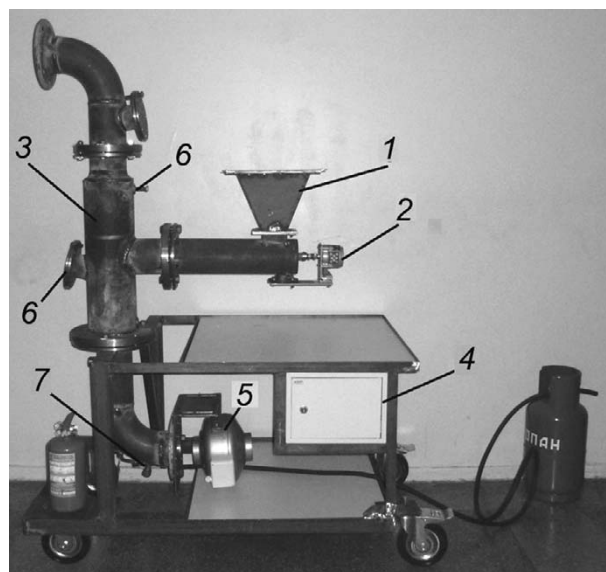


Рис. 2. Общий вид установки генерации горящих и тлеющих частиц:

1 — приемный бункер, 2 — шнековый механизм подачи частиц, 3 — рабочая зона горна, 4 — электрический силовой шкаф, 5 — каналный вентилятор TUBE 250XL, 6 — измерительные окна

Генератор горящих и тлеющих частиц снабжен шнековым механизмом, позволяющим проводить длительную и непрерывную подачу горючего материала, а также предусмотрено создание воздушной противодымовой завесы для более безопасной эксплуатации в закрытых помещениях [25]. Фотография установки представлена на рис. 2.

В результате работы установки осуществляются перенос частиц под воздействием воздушного потока, их зажигание и генерация в окружающую среду с возможностью регулировки скорости и объема подачи газа, скорости воздушного потока и объема частиц.

В качестве образцов выбраны строительные конструкции из сосны: элемент террасы, ограждение комбинированного типа, а также внутренний угол здания (рис. 3). Влагосодержание древесины перед экспериментами не превышало 10 %.

Для воссоздания условий потока горящих и тлеющих частиц, возникающих при лесных пожарах, использовались pellets (древесные топливные гранулы). Размеры частиц выбраны в соответствии с данными натурных экспериментов по имитации низового пожара в сосновом лесу [26, 27]. Диаметр древесных pellets 8 мм, длина $30 \div 50$ мм.

