

Беспламенное горение древесины: обугливание и характеристики тепловыделения

Евгений Юрьевич Круглов✉, Роза Михайловна Асеева

Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В работе приводятся результаты исследования двух стадий термоокислительного разложения древесины. Первая стадия термоокислительного разложения относится к пламенному горению, после которой вследствие образования угольного слоя на поверхности древесины пламенное горение переходит к беспламенному. беспламенный процесс сопровождается не только гетерогенным горением, по меньшей мере происходят три реакции: пиролиз, термоокислительная деструкция древесины и окисление образующегося кокса.

Цель и задачи. Определить показатели обугливания и тепловыделения при воздействии внешнего радиационного теплового потока на образцы хвойной и лиственной породы с применением стандартного кон-калориметра с акцентом на беспламенное горение.

Методы. Характеристики тепловыделения определяли с помощью стандартного проточного калориметра OSU фирмы Atlas (США) при воздействии внешнего радиационного теплового потока 20, 35 и 52 кВт/м². Низшую теплоту полного сгорания у образцов обугленного слоя определяли с помощью бомбового калориметра С-5000.

Результаты. Проведен анализ обугливания и характеристик тепловыделения образцов древесины разных пород толщиной 10 и 25 мм при горении под действием внешнего радиационного теплового потока плотностью 20, 35 и 52 кВт/м² по результатам испытаний, проведенных на калориметре OSU. Дана оценка скорости обугливания и толщины кокса при пламенном и беспламенном горении, эффективной теплоты сгорания и коэффициента полноты сгорания, а также усадки образца. Показано, что переход от пламенного к гетерогенному горению происходит по окончании квазистационарного горения образцов древесины, что соответствует окончанию кривых скорости тепловыделения и означает переход от поведения термически толстого материала к термически тонкому.

Вывод. Полученные экспериментальные данные позволяют прогнозировать изменение физических и тепло-технических свойств, характеристик тепловыделения при пламенном и беспламенном горении древесины разных пород с учетом образованного угольного слоя на ее поверхности в условиях воздействия разных тепловых потоков.

Ключевые слова: проточный калориметр; деревянное домостроение; гетерогенное горение древесины; прогнозирование; обугливание древесины

Для цитирования: Круглов Е.Ю., Асеева Р.М. беспламенное горение древесины: обугливание и характеристики тепловыделения // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 5. С. 30–41. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.30-41

✉ Евгений Юрьевич Круглов, e-mail: 89268196698@mail.ru

Flameless combustion of wood: charring and heat release characteristics

Evgeniy Yu. Kruglov✉, Roza M. Aseeva

The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article presents the results of a research on the two stages of thermal decomposition of timber. The first stage of thermal decomposition is flame combustion, which is followed by a transition to flameless combustion due to the formation of a char layer on the surface of wood. The flameless process is accompanied not only by heterogeneous combustion, but, at least, three reactions: pyrolysis, thermal oxidative destruction of wood and oxidation of resulting coke.

Goals and objectives. The goal is to identify the criteria of charring and heat release under the influence of an external radiative heat flux on samples of coniferous and deciduous species of wood using a standard flow-through calorimeter with a focus on flameless combustion.

Methods. A standard OSU flow-through calorimeter, produced by Atlas (USA), was used to identify heat release characteristics under the influence of external radiative heat fluxes that had the density of 20, 35 and 52 kW/m². The lower limit of heat, released in the complete combustion of samples, that had a char layer, was identified using bomb calorimeter C-5000.

Results. The co-authors analyzed the charring process and characteristics of heat release using samples of wood species that were 10 and 25 cm thick. Wood samples were exposed to combustion under the influence of an external radiative heat flux that had the density of 20, 35 and 52 kW/m² subsequent to the results of tests, conducted using the OSU calorimeter. The co-authors evaluated the charring velocity and the coke layer thickness for the cases of flame and flameless combustion; efficient combustion heat release and the combustion completeness coefficient, as well as the sample shrinkage. The co-authors demonstrated that a transition from flame combustion to heterogeneous combustion occurs upon completion of the quasi-neutral burning of wood samples, which corresponds to the final point of heat release velocity curves and marks a transition from the behaviour of a thermally thick material to that of a thermally thin material.

Conclusion. The obtained experimental data allow to forecast a change in the physical and heat engineering properties, characteristics of heat release in the processes of flame and flameless combustion of different wood species with account taken of the char layer formed on its surface under the influence of various heat fluxes.

Keywords: flow-through calorimeter; wooden house construction; heterogeneous wood combustion; forecasting; wood charring

For citation: Kruglov E.Yu., Aseeva R.M. Flameless combustion of wood: charring and heat release characteristics. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(5):30-41. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.30-41 (rus).

✉ Evgeniy Yuryevich Kruglov, e-mail: 89268196698@mail.ru

Введение

В таких странах, как США, Канада, Австрия, Финляндия, Норвегия, древесина является одним из наиболее применяемых строительных материалов для несущих и ограждающих строительных конструкций при строительстве деревянных небоскребов различного функционального назначения. Об этом свидетельствуют примеры уже построенных объектов: в настоящее время самый высокий деревянный небоскреб построен в 2019 г. в Норвегии, г. Брумундаль, который называется Mjøstårnet¹; в 2017 г. в Канаде, г. Ванкувер построено студенческое общежитие Brock Commons²; в Вене (Австрия) построен объект NoHo Wien³ (рис. 1).

В России деревянное домостроение развивается в основном в жилом секторе, его доля составляет 24 %⁴. Согласно, статистическим данным [1], в зданиях жилого сектора ежегодно в среднем погибает 91,5 % людей от общего количества погибших при пожаре по стране за период с 2015 по 2018 годы. На данный вид объектов в среднем приходится 69,7 % (2015–2018 годы) пожаров от общего количества. Нужно отметить, что в 2018 г. динамика

имела возрастающий характер — данный показатель вырос на 0,8 % по сравнению с показателями 2017 г. Причины, которые могут оказывать влияние на показатели статистики по количеству пожаров и гибели людей, рассмотрены в работе [2]. Одной из наиболее важных проблем авторы считают отсутствие рекомендаций по применению эффективных решений, снижающих вероятность возникновения беспламенного или пламенного горения на объектах с деревянными конструкциями и материалами.

