

Проблемы обеспечения воспроизводимости измерений в системе стандартов пожарной безопасности: Метод II ГОСТ 30244

Евгений Юрьевич Полищук¹, Евгений Юрьевич Круглов²,
Вадим Александрович Кудряшов³, Владислав Сергеевич Шоя⁴,
Марина Викторовна Гравит⁵, Ирина Леонидовна Котлярская⁵✉

¹ СБЕ ПМИПИР ГК ТехноНИКОЛЬ, г. Москва, Россия

² Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

³ Научно-исследовательское республиканское унитарное предприятие по строительству «Институт БелНИИС», г. Минск, Республика Беларусь

⁴ СБЕ ПМИПИР ГК ТехноНИКОЛЬ, г. Рязань, Россия

⁵ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Правильная оценка пожарной опасности строительных материалов — это критичный этап проектирования и эксплуатации зданий. Так как все больше в интерьере и экстерьере зданий используются клееные слоистые древесные материалы, такие как фанера, важно определить их поведение во время пожара.

Объект и предмет исследования. В качестве объекта исследования были отобраны образцы трудногорючей фанеры. Предметом исследования является определение группы горючести данного материала. **Цель исследования.** Целью работы является оценка воспроизводимости испытаний, проводимых в различных испытательных лабораториях, на примере показателя горючести трудногорючей фанеры и разработки рекомендаций по совершенствованию методических подходов.

Материалы и метод исследования. Определение группы горючести трудногорючей фанеры проводилось в 10 аккредитованных лабораториях согласно ГОСТ 30244–94 «Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть». Исследованию подлежали следующие характеристики: температура дымовых газов, площадь повреждения поверхности, потеря массы образцом и время самостоятельного горения.

Результаты и их обсуждение. Существующая методика определения группы горючести несовершенна и не обеспечивает воспроизводимости результатов измерений. Предлагаемые изменения в ГОСТ 30244–94 (стандартизация газа, держателей, калибровки) не решают проблему отсутствия корреляции между параметрами испытаний и физико-химией горения. Показатель «повреждения» неинформативен. Необходимо оценивать тепловыделение, скорость распространения пламени, токсичность газов и другие параметры, характеризующие особенности реакции горения. Современные показатели горючести и классы пожарной опасности не отражают фактического участия материалов в развитии пожаров и не могут использоваться для параметрического противопожарного нормирования или прогнозирования развития пожара с использованием инструментов моделирования. Одним из первоочередных шагов по преодолению существующих проблем может стать разработка единого классификационного стандарта, основанного на комплексной оценке этих параметров.

Выводы. Отсутствие воспроизводимости результатов в различных аккредитованных лабораториях указывает на необходимость пересмотра и совершенствования нормативной базы.

Ключевые слова: строительные материалы; трудногорючая фанера; огонь; негорючесть; горючесть; методы испытаний; пожарная безопасность

Для цитирования: Полищук Е.Ю., Круглов Е.Ю., Кудряшов В.А., Шоя В.С., Гравит М.В., Котлярская И.Л. Проблемы обеспечения воспроизводимости измерений в системе стандартов пожарной безопасности: Метод II ГОСТ 30244 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 4. С. 14–31. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.14-31

✉ Котлярская Ирина Леонидовна, e-mail: iravassilek@mail.ru

Problems of ensuring reproducibility of measurements in the system of fire safety standards: Method II GOST 30244

Evgeny Yu. Polishchuk¹, Evgeny Yu. Kruglov², Vadim A. Kudryashov³, Vladislav S. Shoya⁴, Marina V. Gravit⁵, Irina L. Kotlyarskaya⁵✉

¹ SBE PMiPIR TechnoNICOL Group, Moscow, Russian Federation

² All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

³ Research and Development Republican Unitary Enterprise for Construction BelNIIS Institute, Minsk, Republic of Belarus

⁴ SBE PMiPIR TechnoNICOL Group, Ryazan', Russian Federation

⁵ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Proper assessment of the fire hazard of building materials is a critical stage in the design and operation of buildings. As glued laminated wood materials such as plywood are increasingly used in the interior and exterior of buildings, it is important to determine their behaviour during a fire.

The object and subject of the study. Specimens of flame-retardant plywood were selected as the object of the study. The subject of the study is the determination of the flammability group of this material.

The aim of the work. The aim of the work is to assess the convergence of test results conducted in various testing laboratories, using the example of the flammability index of hard-to-burn plywood and to develop recommendations for improving methodological approaches.

Materials and research method. The determination of the flammability group of refractory plywood was carried out in 10 accredited laboratories in accordance with GOST 30244–94 “Building materials. Methods of testing for flammability”. The following characteristics were investigated: flue gas temperature, surface damage area, mass loss by the specimen, and self-combustion time.

Results and discussion. The existing methodology for determining the flammability group does not ensure the reproducibility of measurement results. The proposed changes to GOST 30244–94 (standardization of gas, holders, calibrations) do not solve the problem of the lack of correlation between the test parameters and the physico-chemistry of combustion. The “damage” indicator is uninformative. It is necessary to evaluate heat generation, flame propagation velocity, gas toxicity, and other fire hazard parameters. Current flammability indicators and fire hazard classes do not reflect the actual danger of materials and cannot be used for fire safety rationing or fire development forecasting. One of the first steps to overcome existing problems may be the development of a unified classification standard based on a comprehensive assessment of these parameters.

Conclusions. The lack of reproducibility of results in different accredited laboratories indicates the need to revise and improve the regulatory framework.

Keywords: building materials; hard-to-burn plywood; fire; incombustibility; combustibility; test methods; fire safety

For citation: Polishchuk E.Yu., Kruglov E.Yu., Kudryashov V.A., Shoya V.S., Gravit M.V., Kotlyarskaya I.L. Problems of ensuring reproducibility of measurements in the system of fire safety standards: Method II GOST 30244. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(4):14-31. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.14-31 (rus).

✉ Irina Leonidovna Kotlyarskaya, e-mail: iravassilek@mail.ru

Введение

Сфера архитектуры и дизайна интерьера активно развивается: проектируются и возводятся более крупные и многофункциональные объекты, на строительном рынке постоянно появляются инновационные материалы и возникают более передовые технологии, например аэрогель [1–3], графен [4, 5], углеродные нанотрубки [6, 7], самовосстанавливающиеся материалы [8, 9], 3D-печать зданий [10], лазерное сканирование зданий [11, 12], модульное строительство [13, 14], использование робототехники [15–17] и т.д. Стремление к экологическому и устойчивому развитию диктует учет таких аспектов, как энергоэффективность, использование возобновляемых материалов и снижение негативного воздействия на окружающую среду при разработке и строитель-

стве зданий [18–20]. Несмотря на обилие композиционных материалов и наноматериалов, отчетливо прослеживается тенденция и к применению натуральных материалов (древесина, камень, металл, керамика), так как они позволяют почувствовать связь с природой, что особенно актуально и востребованно в мегаполисах. Одним из ключевых материалов, который активно используется в интерьере и экстерьере зданий, является древесина [21]. Она не только служит основным сырьем для производства мебели и строительных материалов, но и обладает способностью эффективно поглощать углекислый газ (CO₂) [22].

Безопасность людей при пожарах напрямую зависит от времени блокирования путей эвакуации и эффективности мер предотвращения и прекращения распространения пожара на начальных эта-

пах, а эти факторы, в свою очередь, определяются поведением, в том числе, строительных материалов в условиях пожара. Необходимый уровень пожарной безопасности строительных материалов и изделий, в том числе деревянных, согласно п. 6 ст. 52 Федерального закона¹, можно обеспечить с помощью огнезащитных составов (в том числе антипиренов). В соответствии с ГОСТ 12.1.033–81², антипиренами являются вещества или смеси, добавляемые в материал (вещество) органического происхождения для снижения его горючести.