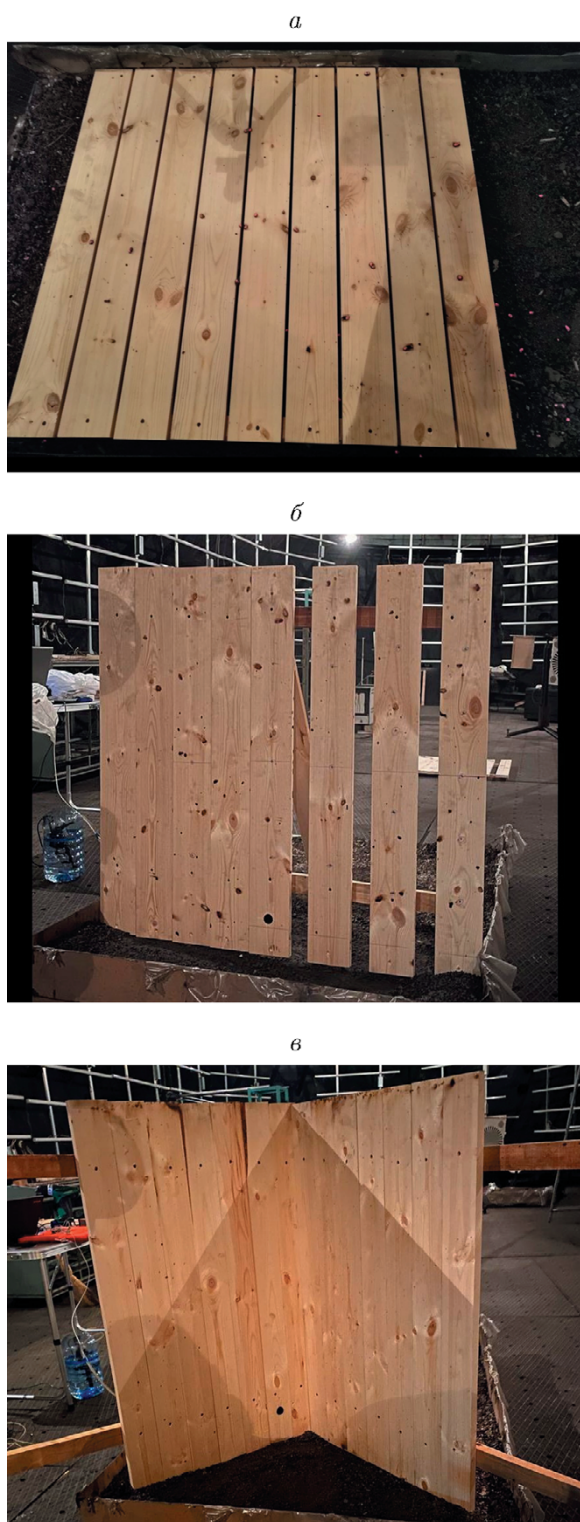


Рис. 3. Образцы древесины:
a — терраса, *б* — ограждение комбинированного типа, *в* — внутренний угол здания

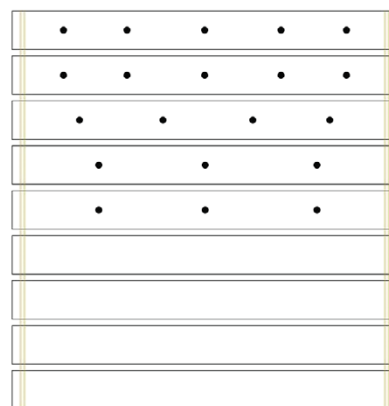


Рис. 4. Схема размещения термопар в образце террасы

В настоящем исследовании выбран режим работы генератора горящих и тлеющих частиц с периодическим добавлением пеллет в топочную область установки, что позволяет производить как непрерывную, так и прерывистую, с заданной частотой генерацию частиц.

Основным контрольным параметром являлась температура поверхности исследуемых конструкций из древесины, а также величина теплового потока.

Температура поверхности образца террасы контролировалась с помощью хромель-алюмелевых термопар с диаметром спая 500 мкм. Поверхность образца террасы покрывалась равномерной сетью термопар с шагом 10 см. Схема расположения датчиков представлена на рис. 4.

В образцах, имитирующих ограждение и внутренний угол деревянной конструкции, датчик теплового потока размещался посередине образца, на высоте 10 см от поверхности грунта и монтировался в конструкцию заподлицо.

Эксперимент проводился следующим образом. На подстилающей поверхности, представляющей собой короб с грунтом естественного происхождения, устанавливалась модельная конструкция из древесины. Рассматриваемые конструкции изготавливались из метровых досок шириной 0.14 м и толщиной 0.016 м и имели следующие размеры: терраса — 1×1 м, зазор между досками выбирался исходя из характерного диаметра частиц, который не превышал 8 мм; ограждение комбинированного типа — высота 1 м и ширина 1.1 м; угловая конструкция из двух одинаковых листов высотой 1 м и шириной 0.62 м, скрепленных под углом 90° . Далее в зоне установленного образца



Рис. 5. Модель ограждения комбинированного типа во время эксперимента

запускался процесс генерации и переноса частиц и их последующего осаждения (рис. 5). Для каждого типа строительной конструкции проводилось не менее трех опытов.

Моделировался вариант огневого воздействия, при котором пролетающие тлеющие и горящие частицы скапливаются на прилегающей территории, а также в элементах кровли. Такой сценарий возможен при возникновении массовых верховых пожаров вблизи жилых домов на урбанизированной территории.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИК-ТЕРМОГРАФИИ ОБРАЗЦОВ ПРИ ОГНЕВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

В ходе экспериментов получена серия ИК-изображений процесса генерации и взаимодействия частиц с деревянными конструкциями (рис. 6). Для дальнейшей обработки данных проводилась с помощью программы Altair.