В работах [3, 4] подробно рассмотрены способы повышения огнестойкости ограждающих легких деревянных каркасных конструкций с разной комбинацией защитных облицовок. За счет применения полимерной теплоизоляции PENOCOM значения пределов огнестойкости строительных конструкций возрастают до 95...110 мин (по предельным состояниям по огнестойкости EI) для стен и перегородок без учета нагрузки.

Современные тенденции применения древесины в строительстве требуют переосмысления и более глубокого изучения закономерностей горения как самой древесины, так и материалов на ее основе, в особенности при беспламенном горении, которое при определенных условиях может переходить в пламенное. В работе [5] показана эффективность применения огнезащитного состава, направленного для снижения пожарной опасности теплоизоляции на основе вторичного целлюлозного сырья за счет перевода режима горения от пламенного в беспламенный. В [6–10] изучен прогрев материалов, используемых в автотранспортной отрасли промышленности, и древесины сосны при тлеющем горении в лабораторных условиях в разных режимах, где также рассмотрен вопрос образования формирующихся опасных факторов пожара.

¹ Агеев А. В Норвегии построен самый высокий деревянный небоскреб в мире. URL: <https://www.techcult.ru/technology/6545-samyj-vysokij-derevyannyj-neboskreb-v-mire>

² Байназаров Н. В Канаде построили самое высокое деревянное здание в мире. URL: <https://rb.ru/news/the-tallest-wooden-building/>

³ Конова Е. В Вене построили деревянный небоскреб NoHo Wien. Как он выглядит. URL: <https://realty.rbc.ru/news/5d7a409c9a794733db5c81f1>

⁴ Минпромторг России. Направления развития лесопромышленного комплекса России. URL: http://www.papfor.com/RXRU/RXRU_PapFor_v2/documents/2016/forum_materials/2.2_Minpromtorg_Golub.pdf?v=636147364053214896



Рис. 1. Примеры современных деревянных зданий: общежитие в г. Ванкувер, Канада (а), многофункциональные здания Mjøstårnet, г. Брумунддаль, Норвегия (b) и HoHo Wien, г. Вена, Австрия (с)

Fig. 1. Examples of modern wooden buildings: a hostel in Vancouver, Canada (a), multifunctional buildings Mjøstårnet, Brumunddal, Norway (b), HoHo Wien, Vienna, Austria (c)

Древесина по своим физико-химическим характеристикам является природным полимерным композитом и типичным представителем органических материалов, карбонизирующихся (обугливающих) при нагревании и горении. Выяснению факторов, которые влияют на обугливание древесины, его скорость, а также толщину и свойства обугленного слоя, посвящено огромное число работ. Многолетние испытания по обугливанию древесины проводились, в основном, по двум направлениям:

1) определение зависимости обугливания от условий внешнего огневого воздействия (плотности радиационного теплового потока и времени, метода испытания), а также от самого материала (породы и разновидности, его влажности, плотности и прочих свойств);

2) обугливание древесины при инициировании пожара горючей жидкостью.

Первое направление тесно связано с проблемой огнестойкости строительных конструкций и объектов в целом. Знание скорости обугливания древесины дает возможность определять остаточную эффективную площадь сечения конструкций и, соответственно, их несущую способность, что важно при проектировании строительства разных сооружений с заданным уровнем пожарной безопасности. Второе направление связано с экспертизой состоявшихся пожаров, установлением причин (возможности поджога) и места возникновения очага пожара, его интенсивности, продолжительности.

В обзоре [11] представлен анализ параметров обугливания древесины, полученных при контролируемых условиях огневого воздействия с применением стандартных мало-, средне- и крупномасштабных установок, а также натурных испытаний пожаров в комнатах и деревянных зданиях. При развитии пожара в комнатах средние тепловые потоки на потолок составляют 91 кВт/м^2 , на стены и пол соответственно приходится 138 кВт/м^2 и 84 кВт/м^2 . Отмечено важное влияние на скорость обугливания

деревянных конструкций эффекта вентиляции, доступа кислорода воздуха к зоне реакции горения, а также наличия промежутков между досками и различных типов их соединений. Корреляционные формулы для расчета скорости и глубины обугливания древесины в условиях стандартного режима пожара и при действии внешнего радиационного теплового потока постоянной плотности по результатам испытаний приведены в работах [11–16]. Проблема пожарной экспертизы отражена в [15–18]. В работе [19] установлено, что существенный вклад в беспламенное, тлеющее горение древесины вносит реакция гетерогенного окисления карбонизированных продуктов. Она является диффузионно-контролируемой и характеризуется высокими значениями энергии активации — до 285 кДж/моль .

От скорости обугливания, а также толщины обугленного слоя древесины зависят массовая скорость выделения горючих продуктов и, соответственно, характеристики тепловыделения. В справочнике [20] приведены результаты изучения характеристик тепловыделения древесины лиственных и хвойных пород в зависимости от плотности внешнего радиационного потока, объемной плотности древесины, ориентации, толщины образцов и других факторов. В [21] определены средние значения скорости тепловыделения, скорости потери массы и обугливания, некоторые свойства обугленного слоя (объемная плотность, фактор усадки) при тепловом потоке $15 \dots 55 \text{ кВт/м}^2$. При реальном пожаре прогорание деревянных конструкций может происходить в течение нескольких минут, при этом скорость обугливания может достигать больших значений ($2,5 \dots 3,5 \text{ мм/мин}$ и выше [11]). Приведенные данные отражают режим пламенного горения. Обугливание и характеристикам тепловыделения, другим показателям при беспламенном горении древесины уделено недостаточное внимание.

Впервые тлеющее горение цельной древесины (дуба и сосны) исследовал Т. Ohlemiller при иници-

ировании процесса раскаленной проволокой, разной скорости потока воздуха и его направления относительно движения волны тления [22]. Была определена скорость тления, в том числе на пределе перехода в пламенное горение [22–24]. Влияние внешнего радиационного теплового потока и концентрации кислорода на скорость газификации древесины сосны, выделение CO и CO₂ в беспламенном режиме изучено в [25]. Показано, что кислород увеличивает скорость потери массы по сравнению с инертной средой, почти в два раза ускоряет образование кокса и увеличивает его толщину. При тепловом потоке выше 40 кВт/м² наблюдалось спонтанное воспламенение древесины.