Массивная древесина обладает анизотропной природой, что создает трудность в ее равномерной пропитке огнезащитным составом. Чем толще пропитываемый сортимент, тем выше неравномерность пропитки. При обработке массивной древесины антипиреном в поверхностной зоне древесного материала его содержание всегда оказывается значительно больше, чем во внутренних зонах, в которых антипирен может даже и вовсе отсутствовать. У клееных слоистых древесных материалов, таких как фанера, неравномерность пропитки практически исключена. Слои древесного материала — шпоны — обычно изготавливаются малой толщины, и поэтому их можно достаточно легко и равномерно пропитать антипиреном до склеивания, а после их склеивания получается материал с равномерной огнезащитой по всему объему [23]. Выполненная по такому методу трудногорючая фанера используется в качестве конструктивных элементов в железнодорожных пассажирских вагонах, к которым предъявляются высокие требования по пожарной безопасности [24].

Правильная оценка пожарной опасности строительных материалов — это критичный этап проектирования и эксплуатации зданий. В работе [25] уточняется, что разнообразие методологических подходов к оценке пожарной опасности строительных материалов, в частности горючести, приводит к проблеме, препятствующей свободному перемещению товаров в международном сотрудничестве. Горючесть как ключевая пожарно-техническая характеристика определяется способностью материала к самостоятельному горению как с внешним источником тепла, так и без него. Неоднозначность результатов испытаний, как горючих, так и негорючих, создает путаницу и риски как для общества в целом (связаны с возможностью обращения фальсифицированной продукции), так и для произ-

водителей (связаны с возможностью предъявления необоснованных претензий к качеству продукции, потребительскому экстремизму). Проблема гармонизации, унификации и стандартизации отечественных и международных стандартов по испытанию материалов также отражена в работах [26, 27].

Одним из ключевых вопросов верификации результатов исследований с использованием стандартных методов является вопрос выбора эталонного образца или образца сравнения.

В рамках работы в качестве объекта исследования (образца сравнения) были отобраны образцы трудногорючей фанеры, характеризующиеся высокой степенью предсказуемости поведения в процессе огневого воздействия. Предметом исследования является определение группы горючести данного материала в соответствии с ГОСТ 30244–94³.

Целью работы является оценка воспроизводимости результатов огневых испытаний, проводимых в различных испытательных лабораториях, на примере показателя горючести трудногорючей фанеры и разработки рекомендаций по совершенствованию методических подходов к оценке реакции строительных материалов к воздействию огня.

Образцы фанеры дополнительно были испытаны на установке ВСМ (установка для определения воспламеняемости) по ГОСТ 30402–96⁴ при воздействии стандартизованных тепловых потоков 5, 10, 15, 20 кВт/м², время воздействия при этом соответствовало продолжительности испытаний по ГОСТ³ и составляло 10 мин.

Материалы и метод исследования

Для исследования были отобраны 12 образцов трудногорючей фанеры (АО «Фанерный завод «Власть труда», Московская область) из одной партии. Размер каждого образца составляет 1000 × 190 × 10 мм.

Метод испытания горючих строительных материалов для определения их групп горючести применяют и для однородных, и для слоистых горючих строительных материалов. Испытания проводились специалистами 10 аккредитованных лабораторий, а также заводской лабораторией в рамках, определенных стандартом ГОСТ³ и регламентами работы лаборатории.

Установка для испытания состоит из камеры сжигания, системы подачи воздуха в камеру сжигания, газоотводной трубы, вентиляционной системы для удаления продуктов сгорания (рис. 1).

¹ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : ФЗ № 123 от 22.07.2008.

² ГОСТ 12.1.033–81. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Термины и определения (с Изменением № 1).

³ ГОСТ 30244–94. Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть.

⁴ ГОСТ 30402–96. Материалы строительные. Метод испытания на воспламеняемость.

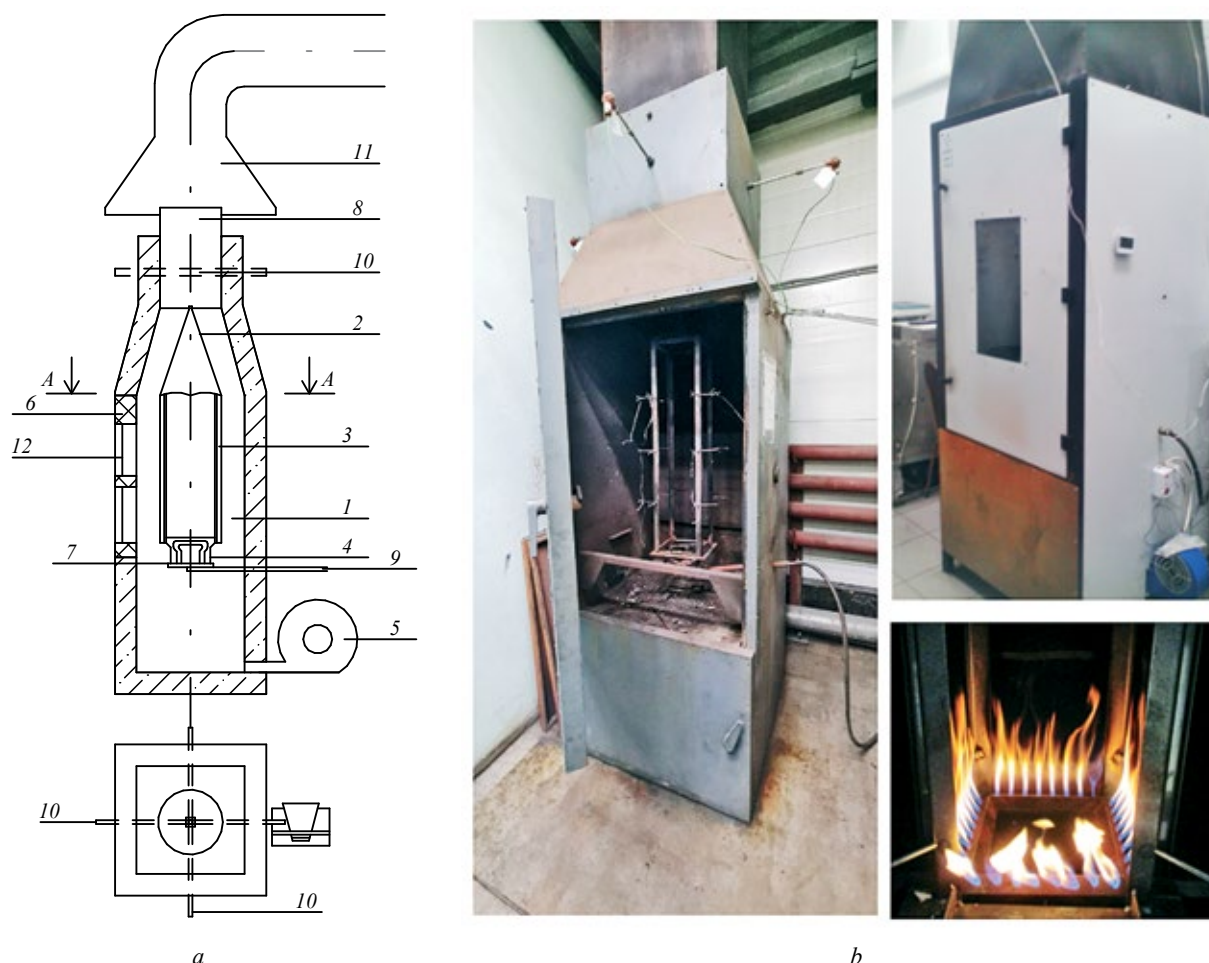


Рис. 1. Общий вид установки: *a* — схематичный вид: 1 — камера сжигания; 2 — держатель образца; 3 — образец; 4 — газовая горелка; 5 — вентилятор подачи воздуха; 6 — дверца камеры сжигания; 7 — диафрагма; 8 — вентиляционная труба; 9 — газопровод; 10 — термопары; 11 — вытяжной зонтик; 12 — смотровое окно; *b* — фото установки