В случае угловой конструкции и ограждения комбинированного типа падающие частицы аккумулировались вблизи конструкции (рис. 6) и продолжали взаимодействовать с поверхностью стенок. При длительном взаимодействии совокупной энергии частиц хватает, чтобы воспламенить данную конструкцию с последующим горением.

Исходя из полученных термограмм, температура частиц в момент падения находилась в пределах $490 \div 650$ °С. При этом в момент выброса частиц из генератора она составляла $750 \div 800$ °С [28].

Для анализа изменения температуры на поверхности исследуемых образцов проведена

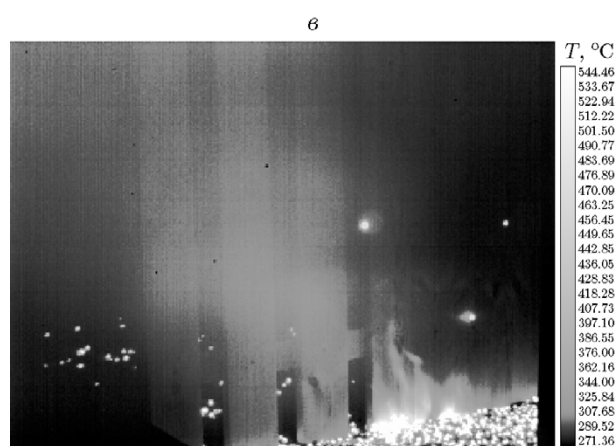
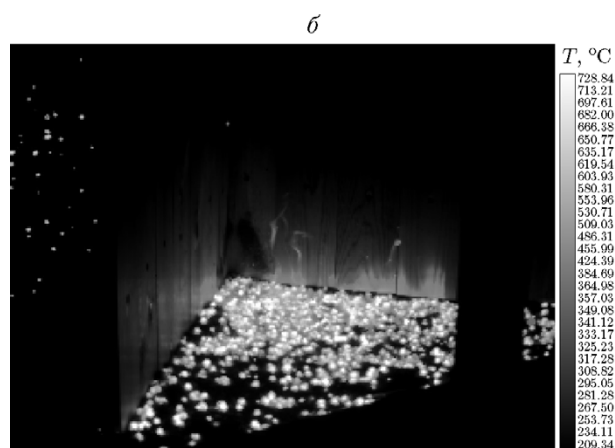
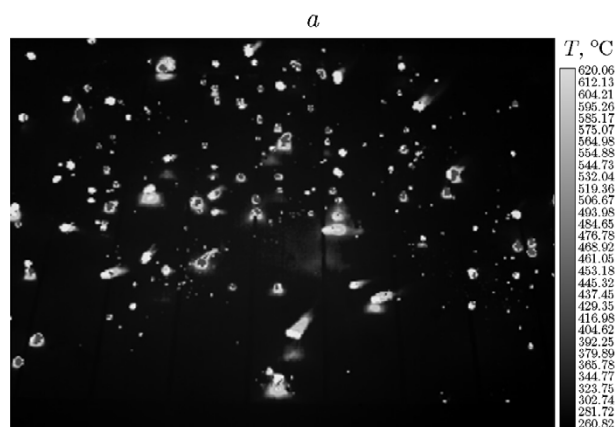


Рис. 6. Термограммы поверхности после воздействия потока горящих и тлеющих частиц: *а* — терраса, *б* — внутренний угол здания, *в* — ограждение комбинированного типа

следующая обработка. На рабочем поле программы Altair были выделены три прямоугольные области (рис. 7), соответствующие наиболее теплонапряженным участкам поверхности образца, по данным с которых получена зави-

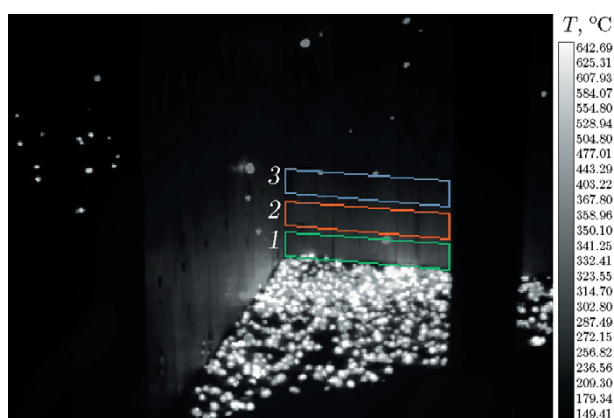


Рис. 7. Термограмма поверхности угловой конструкции с установленными измерительными областями

симось осредненной по области температуры от времени. Осреднением этих распределений температуры по трем областям получали ее изменения на поверхности исследуемого образца в наиболее подверженной нагреву зоне (рис. 8).