В настоящей работе была поставлена задача определить показатели обугливания и тепловыделения при воздействии внешнего радиационного теплового потока на образцы хвойной и лиственной породы с применением стандартного кон-калориметра с акцентом на беспламенное горение.

Материалы и методы исследования

В качестве образцов хвойных пород была взята древесина сосны и ели, а в качестве лиственных — березы и дуба, произрастающих в средней полосе страны. Кроме того, использовали древесину сосны из Краснодарского края и березы каменной из региона Петропавловска-Камчатского. Образцы размером 150 × 150 × 10 мм предварительно высушивали до постоянного веса и затем хранили в герметичной упаковке до последующих испытаний. Характеристики тепловыделения определяли с помощью стандартного проточного калориметра OSU марки HRR-3 фирмы Atlas (США) при действии внешнего радиационного теплового потока 20, 35 и 52 кВт/м². Описание установки и процедуры определения конкретных характеристик тепловыделения, полученные результаты приведены ранее в [26, 27]. На отдельных этапах процесса тепловыделения при горении березы каменной и сосны из Краснодарского края определяли толщину кокса и потери массы образца. У отобранных обугленных слоев определяли низшую теплоту полного сгорания с помощью бомбового калориметра С-5000. Более детальное изучение обугливания и характеристик тепловыделения при пламенном и беспламенном горении проведено с помощью проточного калориметра на примере образца древесины сосны толщиной 25 мм при $q_e = 20$ кВт/м². В этом случае синхронно измеряли температуру в реперных точках образца, потери массы на отдельных этапах процесса горения. Для фиксации стадии пламенного горения и перехода к беспламенному этапу использовали видеосъемку.

Результаты и их обсуждение

Важной характеристикой древесины является объемная (кажущаяся) плотность, которая отражает химический состав и структуру природного композита и определяет многие его свойства, в том числе и физико-механические [28]. Зарубежные работы и собственные наблюдения показывают, что обугливание древесины при горении носит нелинейный характер по времени и интенсивности нагрева.

При применении образцов древесины большой толщины, проявляющих при воздействии внешнего теплового потока поведение термически толстых материалов, кривые скорости тепловыделения характеризуются наличием одного пика. Он наблюдается вслед за воспламенением образца. После достижения максимального значения скорость тепловыделения снижается из-за нарастания толщины обугленного слоя древесины. Затем до конца испытания процесс выделения тепла протекает в квазистационарном режиме [21]. В случае образцов древесины с меньшей толщиной (10...20 мм) наблюдаются два пика на кривых скорости тепловыделения. На рис. 2 показаны типичные кривые, полученные для образцов сосны и дуба в зависимости от времени при плотности теплового потока 35 кВт/м². Первый пик отражает этап пламенного горения, второй относят обычно к гетерогенной реакции окисления образующегося кокса. Между пиками наблюдается площадка, протяженность которой уменьшается с ростом плотности внешнего теплового потока [26, 27]. Наличие второго пика позволяет оценить некоторые параметры беспламенного этапа горения древесины.

Представляло интерес выяснить, когда начинается этап беспламенного горения древесины: сразу после окончания первого пика на кривой скорости тепловыделения или в начале второго пика.

Результаты видеосъемки картины процесса горения древесины сосны в кон-калориметре при 20 кВт/м² однозначно свидетельствуют, что гетерогенный, беспламенный этап горения начинается после окончания площадки квазистационарного режима процесса тепловыделения. При пламенном горении пламя охватывает всю поверхность образца, препятствуя доступу кислорода воздуха к поверхности образца. В результате разложение материала и выделение летучих продуктов происходит в режиме пиролиза.

Расчет средней скорости обугливания при пламенном горении древесины β проведен по формуле [11]:

$$\beta = 113q_e^{1/2}/rt^{1/3}, \quad (1)$$

где q_e — плотность внешнего радиационного теплового потока, кВт/м²;

ρ — объемная плотность древесины, кг/м³;

τ — время пламенного горения, мин.

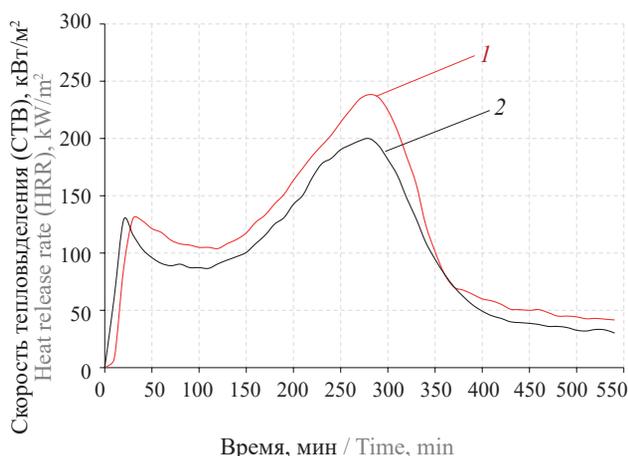


Рис. 2. Изменение скорости тепловыделения при горении древесины сосны (1) и дуба (2) при воздействии внешнего теплового потока, равного 35 кВт/м²

Fig. 2. A change in the rate of heat release during the combustion of pine (1) and oak (2) wood under the influence of an external heat flux of 35 kW/m²

Таблица 1. Влияние плотности теплового потока на среднюю скорость обугливания и толщину слоя кокса при пламенном горении древесины

Table 1. The influence of the heat flux density on the average charring rate and the thickness of the coke layer during the flame combustion of wood

Образец Sample	Плотность ρ , кг/м ³ Density ρ , kg/m ³	Радиационный тепловой поток q_e , кВт/м ² Radiation heat flux q_e , kW/m ²	Время пламен- ного горения $\tau_{пл}$, мин Flame combus- tion time τ_{fl} , min	Скорость обуглива- ния β , мм/мин Charring rate β , mm/min	Толщина обуг- ленного слоя δ , мм Char layer thickness δ , mm
Сосна Pine	448	20	2,68	0,716	1,92
		35	1,75	1,141	2,0
		52	1,50	1,521	2,28
Сосна (Краснодарский край) Pine (Krasnodar region)	400	35	1,50/0,5*	1,277/1,97*	1,91/0,98*
Сосна ($\delta = 25$ мм) Pine ($\delta = 25$ mm)	422	20	10,45/0,97*	0,55/1,07*	5,75/1,04*
Ель Spruce	400	20	1,83	0,914	1,67
		35	1,72	1,305	2,25
		52	1,50	1,708	2,56
Береза Birch	567	20	1,83	0,644	1,18
		35	1,49	0,966	1,44
		52	1,08	1,34	1,46
Береза каменная Stone birch	833	35	3,0/1,0*	0,521/0,78*	1,56/0,78*
Дуб Oak	638	20	3,04	0,480	1,46
		35	1,99	0,767	1,53
		52	1,50	1,067	1,60

* Показатели, соответствующие пиковым значениям скорости тепловыделения.