Fig. 1. General view of the installation: *a* — schematic view, where 1 — combustion chamber; 2 — specimen holder; 3 — specimen; 4 — gas burner; 5 — air supply fan; 6 — combustion chamber door; 7 — diaphragm; 8 — ventilation pipe; 9 — gas pipeline; 10 — thermocouples; 11 — exhaust umbrella; 12 — viewing window; *b* — installation photo

В каждой лаборатории проводилось три испытания трудногорючей фанеры. В каждом из трех испытаний одновременно испытывалось по четыре образца материала.

Согласно стандарту ГОСТ³, основными критериями отнесения материалов к различным группам

горючести являются следующие характеристики: температура дымовых газов, площадь повреждения поверхности, потеря массы образцом и время самостоятельного горения. Показатель горючести строительных материалов определяется в соответствии с требованиями табл. 1.

Таблица 1. Критерии соответствия группы горючести по ГОСТ³
Table 1. Criteria for compliance with the flammability group according to GOST³

Группа горючести материалов The flammability group of materials	Параметры горючести Flammability parameters			
	Температура дымовых газов T , °C Flue gas temperature T , °C	Степень повреждения по длине S_L , % Degree of damage in length S_L , %	Степень повреждения по массе S_m , % Degree of damage by mass S_m , %	Продолжительность самостоятельного горения $t_{c,sp}$, с Duration of self-combustion $t_{c,sp}$, s
Г1 / G1	≤ 135	≤ 65	≤ 20	0
Г2 / G2	≤ 235	≤ 85	≤ 50	≤ 30
Г3 / G3	≤ 450	> 85	≤ 50	≤ 300
Г4 / G4	> 450	> 85	> 50	> 300

Результаты испытаний

Результаты испытаний, зафиксированные в протоколах, представлены в табл. 2. Сводные данные по результатам испытаний — в табл. 3.

Значения измеряемых параметров для серии 3 (образец № 1–4) в лаборатории № 2 значительно отличаются от значений измеряемых параметров серии 1 и 2, соответственно, необходимо проверить массив

Таблица 2. Результаты испытаний трудногорючей фанеры
Table 2. Test results of hard-to-burn plywood

Лаборатория, номер Laboratory, number	Номер серии испытаний Test series number	Температура дымовых газов, °C Flue gas temperature, °C	Степень повреждения образцов по длине, % The degree of damage to the specimens by length, %				Потеря массы, % Weight loss, %	Время самостоятельного горения, с Self-burning time, s	Группа горючести Flammability group
1	1	96	43	49	38	41	9	0	Г1 / G1
	2	91	44	43	47	42	8	0	
	3	94	48	45	44	39	8	0	
	Среднее Average	94	44				8	0	
2	1	94	43	41	39	44	10	0	Г2 / G2
	2	100	48	48	43	43	12	0	
	3	117	67	56	55	57	17	37	
	Среднее Average	104	49				13	12	
3	1	81	29	10	31	41	5	0	Г1 / G1
	2	94	42	37	32	44	7	0	
	3	91	40	35	38	42	6	0	
	Среднее Average	89	35				6	0	
4	1	118	19	19	22	23	5	0	Г1 / G1
	2	120	34	30	28	32	9	0	
	3	117	22	25	28	24	6	0	
	Среднее Average	118	26				7	0	
5	1	107	43	37	41	42	6	0	Г1 / G1
	2	110	44	45	39	39	7	0	
	3	105	42	37	40	38	6	0	
	Среднее Average	107	41				6	0	
6	1	101	39	32	34	33	5	0	Г1 / G1
	2	97	30	22	26	30	5	0	
	3	102	30	38	34	28	7	0	
	Среднее Average	100	31				6	0	

Лаборатория, номер Laboratory, number	Номер серии испытаний Test series number	Температура дымовых газов, °C Flue gas temperature, °C	Степень повреждения образцов по длине, % The degree of damage to the specimens by length, %				Потеря массы, % Weight loss, %	Время самостоятельного горения, с Self-burning time, s	Группа горючести Flammability group
7	1	96	53*				18	0	Г1 / G1
	2	94	52*				18	0	
	3	97	55*				17	0	
	Среднее Average	96	53				18	0	
8	1	112	37	36	37	36	9	0	Г1 / G1
	2	109	37	37	36	37	9	0	
	3	110	38	37	36	35	9	0	
	Среднее Average	110	37				9	0	
9	1	119	20	21	18	20	6	0	Г1 / G1
	2	117	19	22	23	25	7	0	
	3	120	18	20	26	27	7	0	
	Среднее Average	119	22*				7	0	
10	1	109	42*				11	0	Г1 / G1
	2	110	40*				10	0	
	3	117	40*				12	0	
	Среднее Average	112	41				11	0	
Лаборатория завода «ЛоджикруфПИР» Laboratory of the Logicroof PIR Plant	1	110	21	25	21	21	9	0	Г1 / G1
	2	103	23	30	25	32	9	0	
	3	104	30	25	29	29	10	0	
	Среднее Average	106	26				9	0	

* В протоколе отсутствуют сведения по длине повреждения отдельных образцов.
* The protocol does not contain information on the length of damage to individual specimens.

Таблица 3. Сводные данные по результатам испытаний
Table 3. Summary of test results

Характеристика Characteristic Значение Value	Температура дымовых газов, °C Flue gas temperature, °C	Средние повреждения по длине, % Average damage in length, %	Потеря массы, % Weight loss, %	Время самостоятельного горения, с Self-burning time, s	Общая характеристика General characteristics
Максимальное значение Maximum value	120	67	18	37	Г2 / G2
Среднее Average	104,8	34	9	1	
Минимальное значение Minimal value	81	19	5	0	
Среднее отклонение Average deviation	10,6	8,6	2,7	2,2	

Таблица 4. Расчет критерия Граббса
Table 4. Calculation of the Grubbs criterion

Измеряемые параметры Measured parameters							
<i>i</i>	Температура дымовых газов, °С Flue gas temperature, °C	Степень повреждения образцов по длине, % The degree of damage to the samples by length, %				Потеря массы, % Weight loss, %	Время самостоятельного горения, с Self-burning time, s
		Образец 1 Specimen 1	Образец 2 Specimen 2	Образец 3 Specimen 3	Образец 4 Specimen 4		
1	94	43	41	39	44	10	0
2	100	48	48	43	43	12	0
3	117	67	56	55	57	17	37
<i>n</i>	3	3	3	3	3	3	3
<i>x</i>	103,66	52,66	48,33	45,66	48	13	42,66
<i>S</i>	11,9	12,66	7,5	8,32	7,8	3,6	5,5
<i>G</i> ₃	1,117	1,131	1,02	1,12	1,152	1,109	0,968

данных на наличие грубых погрешностей, для этого воспользуемся критерием Граббса и рассчитаем его в соответствии с ГОСТ Р 8.736–2011⁵. Для каждого измеряемого параметра найдем среднее арифметическое значение \bar{x} , среднее квадратическое отклонение *S* и критерий Граббса *G*₁ по формулам (1–3):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}; \quad (2)$$

$$G_1 = \frac{|x_{\max} - \bar{x}|}{S}, \quad (3)$$

где *x*_{*i*} — это *i*-й результат измерения; *n* — число измерений.