Анализируя графики на рис. 8, можно сделать вывод, что конструкционный элемент забора подвержен более интенсивному нагреву, нежели элемент внутреннего угла строения. Это можно объяснить тем, что около забора площадь участка, где сконцентрированы упавшие горячие и тлеющие частицы, больше, чем во внутреннем угле строения. При этом плотность осаждения внутреннего угла частицами из одной и той же области, безусловно, выше. В результате этого реализуется ситуация, при которой за счет большого числа упавших горячих и тлеющих частиц в ограниченной области ограничивается доступ окислителя к нижним слоям.

ИЗМЕРЕНИЕ КОНТАКТНЫМИ ДАТЧИКАМИ

Для оценки динамики нагрева поверхности деревянной террасы проведен анализ термодатных измерений. Терраса при проведении экспериментов заведомо располагалась таким образом, чтобы основная зона падающих частиц находилась в середине образца. Оценивалось изменение максимальной температуры в приповерхностном слое (рис. 9).

Сравнивая рис. 8 и 9, можно сделать вывод, что элемент террасы меньше всего подвержен нагреву от горячих и тлеющих частиц. Исходя из оценок времени, необходимого для начала пиролиза древесины [29], можно ска-

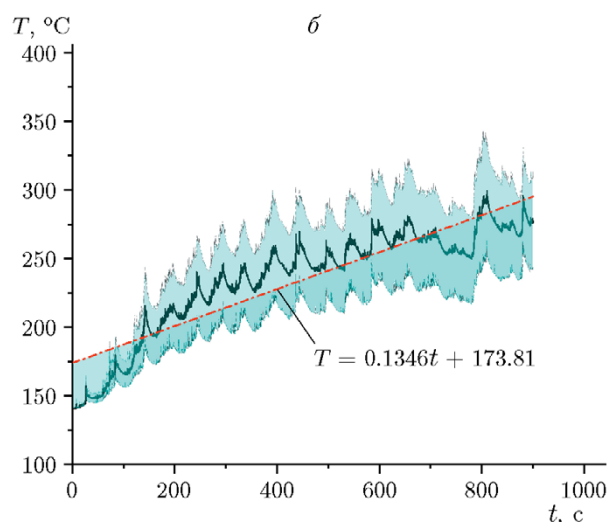
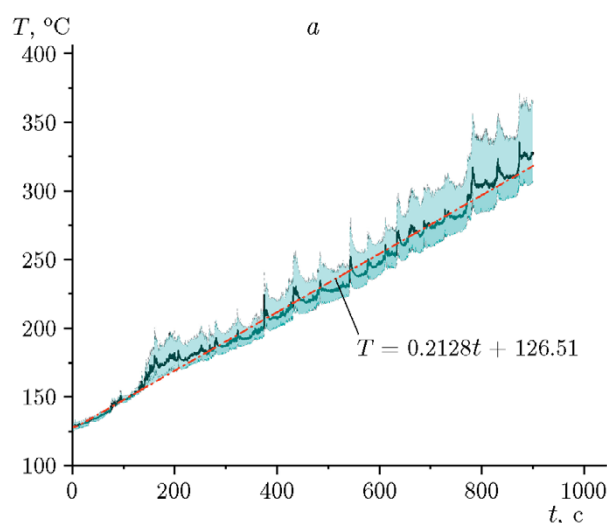


Рис. 8. Темп нагрева поверхности образцов забора (а) и внутреннего угла деревянного строения (б)

зать, что для воспламенения элемента террасы при используемом в работе режиме генерации частиц потребуется не менее 83 мин, для углового элемента — 37 мин, для элемента забора — 24 мин.

Для оценки энергетических характеристик потока горячих частиц проведено исследование теплового потока от единичной частицы. Нелинейный рост кривой темпа нагрева (см. рис. 9) вызван неравномерной генерацией частиц установкой.