* Indicators corresponding to the peak values of the rate of heat release.

Для расчета использованы характеристики тепловыделения, полученные ранее при номинальных значениях плотности внешнего теплового потока 20...52 кВт/м² [26, 27]. Полагают, что после достижения температуры поверхности T_s , соответствующей началу пиролиза и воспламенению древесины, происходит быстрое увеличение массового потока летучих продуктов до максимального значения с образованием тонкого слоя кокса. Далее массовый поток летучих продуктов снижается из-за нарастания толщины кокса. В период активного выделения летучих продуктов пиролиза становятся важными тепловые потери конвекцией и излучением от поверхности [29]. В таблице показаны результаты расчета показателей обугливания с поправкой на теплопотери:

$$q_{net} = q_e - h_{кон}(T_s - T_o) - \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_o^4),$$

где $h_{кон}$ — конвективный коэффициент теплопередачи, принят равным 15 кВт/м²;

$\varepsilon = 0,9$ — коэффициент излучения [30];

σ — константа Стефана – Больцмана ($5,67 \times 10^{-8}$ Вт/м² К⁴);

T_s согласно измерению температуры равна 278 °С.

Легко заметить, что с увеличением плотности внешнего теплового потока растут средняя скорость обугливания и толщина слоя кокса. У лиственных пород древесины за период пламенного горения закономерно наблюдаются более низкие значения скорости обугливания и толщины слоя кокса по сравнению с хвойной древесиной. При пиковой скорости тепловыделения на этапе пламенного горения древесины действительно образуется тонкий слой кокса. Чтобы понять, насколько обосновано применение формулы (1) для оценки скорости обугливания и толщины слоя кокса, сравним результаты расчета с экспериментальными значениями толщины слоя кокса у образцов древесины при $q_e = 35$ кВт/м² за такой же период пламенного горения горизонтально расположенных образцов в соответствии с ГОСТ 30402–96⁵ (аналогичный метод описан в ГОСТ Р ИСО 5660-1–2020⁶). В частности, толщина обугленного слоя у образцов древесины ели при испытании на стандартном калориметре OSU составила 2,25 мм, а по ГОСТ 30402–96 — 2,93 мм; сосны — 2,0 и 2,4 мм; дуба — 1,53 и 1,6 мм соответственно. Полученные значения сопоставимы и закономерно выше при горизонтальной ориентации образцов. Известно, что в этом случае максимальная скорость тепловыделения и скорость потери массы выше из-за большего вклада теплового потока в воздействие пламени на поверхность горящего образца [20]. Таким образом, можно сделать вывод, что формула (1) пригодна для оценки скорости обугливания древесины при пламенном горении, но можно ли применять ее при беспламенном горении, этот вопрос остается открытым. Объемная плотность тонкого слоя кокса, образующегося при максимальной скорости тепловыделения на этапе пламенного горения древесины сосны из Краснодарского края и березы каменной при $q_e = 35$ кВт/м², составила 179,7 и 238 кг/м³ соответственно. У образца сосны из средней полосы страны при $q_e = 20$ кВт/м² объемная плотность тонкого слоя кокса — 155 кг/м³. Определить плотность кокса позволило измере-

ние потери массы образцов при пиковой скорости тепловыделения:

$$m'' = (\rho_d - \rho_k)\beta, \quad (2)$$

откуда

$$\rho_k = (\rho_d \beta m'')/\beta, \quad (3)$$

где ρ_d и ρ_k — плотность исходной древесины и кокса соответственно, кг/м³;

m'' — скорость потери массы на единицу площади образца, кг/(м² · мин).

В одинаковых условиях внешнего теплового воздействия при $q_e = 35$ кВт/м² наблюдается более высокая объемная плотность кокса у лиственной древесины. У древесины сосны плотность кокса возрастает с увеличением интенсивности радиационного теплового потока от 20 до 35 кВт/м², что согласуется с результатами работы [21]. Обращает на себя внимание то, что с увеличением толщины образца древесины сосны протяженность участка квазистационарного режима пламенного горения при внешнем тепловом потоке 20 кВт/м² существенно возрастает. Это сказывается на средней скорости обугливания древесины при пламенном горении и толщине кокса. В подобных условиях теплового воздействия поведение образца можно считать термически толстым на этапе пламенного горения. Интересно, что у образца толщиной 10 мм к концу пламенного горения также значительная часть древесины сохраняется еще не разложившейся. Отсюда следует важный вывод, что в последующем беспламенном горении древесины происходит не только гетерогенное горение кокса. В процессе беспламенного горения происходят по меньшей мере три реакции: пиролиз, термоокислительная деструкция древесины и окисление образующегося кокса. Подтверждением этому выводу служит факт, что после окончания пламенного горения (на 10,45-й минуте) толщина обугленного слоя у образца сосны составляет всего 5,75 мм, а температура на отметке 12,5 мм равна 182 °С, и фронт пиролиза достигает ее только через 5 мин. Он соответствует восходящей ветви второго пика СТВ, связанного с гетерогенным процессом. По изменению динамики температуры в центре и на обратной стороне образца можно заключить о переходе процесса тлеющего горения образца в режим поведения термически тонкого материала. Температура на внешней стороне образца со стороны обогрева к этому моменту достигает почти 670 °С (рис. 3).