В табл. 4 представлены значения для расчета критерия Граббса.

Если значение критерия Граббса *G*₃ больше критического значения критерия Граббса *G*_{*m*}, то такое измерение исключается как маловероятное. Согласно ГОСТ⁵, для трех измерений *G*_{*m*} = 1,155, что больше полученных значений. Таким образом, все измеренные ранее значения параметров для серии 3 (образец № 1–4) в лаборатории № 2 являются вероятными и не подвергаются исключению.

Согласно данным измерениям, трудногорючую фанеру следует отнести к группе горючести Г2. Однако эти измерения основываются на наличии визуально фиксируемых признаках самостоятель-

ного горения. Визуальные признаки можно отнести к субъективным, индивидуальным, и поэтому данный критерий является одним из наиболее спорных при обсуждении классификации материалов по горючести. Согласно другим классификационным показателям, данный материал также может быть отнесен к группе Г1.

При анализе полученных результатов стоит обратить внимание на данные, предоставленные лабораториями № 2 и 4. В лаборатории № 2 зафиксированы максимальные значения повреждений по длине и по потере в массе образцов, однако температура дымовых газов оказалась на уровне средних значений. В лаборатории № 4, напротив, были зарегистрированы максимальные температуры дымовых газов, но при этом повреждения образцов по длине оказались минимальными.

Таким образом, несмотря на то, что в каждой из лабораторий общая характеристика материала по численным показателям совпадает и соответствует группе горючести Г1, первичный анализ данных, представленных в табл. 2, указывает на отсутствие корреляции между результатами объективного контроля (измерение температуры дымовых газов) и результатами измерений, проводимых вручную. Это подтверждается графическим анализом, выполненным с использованием программного обеспечения Excel, на котором видно, что максимальная величина температуры дымовых газов не всегда соответствует максимальным значениям повреждений образцов (рис. 2). Статистический анализ в программе Excel основывается на вычислении коэффициента детерминации *R*² (*R*-квадрат), который, в свою очередь, основывается на коэффициенте корреляции Пирсона *R*. Статистический инструмент *R*, который определяет силу и направление линейной

⁵ ГОСТ Р 8.736–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.

связи между двумя непрерывными переменными x и y , определяется по формуле (4) [28]:

$$R(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (4)$$

где x и y — две сравниваемые переменные;
 n — количество точек данных.

Значение R варьируется от «-1», означающего отрицательную корреляцию, до «1» — идеальная корреляция. В теории вероятности достоверность определенного события также обозначается «1», а вероятность невозможного события равна «0» [29].

Коэффициент детерминации для пары «Температура дымовых газов – Длина повреждений», согласно расчетам Excel, не превышает 0,1136 (рис. 2). Коэффициент корреляции составляет $R = 0,337$, что говорит о крайне низкой корреляции.

Аналогично рассчитан коэффициент детерминации для пары «Температура дымовых газов – Потеря массы» (рис. 3), он не превышает 0,0032. Коэффициент корреляции составляет $R = 0,0056$, что говорит об отсутствии корреляции.

По результатам проведенных исследований не коррелируются также данные в паре «Длина повреждения – Потеря массы» (рис. 4). Согласно расчетам Excel, коэффициент детерминации не превышает 0,7006. Коэффициент корреляции составляет $R = 0,49$.

Использование труднгорючей фанеры в качестве стандартного образца при испытаниях по Методу П³ обладает значительным преимуществом: высокой предсказуемостью реакции материала на воздействие пламени. Соответственно, анализ визуальных характеристик обугленных образцов труднгорючей фанеры, таких как глубина обугливания, характер и расположение трещин, образование деформаций, позволяет идентифицировать особенности работы конкретной

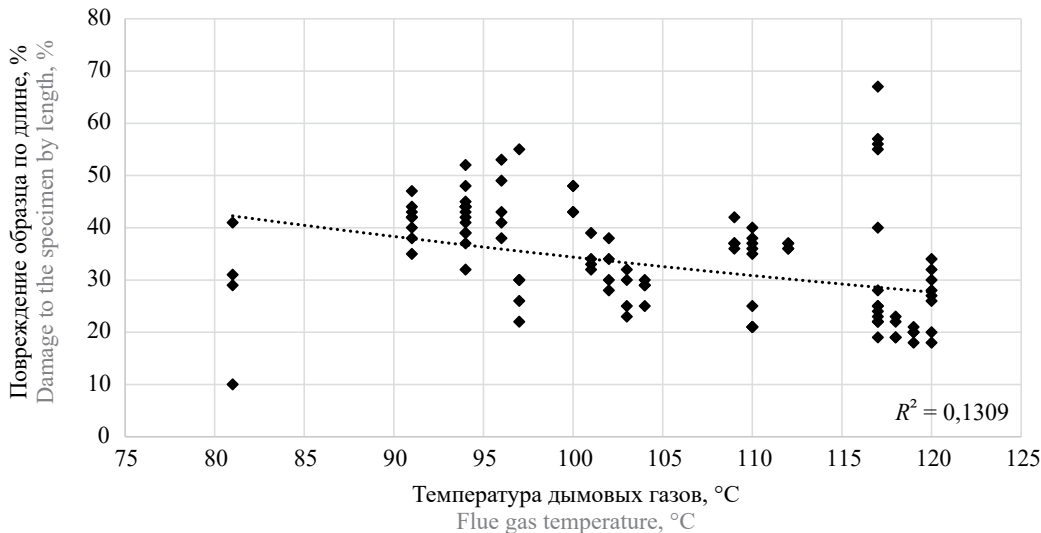


Рис. 2. Результаты сопоставления зависимостей повреждения образцов по длине от температуры дымовых газов
Fig. 2. The results of comparing the dependences of specimen damage in length on flue gas temperature

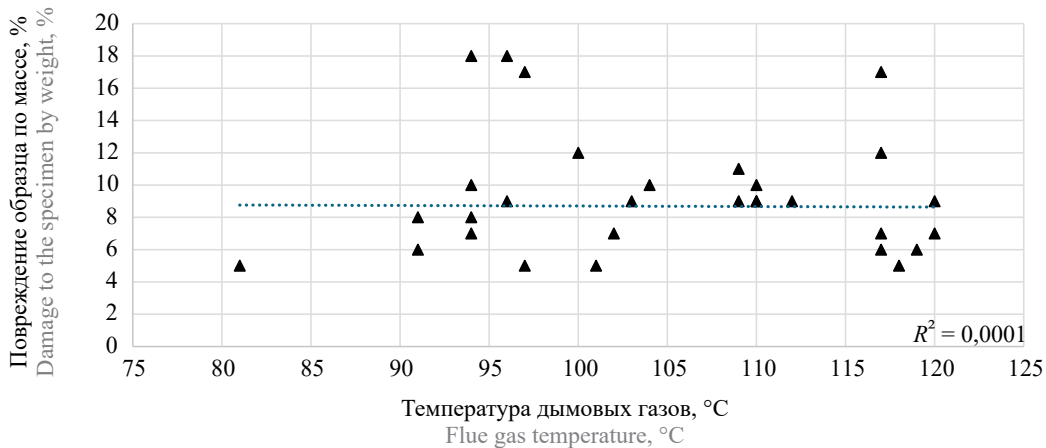


Рис. 3. Результаты сопоставления зависимостей повреждения образцов по массе от температуры дымовых газов
Fig. 3. The results of comparing the dependences of damage to specimens by weight on the temperature of flue gases