Для регистрации теплового потока от единичной частицы использовался датчик теплового потока слоистого типа, его калибровка осуществлялась по эталонному излучателю

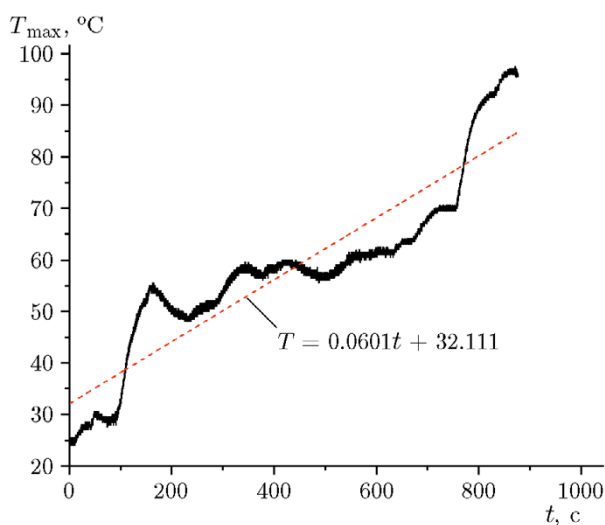


Рис. 9. Темп нагрева поверхности образца деревянной террасы

АЧТ 45/100/1100 (ОАО НПП «Эталон») с диапазоном изменения температуры $573 \div 1373$ К. Единичная частица помещалась в металлическую емкость, где газовой горелкой разогревалась до тлеющего режима горения. Затем частица перемещалась на приемную поверхность вертикально установленного датчика теплового потока, сигнал которого регистрировался аналого-цифровым преобразователем, построенным на базе микросхемы ADS1115 и микроконтроллера ATmega328. Для каждого исследуемого размера частицы проводилось 10 контрольных измерений. Осредненные значения теплового потока при тлении частиц находятся в диапазоне $0.097 \div 3.891$ кВт/м² (в зависимости от длины частиц).

На рис. 10 представлены результаты измерения теплового потока вблизи области, где аккумулируются горячие и тлеющие частицы. Максимальные значения теплового потока не превышали 10 кВт/м² для элемента ограждения комбинированного типа и 6 кВт/м² для элемента внутреннего угла строения. Горение частиц вызывало тление древесины, однако последующего ее горения не наблюдалось. Данные по тепловому потоку согласуются с работой [30], где в аналогичных условиях исследовали вероятность зажигания конструкции, имитирующей жилое строение, при воздействии потока горячих и тлеющих частиц.

Настоящее исследование проводилось в отсутствие набегающего воздушного потока, однако для детальной оценки вероятности вос-

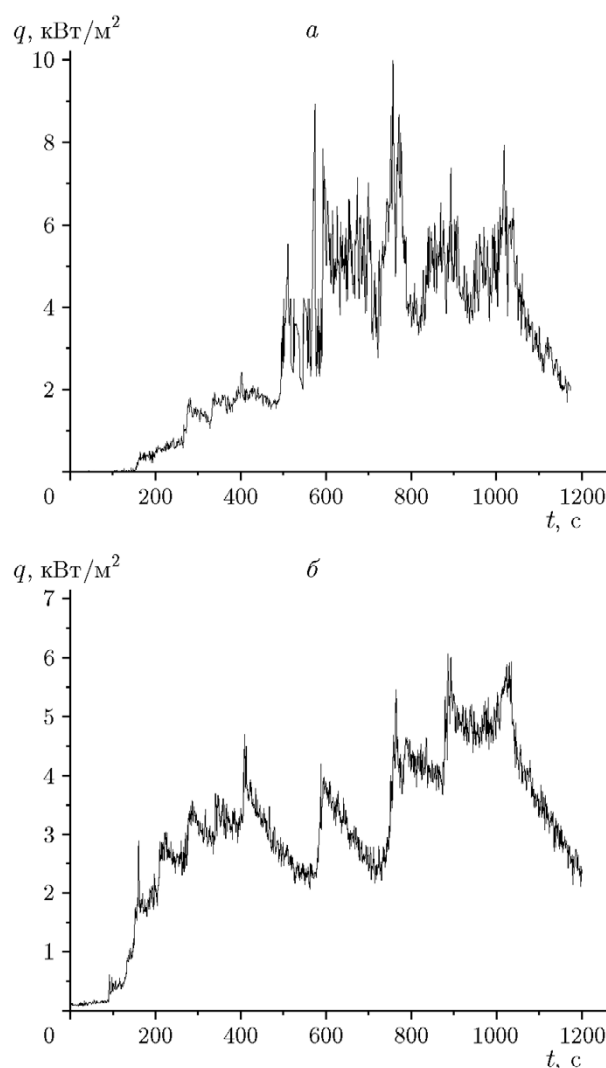


Рис. 10. Изменение теплового потока, приходящегося на поверхность образцов ограждения комбинированного типа (а) и внутреннего угла строения (б) вблизи зоны аккумуляции частиц