При горении происходит значительная усадка образца. После достижения максимальной СТВ на этапе тлеющего горения нисходящая ветвь кривой СТВ обусловлена выгоранием кокса, сопровождающегося усадкой образца. К концу испытания (42 мин) она составляет по толщине 62,8 %,

⁵ ГОСТ 30402–96. Материалы строительные. Метод испытания на воспламеняемость: принят Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве (МНТКС) 15 мая 1996 г.

⁶ ГОСТ Р ИСО 5660-1–2020. Испытания по определению реакции на огонь. Интенсивности тепловыделения, дымообразования и потери массы. Часть 1: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 октября 2020 г. № 923-ст.

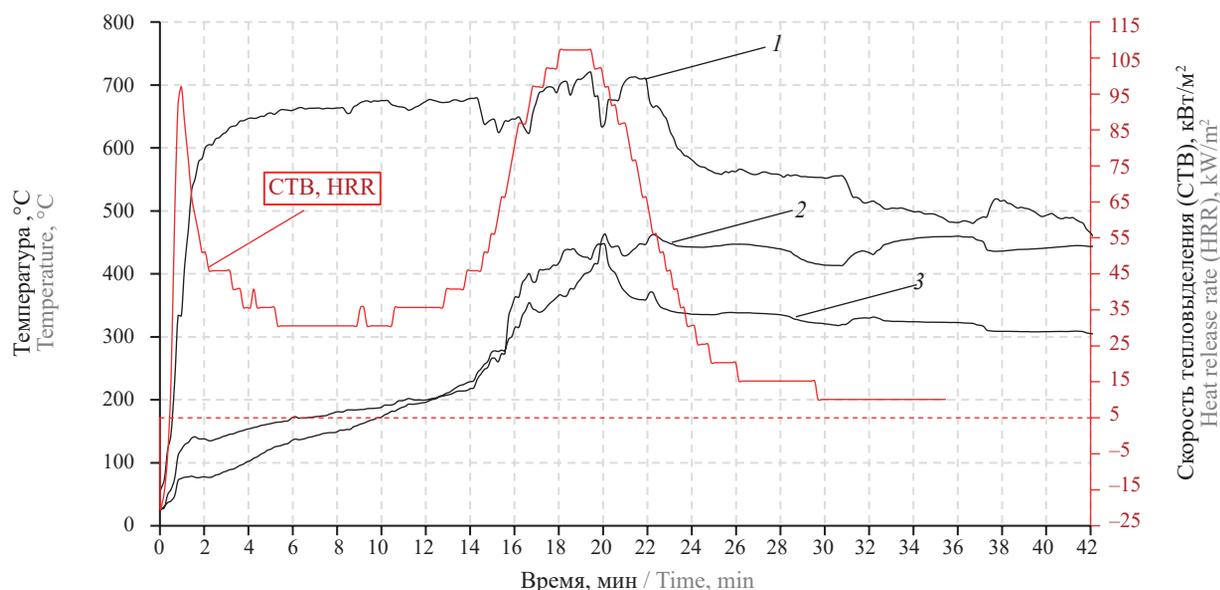


Рис. 3. Изменение скорости тепловыделения при горении древесины сосны при действии теплового потока $q_e = 20$ кВт/м² и росте температуры: 1 — на поверхности; 2 — в центре; 3 — на обратной стороне образца

Fig. 3. A change in the rate of heat release during combustion of pine wood under the action of $q_e = 20$ kW/m² and temperature: 1 — on the surface; 2 — in the centre; 3 — on the back side of the sample

по объему — 68,6 %. Масса образца после испытания равна 13 г. Вид его показан на рис. 4.

По всей высоте обугленного образца заметны трещины в поперечном направлении относительно волокон древесины. На обугленной поверхности наблюдаются возвышенности и впадины. В образовании возвышенностей, принимающих форму хребтов и пиков, прослеживается участие годовичных колец. Впадины между ними имеют пористую структуру



Рис. 4. Вид образца древесины сосны после беспламенного горения

Fig. 4. A pine wood sample after flameless combustion

с очень мелкими порами. Объем конечного образца с учетом трещин составил 113 см³. Таким образом, можно оценить объемную плотность кокса полностью обугленного образца после испытания. Она составила 115 кг/м³. Измерение потери массы образца в период достижения максимального значения СТВ² позволяет рассчитать скорость обугливания на этом этапе беспламенного горения, решая обратную задачу и используя формулу (2): $\beta = m''(\rho_d - \rho_k)$.

Объемная плотность кокса к началу гетерогенного горения древесины принята средней между плотностью тонкого слоя кокса и плотностью кокса к концу испытания: $\rho_k = (155 + 115)/2 = 135$ кг/м³; $m'' = 36 \cdot 10^{-3}$ кг/0,0144 м² · 8,23 мин = 0,304 кг/(м² · мин). Тогда $\beta = 0,304/(422 - 135) = 1,06$ мм/мин.

Относительно высокая средняя скорость обугливания обусловлена вкладом в тепловой баланс большой экзотермики реакции окисления кокса. Пиковое значение СТВ²_{max} соответствует полному обугливанию образца древесины. Нисходящая ветвь кривой СТВ² связана с выгоранием и усадкой кокса. Характеристики тепловыделения на этапе беспламенного горения древесины приведены в табл. 2. Общее тепловыделение ОТВ² отнесено ко всему второму этапу горения.

Образцы древесины лиственной породы в режиме гетерогенного горения характеризуются более высоким тепловыделением по сравнению с древесиной хвойной породы. У образца березы наблюдаются самые высокие показатели, а показатели березы каменной превышают даже показатели древесины дуба. Полученные результаты дают возможность оценить эффективную теплоту сгорания древесины

Таблица 2. Влияние плотности внешнего теплового потока на характеристики тепловыделения древесины при беспламенном горении**Table 2.** The influence of density of an external heat flux on heat release characteristics of wood during flameless combustion