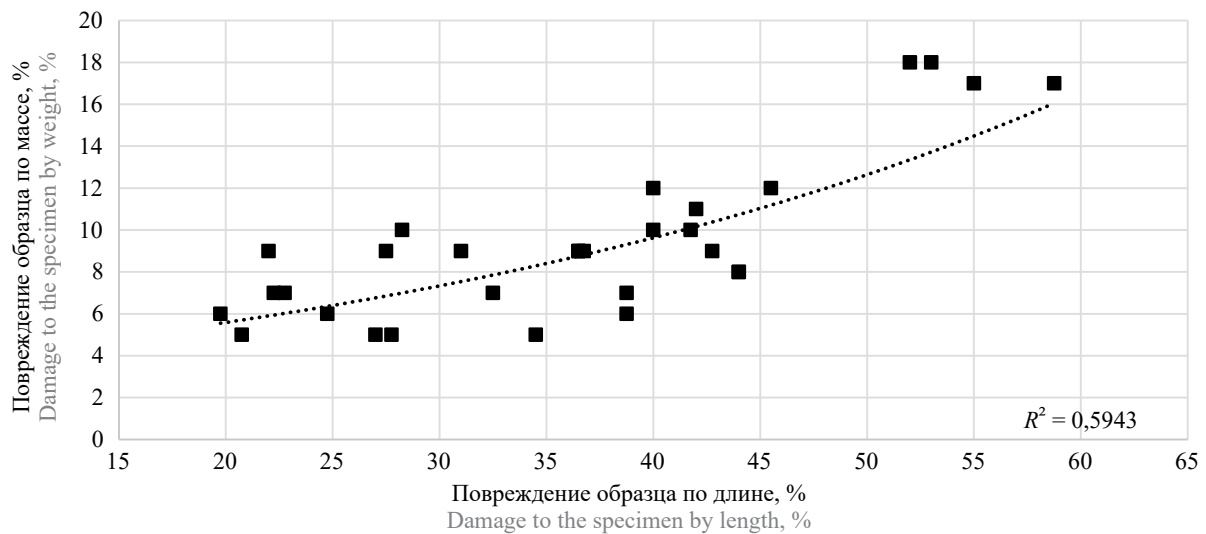


Рис. 4. Результат сопоставления данных лабораторий по повреждениям образцов
Fig. 4. The result of comparing laboratory data on specimen damage

установки и сравнивать результаты испытаний, проводимых в разных лабораториях. Наличие таких «отпечатков» демонстрируют фотографии образцов (рис. 5), позволяющие визуально сравнить результаты испытаний, проведенных в различных лабораториях.

Однако парадоксальным является тот факт, что даже при использовании одной и той же печи и одинаковых образцов результаты испытаний могут значительно различаться. Анализ результатов испытаний в лаборатории 6, представленный на рис. 6,

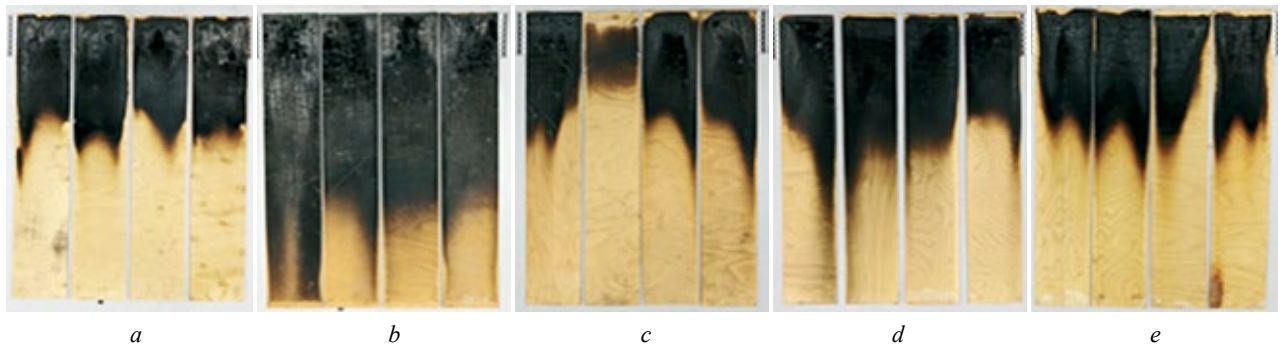


Рис. 5. Результаты испытания трудногорючей фанеры в лабораториях: *a* — № 1; *b* — № 2; *c* — № 3; *d* — № 4; *e* — № 6
Fig. 5. Results of testing of flame-retardant plywood in laboratories: *a* — No. 1; *b* — No. 2; *c* — No. 3; *d* — No. 4; *e* — No. 6

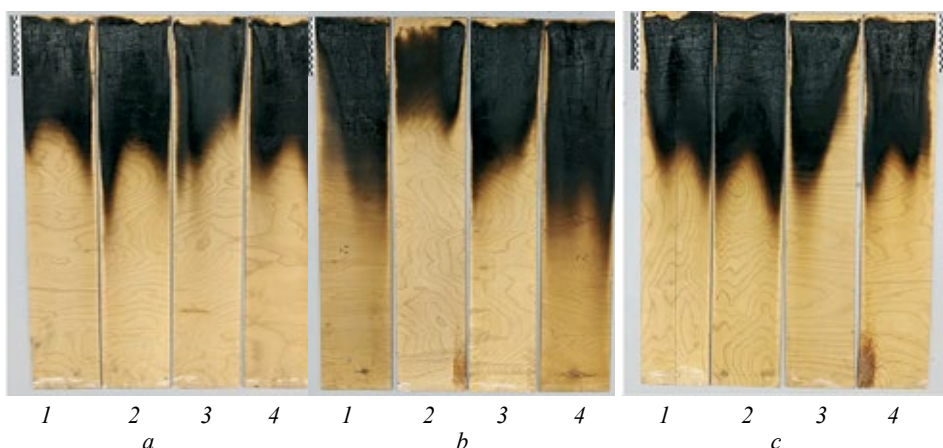


Рис. 6. Результаты испытания трудногорючей фанеры в лаборатории № 6: *a* — серия № 1; *b* — серия № 2; *c* — серия № 3; 1–4 — номера образцов в рамках серии
Fig. 6. Test results of flame-retardant plywood in Laboratory No. 6: *a* — series No. 1; *b* — series No. 2; *c* — series No. 3; 1–4 — specimen numbers within the series

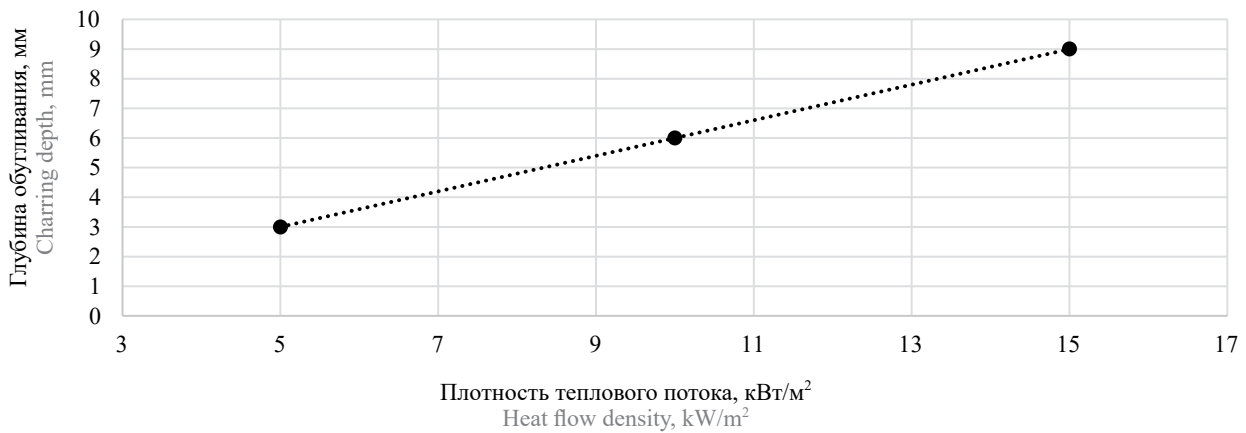


Рис. 7. Зависимость глубины обугливания фанеры от интенсивности падающего теплового потока
Fig. 7. Dependence of the depth of charring of plywood on the intensity of the incident heat flow