пламенения различных конструкций в условиях точечного теплового воздействия требуется учитывать наличие воздушного потока различной скорости, несомненно, влияющего на интенсификацию тления частиц. Лабораторные исследования показывают [31–33], что воздушный поток в зоне аккумуляции частиц может в несколько раз увеличить вероятность возникновения пламенного горения частиц с последующим переходом очага пожара на растительные горючие материалы и строительные конструкции.

Для элемента террасы оценка теплового потока не проводилась. Это связано с тем,

что тлеющие частицы, упав на контрольно-измерительное устройство, дадут заведомо завышенные значения теплового потока, за счет кондуктивной составляющей теплообмена.

ВЫВОДЫ

Проведен комплекс экспериментальных исследований воздействия модельного потока горящих и тлеющих частиц различной конфигурации на некоторые виды горючих строительных материалов и конструкций на основе древесины (модель террасы, ограждение сплошного и продуваемого типа, модель внутреннего угла помещения). Особенностью физического моделирования потока горящих и тлеющих частиц в настоящем исследовании была их непрерывная генерация в течение 15 мин.

По результатам анализа полученных термограмм температура частиц в момент падения находится в интервале $490 \div 650$ °С. При этом в момент вылета из сопловой части генератора температура горящих частиц составляет $750 \div 800$ °С. Использование бесконтактного метода ИК-диагностики позволило экспериментально определить распределение температуры на поверхности образцов в результате воздействия потока горящих и тлеющих частиц. Это позволило установить теплонапряженные участки на поверхности моделей деревянных конструкций при воздействии фронта низового лесного пожара, оценить с высокой точностью их характерные размеры.

Получены оценки теплового потока, генерируемого тлеющими частицами, а также оценка поля температуры наиболее теплонапряженных участков исследуемых конструкций.

Проведена оценка темпа нагрева образца по данным, полученным методом ИК-термографии. Темп нагрева элемента внутреннего угла строения, осредненный по трем испытаниям, составил 0.21 °С/с, а для элемента ограждения — 0.13 °С/с. Различие тепловых потоков и темпов нагрева для элементов ограждения и внутреннего угла строения связано с тем, что прогрев второй конструкции происходит интенсивнее за счет большей области покрытия горящими и тлеющими частицами перед исследуемым образцом.

При выбранных параметрах эксперимента устойчивым к зажиганию оказался образец, имитирующий террасу. Оценка температуры в приповерхностном слое элемента тер-

расы показала, что за 15 мин непрерывного воздействия горящими и тлеющими частицами температура в зоне максимального скопления частиц не превысила 130 °С. Следует заметить, что столь низкая температура в центральном пятне области падения тлеющих частиц недостаточна для устойчивого возгорания конструкции.

Наиболее склонной к зажиганию является модель деревянного ограждения, характерное время ее зажигания составило 760 с. Это на 8 % ниже по сравнению с остальными конструкциями. Геометрия элемента внутреннего сплошного угла в эксперименте играла роль преграды, от которой частицы рикошетили, тем самым вероятность их аккумуляции непосредственно вблизи конструкции снижалась.