Образец Sample	Плотность ρ , кг/м ³ Density ρ , kg/m ³	Радиационный тепловой поток q_e , кВт/м ² Radiative heat flux q_e , kW/m ²	$\tau^2_{н}$, мин τ^2_n , min	Время начала второго максимального пика скорости теповыделения τ^2_{max} , мин The starting time of the 2nd maximum peak of the rate of heat release τ^2_{max} , min	Максимальная скорость теповыделения второго пика СВТ ² _{max} , кВт/м ² Maximum heat release rate of the second peak СВТ ² _{max} , kW/m ²	Общее теповыделение второго этапа (беспламенного горения) ОТВ ² , кВт · мин/м ² Total heat release at the second stage (flameless combustion) THR ² , kW · min/m ²
Сосна Pine	448	20	2,41	5,9	159,3	635,6
		35	1,75	4,6	203,5	734,5
		52	1,43	4,1	247,3	814
Сосна (25 мм) Pine (25 mm)	422	20	10,45	18,68	102,2	953,6
Сосна Крас- нодарский край Pine (Krasnodar region)	400	35	2,08	4,05	200,6	563,8
Ель Spruce	400	20	2,34	4,65	202,1	597,6
		35	1,86	3,25	233,2	656,1
		52	1,33	2,65	256,1	674,4
Береза Birch	567	20	1,83	4,73	321,9	985,6
		35	1,50	3,59	400,5	1098,4
		52	1,05	3,06	459,6	1288,4
Береза Каменная Stone birch	833	35	2,92	4,98	367,9	944,4
Дуб Oak	638	20	2,5	6,03	227,7	780,7
		35	2,16	4,68	245,1	819,7
		52	1,83	4,1	312,0	986,4

при беспламенном горении, а также коэффициент полноты сгорания, зная низшую теплоту полного сгорания исследуемых образцов. В работе определены значения низшей теплоты полного сгорания образцов древесины сосны краснодарской и березы каменной, а также угольных остатков, которые образуются в конце испытания характеристик тепловыделения. Они равны 18,11 и 17,63 кДж/г, а также 30,81 и 32,59 кДж/г соответственно. Низшие значения теплоты полного сгорания древесины у сосны из средней полосы России — 19,62 кДж/г; дуба — 18,76 кДж/г были известны ранее [26, 27]. На этапе гетерогенного горения значения эффективной теплоты сгорания древесины сосны краснодарской и березы каменной равны 9,97 и 8,03 кДж/г, а коэффициенты полноты сгорания 0,55 и 0,45 соответственно. У образца древесины сосны толщиной 25 мм при $q_e = 20$ кВт/м² эффективная тепло-

та сгорания $\Delta H_{эфф} = ОТВ^2/\Delta t = 953,6/(115 - 45) = 13,6$ кДж/г; $\eta = 0,69$. На этапе беспламенного горения реализуется таким образом лишь часть тепловыделения от горения древесины за весь период.

Выводы

Установлено, что не только образцы древесины толщиной 10 мм, но и толщиной 25 мм характеризуются двумя пиками на кривых скорости тепловыделения при действии внешнего теплового потока 20...52 кВт/м². Между пиками наблюдается участок квазистационарного горения, протяженность которого снижается с ростом плотности внешнего теплового потока и увеличивается с ростом толщины образца.

Видеосъемка процесса горения древесины сосны однозначно указывает на то, что гетерогенный процесс горения начинается после окончания ква-

зистационарного периода. Оценка скорости обугливания и толщины слоя кокса на этапе пламенного горения приводит к выводу, что горение образцов древесины в этом случае протекает в режиме термически толстого материала. Переход к беспламенному горению означает переход к режиму поведения термически тонкого материала. При этом следует учитывать в механизме горения три реакции: пиролиз, окислительное разложение древесины и окис-

ление кокса. На этом этапе скорость обугливания образца древесины сосны при $q_e = 20$ кВт/м² равна 1,06 мм/мин, эффективная теплота сгорания $\Delta H_{эфф} = 13,6$ кДж/г, коэффициент полноты сгорания $\eta = 0,69$. В период гетерогенного горения наблюдается большая усадка образца за счет выгорания кокса (по толщине 62,8 и 68,6 % по объему). Объемная плотность кокса к концу теста — 115 кг/м³.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Полевин П.В., Чебуханов М.А., Долаков Т.Б., Козлов А.А., Матюшин Ю.А., Фирсов А.Г. и др. Пожары и пожарная безопасность в 2018 году. Статистический сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М. : ВНИИПО, 2019. 125 с.
2. Круглов Е.Ю., Бабенко М.Д., Молочнюк А.С., Косов А.Н. Проблемы пожарной безопасности деревянного домостроения на объектах жилого сектора // Ройтмановские чтения : сб. мат. 8-й науч.-практ. конф. М. : Академия ГПС МЧС России, 2020. С. 11–13. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42880334>
3. Шутлов Ф.А., Круглов Е.Ю., Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б. Влияние теплоизоляции из полимерного пенокомпозита «PENOCOM» на огнестойкость ограждающих деревянных каркасных конструкций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. № 1. С. 28–37. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.01.28-37
4. Круглов Е.Ю., Кобелев А.А., Шутлов Ф.А., Асеева Р.М. Термогравиметрический анализ разложения полимерного пенокомпозита «PENOCOM» // Все материалы. Энциклопедический словарь. 2016. № 6. С. 30–34.
5. Круглов Е.Ю., Кобелев А.А., Пижамов О.Ю., Рахматуллин Р.Р. Поведение при нагреве неорганической теплоизоляции на основе вторичного целлюлозного сырья // Исторический опыт, современные проблемы и перспективы образовательной и научной деятельности в области пожарной безопасности : сб. тез. докл. мат. междунар. науч.-практ. конф. М. : Академия ГПС МЧС России, 2018. С. 299–303. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36843481>
6. Зайкина М.И., Решетов А.П., Трофимец В.Я. Методика оценки термодинамических характеристик тлеющего горения в пористых почвенных системах на нефтегазовых объектах // Научно-аналитический журнал Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2017. № 2. С. 63–70.
7. Зайкина М.И., Галишев М.А., Шидловский Г.Л. Термодинамические характеристики тлеющего горения в пористых материалах // Научно-аналитический журнал Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2017. № 3. С. 63–70.
8. Зайкина М.И., Галишев М.А. Исследование изменения температурных режимов при горении пористых материалов // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. 2015. № 4. С. 35–38.
9. Зайкина М.И. Методика экспериментальной оценки характеристик тлеющего горения древесных материалов при внешнем тепловом воздействии // Казахстан в новой глобальной реальности: рост, реформы, развитие : мат. Междунар. науч.-практ. конф. мол. уч. : курсантов (студентов), слушателей и адъюнктов. Республика Казахстан, Кокшетауский технический институт, г. Кокшетау. 2016. С. 135.
10. Зайкина М.И. Проблема исследования процессов тлеющего горения на транспорте // Чрезвычайные ситуации: теория и практика. ЧС-2015 : мат. Междунар. науч.-практ. конф., Республика Беларусь, Гомельский инженерный институт МЧС Республики Беларусь. Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2015. С. 58.
11. Babrauskas V. Wood char depth: Interpretation in fire investigation. Proceedings of International Symposium on Fire Investigation. United Kingdom, 2004.
12. White R.H., Nordheim E.V. Charring rate of wood for ASTM E 119 Exposure // Fire Technology. 1992. Vol. 28. Issue 1. Pp. 5–30.