демонстрирует значительную изменчивость картины термического воздействия на поверхности образца. Сравнение образцов *a-4* и *c-2* указывает на наличие однотипного раздвоения пламени, что может свидетельствовать об одинаковом их расположении в держателе во время испытания. Тем не менее фронт высокотемпературного воздействия на образец *c-2* оказался значительно выше (приблизительно на 10 см), чем на образце *a-4*. Образец *b-2*, напротив, демонстрирует значительно меньшую степень воздействия пламени по сравнению с другими образцами из этой и других серий. На образцах *b-3* и *c-3* отмечаются выраженные признаки одностороннего сдувания пламени.

Низкая воспроизводимость результатов, наблюдаемая как между разными лабораториями, так и внутри одной лаборатории, подчеркивает сложность стандартизации процесса испытаний по Методу II ГОСТ³. Различия носят системный характер, который связан, как было указано в труде [30], с особенностями работы применяемого испытательного оборудования.

Исследование величины внутренних повреждений образцов также может наглядно характеризовать особенности работы каждой конкретной испытательной печи с точки зрения формируемых тепловых полей. Для более точного определения влияния различных тепловых воздействий на образцы трудногорючей фанеры в рамках исследования, помимо испытаний в шахтной печи, были проведены дополнительные эксперименты на установке ВСМ (соответствующей ГОСТ⁴). Цель заключалась в калибровке результатов, полученных в разных лабораториях, путем стандартизации теплового потока. Образцы фанеры толщиной 10 мм подвергались воздействию стандартизированных тепловых потоков мощностью 5, 10, 15 и 20 кВт/м² в течение 10 мин. Это позволило установить зависимость между интенсивностью теплового потока и степенью повреждения материала, а также сравнить эти резуль-

таты с данными, полученными в шахтной печи, где параметры теплового воздействия оказались менее контролируемыми. Анализ результатов показал, что скорость обугливания древесины фанеры демонстрирует практически линейную зависимость от интенсивности теплового потока (рис. 7). При тепловом потоке выше 15 кВт/м² наблюдались признаки сквозного прогорания образцов, а при потоке более 20 кВт/м² — сплошное сквозное обугливание.

Разница в интенсивности тепловых потоков, генерируемых различными испытательными установками, может быть определена как прямыми измерениями глубины обугливания, так и визуальным осмотром. Визуальный осмотр обратной стороны образцов (рис. 8) выявил существенные различия в характере повреждений. Неоднородность нагрева и обугливания указывает на несоответствие условий испытаний в различных лабораториях, несмотря на использование, казалось бы, одинаковой методики.

Например, в лабораториях № 2, 4 и 8 наблюдались признаки локального прогрева на обратной стороне образцов, что свидетельствует о неравномерном распределении теплового потока в этих установках. При этом на лицевой стороне образца в лаборатории № 2 наблюдался один из самых высоких уровней повреждения (табл. 2, рис. 5). Повреждения на тыльной стороне были ограничены относительно небольшой площадью, и глубина поражения в зоне прямого воздействия не превышала 7–8 мм при общей толщине образцов 10 мм. Лаборатории № 5, 7 и 10 продемонстрировали совершенно другие результаты: сквозное прогорание образцов на значительной площади. В лабораториях № 7 и 10 помимо сквозного прогорания наблюдались следы обтекания образцов пламенем. Признаки обугливания по краям подтверждают данный факт.

Особого внимания заслуживает влияние типа держателя образца, наиболее ярко проявившееся

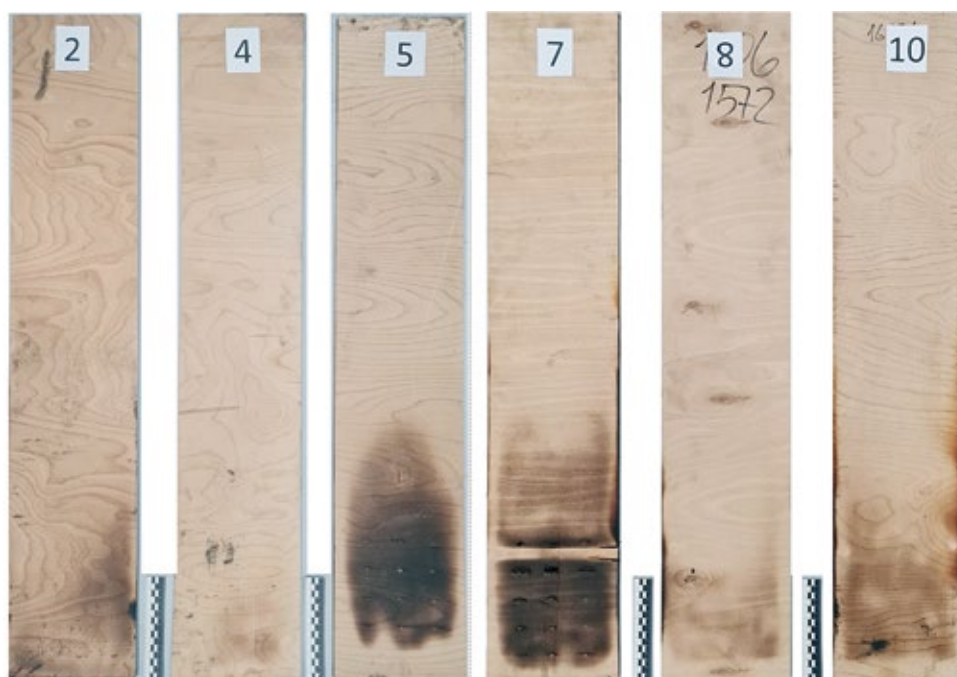


Рис. 8. Тыльная сторона образцов после испытания в разных лабораториях (номера лабораторий представлены номерками на образцах)

Fig. 8. The back of the specimens after testing in different laboratories (laboratory numbers are represented by the numbers on the specimens)

в результатах лаборатории № 7. На высоте 17–18 см от нижнего края образца отчетливо видна граница зоны, не подвергшейся сквозному обугливанню. Эта зона совпадает с местом контакта образца с прижимной планкой держателя. Планка обеспечила эффективный отвод тепла, предотвратив глубокое прогорание в этом участке. Аналогичный, хотя и менее выраженный эффект наблюдался в лаборатории № 10, где использовались печь и держатели аналогичной конструкции. Однако существенные различия в конечном результате указывают на то, что режимы испытаний в этих лабораториях существенно отличались. Разброс результатов измерений повреждений по длине и массе образцов объясняется различиями в характере повреждений: от поверхностных в одних лабораториях до сквозных в других. Это подтверждают выводы ранее проведенных исследований [30], указывающих на низкую стандартизацию требований к системам испытаний, используемым в различных лабораториях. В частности, отмечалось, что работа установки «шахтная печь» характеризуется низкой стандартизацией требований к системам подачи воздуха, а также к системам сжигания газового топлива, что в совокупности ведет к формированию неоднородных воздушных потоков и тепловых полей воздействия на образцы. В практике это как раз приводит к тем результатам, что описаны выше, а именно к низкой однородности тепловых условий воздействия на образцы и, соответственно, к высокому разбросу результатов измерений темпе-

ратур дымовых газов в процессе испытаний, а также к широкой дифференциации формируемых в результате испытаний повреждений образца по поверхности и в объеме (массе).