Данное исследование расширяет существующую информацию об огнестойкости строительных конструкций на основе древесины (на примере модели террасы, ограждения комбинированного типа, а также внутреннего угла) в условиях такого поражающего фактора при крупномасштабных пожарах, как горящие и тлеющие частицы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Foote E. I., Manzello S. L., Liu J. Characterizing firebrand exposure during wildland-urban interface fires // *Proc. Fire Mater. Conf.* — 2011. — P. 479–491.
2. Hammer R. B., Radeloff V. C., Fried J. S., Stewart S. I. Wildland urban interface housing growth during the 1990s in California, Oregon, and Washington // *Int. J. Wildland Fire.* — 2007. — V. 16, N 3. — P. 255–265. — DOI: 10.1071/WF05077.
3. Flannigan M. D., Stocks B. J., Wotton B. M. Climate change and forest fires // *Sci. Total Environ.* — 2000. — V. 262, N 3. — P. 221–229. — DOI: 10.1016/S0048-9697(00)00524-6.
4. Loboda E., Kasymov D., Agafontsev M., Reyno V., Gordeev Y., Tarakanova V., Martynov P., Loboda Y., Orlov K., Savin K., et al. Effect of small-scale wildfires on the air parameters near the burning centers // *Atmosphere.* — 2021. — V. 12, N 1. — Article number 75. — DOI: 10.3390/atmos12010075.
5. Manzello S. L., Cleary T. G., Shields J. R., Maranghides A., Mell W., Yang J. C. Experimental investigation of firebrands: Generation and ignition of fuel beds // *Fire Saf. J.* — 2008. — V. 43, N 3. — P. 226–233. — DOI: 10.1016/j.firesaf.2006.06.010.

6. **Перминов В. А., Марзаева В. И.** Математическое моделирование распространения верховых лесных пожаров при наличии противопожарных разрывов и заслонов конечных размеров // *Физика горения и взрыва*. — 2020. — Т. 56, № 3. — С. 94–105. — DOI: 10.15372/FGV20200310.
7. **Гришин А. М., Грузин А. Д., Зверев В. Г.** Тепломассоперенос и распространение горящих частиц в приземном слое атмосферы при верховых лесных пожарах // *Физика горения и взрыва*. — 1981. — Т. 17, № 4. — С. 78–84.
8. **Fernandez-Pello A. C.** Wildland fire spot ignition by sparks and firebrands // *Fire Saf. J.* — 2017. — V. 91. — P. 2–10. — DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.04.040.
9. **Manzello S. L.** Summary of workshop on global overview of large outdoor fire standards // *NIST Special Publ.* — 2019. — V. 1235. — DOI: 10.6028/NIST.SP.1235.
10. **Nazare S., Leventon I., Davis R.** Ignitibility of structural wood products exposed to embers during wildland fires: a review of literature // *Tech. Note 2153 / National Institute of Standards and Technology*. — 2001. — DOI: 10.6028/NIST.TN.2153.
11. **Suzuki S., Manzello S. L.** Ignition vulnerabilities of combustibles around houses to firebrand showers: Further comparison of experiments // *Sustainability*. — 2021. — V. 13, N 4. — 2136. — DOI: 10.3390/su13042136.
12. **Matvienko O. V., Kasymov D. P., Loboda E. L., Lutsenko A. V., Daneyko O. I.** Modeling of wood surface ignition by wildland firebrands // *Fire*. — 2022. — V. 5, N 2. — Article number 38. — DOI: 10.3390/fire5020038.
13. **Manzello S. L., Park S. H., Shields J. R., Hayashi Y., Suzuki S.** Comparison testing protocol for firebrand penetration through building vents: summary of BRI/NIST Full Scale and NIST reduced scale results // *NIST TN*. — 2010. — Rep. 1659.
14. **Manzello S. L., Hayashi Y., Yoneki T., Yamamoto Y.** Quantifying the vulnerabilities of ceramic tile roofing assemblies to ignition during a firebrand attack // *Fire Saf. J.* — 2010. — V. 45, N 1. — P. 35–43. — DOI: 10.1016/j.firesaf.2009.09.002.
15. **Manzello S. L., Suzuki S., Hayashi Y.** Exposing siding treatments, walls fitted with eaves, and glazing assemblies to firebrand showers // *Fire Saf. J.* — 2012. — V. 50. — P. 25–34. — DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.01.006.
16. **Manzello S. L., Suzuki S.** Exposing decking assemblies to continuous wind-driven firebrand showers // *Proc. of the 11th Int. Symp. on Fire Safety Science*. — 2014. — http://www.nist.gov/customcf/get-pdf.cfm?pub_id=913383.
17. **Suzuki S., Brown A., Manzello S. L., Suzuki J., Hayashi Y.** Firebrands generated from a full-scale structure burning under well-controlled laboratory conditions // *Fire Saf. J.* — 2014. — V. 63. — P. 43–51. — DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.11.008.
18. **Вавилов В. П.** Инфракрасная термография и тепловой контроль. — М.: Спектр, 2009.
19. **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, N 1. — P. 62–75. — DOI: 10.1071/WF14165.
20. **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, N 10. — P. 1033–1047. — DOI: 10.1071/WF16031.
21. **Sofan P., Bruce D., Jones E., Marsden J.** Detecting peatland combustion using shortwave and thermal infrared landsat-8 data // *Adv. Forest Fire Res.* — 2018. — P. 969–979. — DOI: 10.14195/978-989-26-16-506.106.
22. **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 // *Adv. Forest Fire Res.* — 2018. — P. 1077–1086. — DOI: 10.14195/978-989-26-16-506.119.
23. **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., Stolyarchuk N. D.** A field experiment on grass fire effects on wooden constructions and peat layer ignition // *Int. J. Wildland Fire*. — 2014. — V. 23, N 3. — P. 445–449. — DOI: 10.1071/WF12069.
24. **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 Saf. J.* — 2017. — V. 91. — P. 218–225. — DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.03.081.
25. **Пат. РФ RU 199698 U1.** Генератор горящих и тлеющих частиц для плоховентилируемых помещений / Касымов Д. П., Перминов В. В., Фильков А. И., Агафонцев М. В., Рейно В. В., Лобода Е. Л. — Заявл. 22.06.2020. — Опубл. 15.09.2020.
26. **Filkov A., Prohanov S., Mueller E., Kasymov D., Martynov P., El Houssami M., Thomas J., Skowronski N., Butler B., Gallagher M., Clark K., Mell W., Kremens R., Hadden R. M., Simeoni A.** Investigation of firebrand production during prescribed fires conducted in a pine forest // *Proc. Combust. Inst.* — 2017. — V. 36, N 2. — P. 3263–3270. — DOI: 10.1016/j.proci.2016.06.125.