13. *Pofit-Szczepanska M.* The effect of physical properties of charcoal layer developed when wood is exposed o fire on the heat release rate // *Proceedings of 25th Intern. Symposium on combustion processes, USA, Los-Angeles, 31.07-3.08.1994.* 1994. Pp. 132–141.
14. *Syme D.* Verification of charring equation for Australian timber based on full-scale fire resistance test // *Proceedings of Pacific Timber Engineering Conference, Australia, Queensland Univ. of Technology.* 1994. Vol. 1. Pp. 619–623.
15. *Lipinskas D., Maciulaitis R.* Further opportunities for development of the method for fire origin prognosis // *Journal of Civil Engineering and Management.* 2005. Vol. 11. Issue 4. Pp. 299–307. DOI: 10.3846/13923730.2005.9636361
16. *Круглов Е.Ю., Кобелев А.А., Харьков А.Ю., Сорокин А.Н.* Влияние толщины легкого деревянного каркаса на скорость обугливания // *Полимерные материалы пониженной горючести : мат. IX междунар. конф. (г. Минск, 20–24 мая 2019 г.). Минск : Белорусский государственный университет, 2019. С. 150–152.*
17. *Смирнов К.П., Чешко И.Д., Егоров Б.С. и др.* Комплексная методика определения очага пожара. Л., 1986. 114 с.
18. *Таубкин С.И.* Пожар и взрыв, особенности их экспертизы. М., 1999. 600 с.
19. *Круглов Е.Ю., Асеева Р.М.* Беспламенное горение древесины: параметры макрокинетики пиролиза и термоокислительного разложения // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety.* 2020. Т. 29 (1). С. 43–54. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.43-54
20. *Tran H.C.* Experimental data on wood materials // *Heat Release in Fires.* Ch. 11, part b. Babrauskas V., Grayson S.J. (Eds.). New York : Elsevier Applied Science, 1992. Pp. 357–372.
21. *Tran H.C., White R.H.* Burning rate of solid wood measured in a heat release rate calorimeter // *Fire and Materials.* 1992. Vol. 16. Pp. 197–206.
22. *Ohlemiller T.J.* Smoldering combustion propagation on solid wood // *Fire Safety Sci.* 1991. Vol. 3. Pp. 565–574.
23. *Rein G.* Smoldering combustion // *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering / Hurley M.J. (editor-in-chief).* 5th ed. New York, NY : Springer, 2016. Pp. 581–603. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_19
24. *Hadden R., Alkatib A., Rein G., Torero J.L.* Radiant ignition of polyurethane foam: the effect of sample size // *Fire Technology.* 2014. Vol. 50. Issue 3. Pp. 673–691. DOI: 10.1007/s10694-012-0257
25. *Kashiwagi T., Ohlemiller T.J., Werner K.* Effects of external radiant flux and ambient oxygen concentration on nonflaming gasification rates and evolved products of white pine // *Combustion and Flame.* 1987. Vol. 69. Pp. 331–345.
26. *Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б., Барботько С.Л., Круглов Е.Ю.* Характеристики тепловыделения при горении древесины различных пород и видов // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety.* 2011. Т. 20. № 7. С. 2–7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/harakteristiki-teplovydeleniya-pri-gorenii-drevesiny-razlichnyh-porod-i-vidov>
27. *Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B.* Fire behavior and fire protection in timber buildings. Dordrecht, Springer Science+Business Media, 2014. 280 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7460-5
28. *Вольнский В.Н.* Взаимосвязь и изменчивость физико-механических свойств древесины. Архангельск, 2000. 196 с.
29. *Wichman I.S., Atreya A.* A simplified model for the pyrolysis of charring materials // *Combustion and Flame.* 1987. Vol. 68. Pp. 231–247.
30. *Moghtaderi B., Novozhilov V., Fletcher D., Kent J.H.* An integral model for the transient pyrolysis of solid materials // *Fire and Materials.* 1997. Vol. 21. Pp. 7–16.

REFERENCES

1. Polekhin P.V., Chebukhanov M.A., Dolakov T.B., Kozlov A.A., Matyushin Yu.A., Firsov A.G., Sibirko V.I. et al. *Fires and fire safety in 2018 : Statistical collection.* D.M. Gordienko (ed.). Moscow, 2019; 125. (rus).
2. Kруглов Е.Ю., Babenko M.D., Molochnyuk A.S., Kosov A.N. Problems of fire safety of wooden housing construction at the objects of the residential sector. *Roitman Readings : Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference.* State Fire Academy of Emercom of Russia, 2020; 11-13. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42880334> (rus).