Обсуждение

При проведении испытаний одного и того же материала в различных лабораториях результаты могут значительно различаться. Это явление, как показано выше, является довольно распространенным и может быть связано с рядом контролируемых параметров, которые, в свою очередь, могут варьироваться в два и более раза между разными лабораториями. Например, в табл. 2 представлены результаты, которые показывают, что длина повреждений, фиксируемая в разных лабораториях, может различаться в среднем от 22 до 53 %, что составляет разницу в 2,4 раза. Аналогичны различия в потере массы, где значения колеблются от 6 до 18 %, что также указывает на трехкратное расхождение. Согласно табл. 3, средние значения температур дымовых газов, полученных в ходе испытаний, варьируются в диапазоне от 89 до 119 °С, что также указывает на заметную разницу в 1,3 раза. Абсолютные температуры могут колебаться от 81 до 120 °С. Примечательно, что минимальные зафиксированные температуры даже оказались ниже минимальных калибровочных значений установки, которые указаны в табл. 5.

Таблица 5. Температурные критерии работы шахтной печи при калибровке по ГОСТ 30244³**Table 5.** Temperature criteria of the shaft furnace operation during calibration according to GOST 30244³

Расстояние от нижней кромки калибровочного образца, мм Distance from the bottom edges of the calibration specimen, mm	Температура, °С Temperature, °С	
	Максимальная Maximum	Минимальная Minimum
300	350	220
500	220	150
1000	140	100
1600*	105	90

* Точка фиксации температуры дымовых газов.

* Flue gas temperature fixation point.

Однако этот факт не следует расценивать как доказательство несоответствия применяемой лабораторией установки требованиям стандарта или калибровки. Причины снижения температуры могут быть многообразными и включают различия в теплофизических характеристиках и отражающих способностях как испытуемого образца, так и калибровочного. Кроме того, следует учитывать особенности поведения антипирированной древесины [31].

Важно отметить, что внимательное изучение критериев калибровки испытательной печи позволяет с высокой степенью уверенности выявить причины, по которым наблюдается значительный разброс результатов по повреждению образцов по длине. Одним из ключевых аспектов, который стоит рассмотреть, является процесс обугливания древесины. Этот процесс интенсивно протекает в диапазоне температур от 250 до 300 °С, что соответствует минимальному калибровочному значению температур для отметки 300 мм от нижней кромки калибровочного образца и верхнему значению температуры для отметки 500 мм. Анализ границ повреждений на образцах, подвергшихся испытанию на определение группы горючести, позволяет однозначно определить температурные интервалы калибровки испытательной установки. Это особенно актуально при работе с антипирированной древесиной, для которой характерно существенное снижение температуры обугливания по сравнению с необработанной древе-

**Рис. 9.** Внешний вид повреждений образца *b-4***Fig. 9.** The appearance of damage to specimen *b-4*

синой [31]. Этот феномен лежит в основе огнезащитного действия большинства пропиточных составов.

Первичная деструкция древесины, проявляющаяся в ее потемнении, начинается в температурном диапазоне от 120 до 190 °С. Эта температура может попадать в диапазон калибровочных температур на высоте 1000 мм в испытательной камере, что может быть интерпретировано как «повреждение» и объяснять смещение границы фиксируемых повреждений. Наличие выраженного градиента повреждений на образцах, например *b-1* и *b-4* (рис. 6, 9), подтверждает этот эффект.

Учитывая указанные температурные интервалы, можно предположить, что для корбонизирующихся материалов, сходных по термостойкости с антипирированной древесиной, длина повреждений должна находиться в диапазоне от 300 до 500 мм (30 и 50 % от общей длины образца соответственно). Эти диапазоны хорошо согласуются со статистической обработкой данных (рис. 10), где средняя длина повреждений составляет около 350 мм (35 %), а допустимая погрешность измерений — 90 мм (25 %). Результаты, выходящие за эти пределы, могут быть объяснены общей теорией возникновения ошибок измерений, включая неоднозначность критериев интерпретации характера повреждений.

Это означает, что, в общем случае, (нормальные) результаты испытаний в двух разных лабораториях могут находиться в диапазоне от 260 до 440 мм, отличаясь более чем на 50 %, что не может считаться допустимым с точки зрения метрологии.

Для горючих материалов, в том числе антипирированных, такой разброс может быть критичным, поскольку указанному диапазону температур соответствуют энергии активации большинства органических веществ и соединений. В результате в разных лабораториях один и тот же материал может проявлять разные свойства: в одной лаборатории он может быть классифицирован как материал группы Г1, в другой — как Г2.

Разработчики и производители материалов часто оказываются в сложной ситуации, находясь между двумя крайностями. С одной стороны, материалы, не содержащие антипиренов, обладают более высокой энергией активации, что делает их более термически стойкими [32]. Однако, несмотря на это, продукты разложения таких материалов могут иметь высокую способность к самостоятельному горению. Это означает, что даже при низких температурах и в условиях, когда испытательная установка работает на нижней границе калибровки, горение может распространяться по поверхности образца. С другой стороны, введение антипиренов в состав древесины, древесных композитов и других полимерных материалов, как уже упоминалось, часто приводит