27. El Houssami M., Mueller E., Filkov A., Thomas J. C., Skowronski N., Gallagher M. R., Clark K., Kremens R., Simeoni A. Experimental procedures characterising firebrand generation in wildland fires // Fire Technol. — 2016. — V. 52, N 3. — P. 731–751. — DOI: 10.1007/s10694-015-0492-z.
28. Prohanov S., Filkov A., Kasymov D., Agafontsev M., Reyno V. Determination of firebrand characteristics using thermal videos // Fire. — 2020. — V 3, N 4. — Article number 68. — DOI: 10.3390/fire3040068.
29. Kasymov D., Agafontsev M., Perminov V., Martynov P., Reyno V., Loboda E. Experimental investigation of the effect of heat flux on the fire behavior of engineered wood samples // Fire. — 2020. — V. 3, N 4. — Article number 61. — DOI: 10.3390/fire3040061.
30. Quarles S. L., Standohar-Alfano C. D. Ignition potential of decks subjected to an ember exposure // Tech. Rep. / Insurance Institute for Business and Home Safety. — <https://ibhs.org/wildfire/ignition-potential-of-decks-subjected-to-an-ember-exposure/>.
31. Kasymov D. P., Tarakanova V. A., Martynov P. S., Agafontsev M. V. Studying firebrands interaction with flat surface of various wood construction materials in laboratory conditions // J. Phys.: Conf. Ser. — 2019. — V. 1359. — 012092. — DOI: 10.1088/1742-6596/1359/1/012092.
32. Kasymov D. P., Agafontsev M. V., Tarakanova V. A., Loboda E. L., Martynov P. S., Orlov K. E., Reyno V. V. Effect of wood structure geometry during firebrand generation in laboratory scale and semi-field experiments // J. Phys.: Conf. Ser. — 2021. — V. 1867. — 012020. — DOI:10.1088/1742-6596/1867/1/012020.
33. Tarakanova V. A., Kasymov D. P., Galtseva O. V., Chicherina N. V. Experimental characterization of firebrand ignition of some wood building materials // Bull. Karaganda Univ. Phys. Ser. — 2020. — N 4 (100). — P. 14–21. — DOI: 10.31489/2020Ph4/14-21.

Поступила в редакцию 17.10.2022.

Принята к публикации 14.12.2022.