3. Shutov F.A., Kruglov E.Yu., Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. Influence of polymeric foam composite "PENOCOM" on fire resistance of wood frame separating constructions. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(1):28-37. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.01.28-37 (rus).
4. Kruglov E.Yu., Kobelev A.A., Shutov F.A., Aseyeva R.M. Thermogravimetric analysis of the decomposition of the polymer foam composite "PENOCOM". *All Materials. Encyclopaedic Reference Manual*. 2016; 6:30-34. DOI: 10.1134/S1995421217010142 (rus).
5. Pizhamov O.Yu., Kobelev A.A., Kruglov E.Yu., Rakhmatullin R.R. Thermal behavior of insulation from recycled cellulose-based raw material. *Historical experience, modern problems and prospects of educational and scientific activities in the field of fire safety : collection of abstracts of materials of the international scientific and practical conference*. Moscow, Academy of State Fire Service EMERCOM of Russia, 2018; 299-303. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36843481> (rus).
6. Zaykina M.I., Reshetov A.P., Trofimets V.Ya. Technique of assessment of thermodynamic characteristics of the smoldering combustion in porous soil systems on oil and gas objects. *Scientific analytical journal Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia*. 2017; 2:63-70. (rus).
7. Zaykina M.I., Galishev M.A., Shidlovskiy G.L. Thermodynamic characteristics of glow combustion in porous materials. *Scientific analytical journal Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia*. 2017; 3:63-70. (rus).
8. Zaykina M.I., Galishev M.A. Investigation of changes in temperature regimes during combustion of porous materials. *Supervision and forensic expertise in the security system*. 2015; 4:35-38. (rus).
9. Zaykina M.I. A technique for the experimental evaluation of the characteristics of smoldering combustion of wood materials under external heat exposure. *Materials of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists: cadets (students), listeners and adjuncts*. Kokshetau Technical Institute, 2016; 135 (kaz).
10. Zaykina M.I. The problem of researching the processes of smoldering combustion in transport. *Emergency Situations — 2015: Theory and Practice : Materials of the International Scientific and Practical Conference*. Gomel, Gomel Engineering Institute of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, 2015; 58. (rus).
11. Babrauskas V. Wood char depth: interpretation in fire investigation. *Proceedings of International Symposium on Fire Investigation*. United Kingdom, 2004.
12. White R.H., Nordheim E.V. Charring rate of wood for ASTM E 119 Exposure. *Fire Technology*. 1992; 28(1):5-30.
13. Pofit-Szczepanska M. The effect of physical properties of charcoal layer developed when wood is exposed of fire on the heat release rate. *Proceedings of 25th Intern. Symposium on combustion processes, USA, Los-Angeles, 31.07-3.08*. 1994; 132-141.
14. Sym D. Verification of charring equation for Australian timber based on full-scale fire resistance test. *Proceedings of Pacific Timber Engineering Conference*. Australia, Queensland Univ. of Technology, 1994; 1:619-623.
15. Lipinskas D., Maciulaitis R. Further opportunities for development of the method for fire origin prognosis. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2005; 11(4):299307. DOI: 10.3846/13923730.2005.9636361
16. Kruglov E.Yu., Kobelev A.A., Kharkov A.Yu., Sorokin A.N. Effect of the thickness of a light timber frame on the rate of charring. *Low Flammability Polymeric Materials : Proceedings of the IX International Conference*. Belarusian State University, 2019; 150-152. (blr).
17. Smirnov K.P., Cheshko I.D., Egorov B.S. et al. *Comprehensive method for determining the source of fire*. Leningrad, 1986; 114. (rus).
18. Taubkin S.I. *Fire and explosion, features of their expertise*. Moscow, 1999; 600. (rus).
19. Kruglov E.Yu., Aseeva R.M. Flameless burning of wood: parameters of macrokinetics of pyrolysis and thermo-oxidative decomposition. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(1):43-54. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.43-54 (rus).
20. Tran H.C. Experimental data on wood materials. *Heat Release in Fires*. Chapter 11, part b. Babrauskas V., Grayson S.J. (Eds.). New York, Elsevier Applied Science, 1992; 357-372.
21. Tran H.C., White R.H. Burning rate of solid wood measured in a heat release rate calorimeter. *Fire and Materials*. 1992; 16:197-206.
22. Ohlemiller T.J. Smoldering combustion propagation on solid wood. *Fire Safety Sci*. 1991; 3:565-574.
23. Rein G. Smoldering combustion. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering / Hurley M.J. (editor-in-chief)*. 5th ed. New York, NY, Springer, 2016; 581-603. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_19

24. Hadden R., Alkatib A., Rein G., Torero J.L. Radiant ignition of polyurethane foam: the effect of sample size. *Fire Technology*. 2014; 50(3):673-691. DOI: 10.1007/s10694-012-0257
25. Kashiwagi T., Ohlemiller T.J., Werner K. Effects of external radiant flux and ambient oxygen concentration on nonflaming gasification rates and evolved products of white pine. *Combustion and Flame*. 1987; 69:331-345.
26. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B., Barbotko S.L., Kruglov E.Yu. Characteristics of heat release at burning of wood of different reeds and species. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 20(7):2-7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/harakteristiki-teplovydeleniya-pri-gorenii-drevesiny-razlichnyh-porod-i-vidov> (rus).
27. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. *Fire behavior and fire protection in timber buildings*. Dordrecht, Springer Science+Business Media, 2014; 280. DOI: 10.1007/978-94-007-7460-5
28. Volynskiy V.N. *Interrelation and variability of timber mechanical properties*. Arkhangelsk, 2006; 196. (rus).
29. Wichman I.S., Atreya A. Simplified model for the pyrolysis of charring materials. *Combustion and Flame*. 1987; 68:231-247.
30. Moghtaderi B., Novozhilov V., Fletcher D., Kent J.H. An integral model for the transient pyrolysis of solid materials. *Fire and Materials*. 1997; 21:7-16.

Поступила 05.07.2021, после доработки 16.08.2021;

принята к публикации 06.09.2021

Received July 5, 2021; Received in revised form August 16, 2021;

Accepted September 6, 2021

Информация об авторах

Евгений Юрьевич КРУГЛОВ, канд. техн. наук, научный сотрудник, Учебно-научный комплекс пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 766742; ORCID: 0000-0003-3684-5083; e-mail: 89268196698@mail.ru

Роза Михайловна АСЕЕВА, д-р хим. наук, профессор кафедры пожарной безопасности в строительстве, Учебно-научный комплекс пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 43948; ORCID: 0000-0002-2940-9155; e-mail: rm-aseeva@yandex.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Evgeniy Yu. KRUGLOV, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Educational Scientific Centre of Problems of Fire Safety in Construction, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 766742; ORCID: 0000-0003-3684-5083; e-mail: 89268196698@mail.ru

Roza M. ASEEEVA, Dr. Sci. (Chem.), Professor of Fire Safety in Construction Department, Educational Scientific Centre of Problems of Fire Safety in Construction, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 43948; ORCID: 0000-0002-2940-9155; e-mail: rm-aseeva@yandex.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.