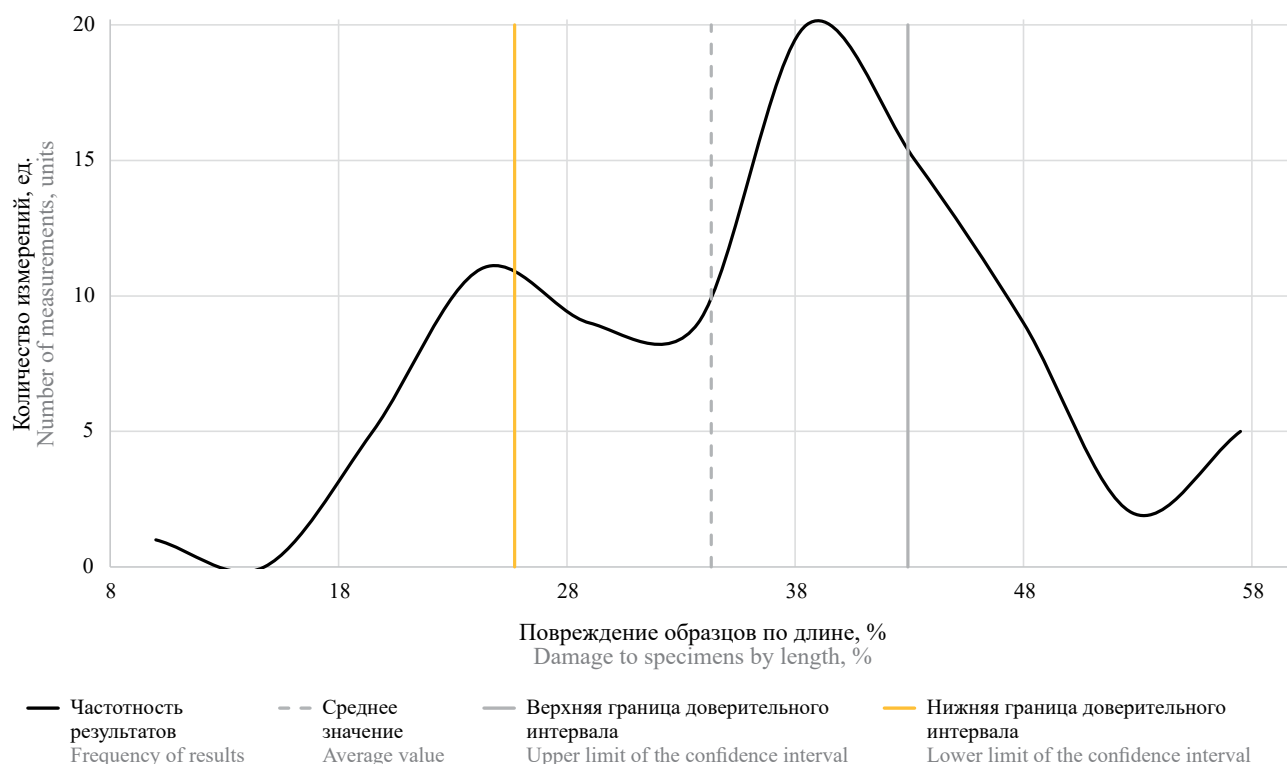


Рис. 10. Распределение частотности результатов измерений повреждений образцов по длине

Fig. 10. Distribution of the frequency of measurement results of damage to specimens by length

к снижению энергии активации, т.е. термической стойкости. Тем не менее это также способствует увеличению выхода негорючих и ингибирующих горение газов [31, 32]. Это может, потенциально, вести к существенному снижению фиксируемых температур дымовых газов, особенно когда испытательная установка работает вблизи минимальных калибровочных значений

Испытания материалов при настройках установки, близких к верхней границе допустимых значений калибровки, могут привести к критическим повреждениям образца. Повышенное содержание некоторых антипиренов может приводить к снижению прочности, ухудшению гибкости, изменению цвета или появлению хрупкости. Более того, продукты термического разложения многих антипиренов обладают токсичностью, что требует тщательного анализа и подбора безопасных композиций [33]. Подбор же оптимальных концентраций огнезащитных соединений в составе материала оказывается затруднительным [34], если не невозможным, в силу низкой метрологической воспроизводимости измерений, осуществляемых с использованием Метода П по ГОСТ³.

Выводы

Существующая методика определения группы горючести несовершенна. Предлагаемые изменения в ГОСТ³, такие как стандартизация типа используе-

мого газа, конструкции держателей образцов, улучшение системы подачи воздуха для предотвращения хаотичных потоков в шахтной печи и введение строгих правил калибровки, включая калибровку по калибровочному стальному листу, могут улучшить точность измерений.

Однако эти меры не решают главной проблемы: отсутствие ясной взаимосвязи между физико-химическими процессами горения, контролируемые параметрами и параметрами, которые могли бы использоваться в прогнозировании поведения материалов при пожаре (параметрическом нормировании). В частности, показатель «повреждения» материала сам по себе не информативен. Необходимо одновременно оценивать тепловыделение, скорость распространения пламени, параметры плотности образующегося дыма и другие параметры, объективно характеризующие степень участия материала в развитии пожароопасных процессов.

Современные показатели горючести материалов и классы пожарной опасности строительных конструкций, используемые в нормативной базе в существующем виде, не отражают фактической опасности или, правильнее говорить, особенностей поведения материалов в процессе пожаров и не могут использоваться для целей противопожарного нормирования или целей прогнозирования особенностей развития пожара.

Одним из первоочередных шагов по преодолению существующих проблем может стать разработка единого классификационного стандарта, основанного на комплексной оценке этих параметров, в том числе с применением альтернативных современных мето-

дов аналитического исследования веществ и материалов, прошедших многолетнюю проверку. Результатом, в итоге, должно стать повышение точности прогнозирования развития пожаров и разработка более эффективных мер противопожарной защиты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Gu X., Ling Y.* Research progress of aerogel materials in the field of construction // Alexandria Engineering Journal. 2024. No. 91. Pp. 620–631. DOI: 10.1016/J.AEJ.2024.02.039
2. *Васильева И.Л., Немова Д.В.* Перспективы применения аэрогелей в строительстве // AlfaBuild. 2018. № 4 (6). С. 135–145. DOI: 10.34910/ALF.6.12. EDN LLVFPF.
3. *Baetens R., Jelle B.P., Gustavsen A.* Aerogel insulation for building applications : a state-of-the-art review // Energy and Buildings. 2011. No. 4 (43). Pp. 761–769. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.12.012
4. *Jin R.* Research and application of graphene in construction // IET Conference Proceedings. 2024. No. 19. Pp. 638–641. DOI: 10.1049/ICP.2024.4057
5. *Хворова Н.М.* Строительные материалы будущего: графен // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 43 (1–2). С. 124–125. DOI: 10.18454/IRJ.2016.43.052. EDN VJUMOX.
6. *Deng S., Fan J., Yi B., Ye J., Li G.* Effect of industrial multi-walled carbon nanotubes on the mechanical properties and microstructure of ultra-high performance concrete // Cement and Concrete Composites. 2025. No. 156. P. 105850. DOI: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2024.105850
7. *Motta E.F.B., de Carvalho A.R., Barra J.G.D., Maciel I.O., de Oliveira T.M.* Thermomechanical behavior of concretes with addition of non-functionalized and functionalized carbon nanotubes // Journal of Building Engineering. 2024. No. 96. P. 110642. DOI: 10.1016/J.JOBE.2024.110642
8. *Lesovik V., Fediuk R., Amran M., Vatin N., Timokhin R.* Self-healing construction materials: The geomimetic approach // Sustainability. 2021. No. 16 (13). P. 9033. DOI: 10.3390/SU13169033
9. *Vafaeva K.M., Vatin N.I., Kordas G.* Self-healing building materials: The future of construction // AlfaBuild. 2023. No. 4 (29). Pp. 2912–2912. DOI: 10.57728/ALF.29.12
10. *Kotov E.V., Nemova D., Sergeev V., Dontsova A., Koriakovtseva T., Andreeva D.* Thermal Performance Assessment of Aerogel Application in Additive Construction of Energy-Efficient Buildings // Sustainability. 2024. No. 16 (6). P. 2398. DOI: 10.3390/SU16062398
11. *Chen Z., Zhang W., Huang R., Dong Z., Chen C., Jiang L. et al.* 3D model-based terrestrial laser scanning (TLS) observation network planning for large-scale building facades // Automation in Construction. 2022. No. 144. P. 104594. DOI: 10.1016/J.AUTCON.2022.104594
12. *Kim M., Kim H.* Optimal Pre-processing of Laser Scanning Data for Indoor Scene Analysis and 3D Reconstruction of Building Models // KSCE Journal of Civil Engineering. 2024. No. 1 (28). Pp. 1–14. DOI: 10.1007/S12205-023-2406-9
13. *Kotlyarskaya I.L., Vatin N.I., Nemova D.V.* Thermal Characteristics of a Modular Additive Enclosing Structure // Lecture Notes in Civil Engineering. 2024. No. 335. Pp. 33–42. DOI: 10.1007/978-3-031-30570-2_4
14. *Kotlyarskaya I., Iakovlev N., Vatin N., Nemova D.* Modular energy-efficient enclosing structures with the aerogel thermal insulation : a review // AlfaBuild. 2022. No. 4 (24). P. 2402. DOI: 10.57728/ALF.24.2. EDN OPZZNR.
15. *Musarat M.A., Alaloul W.S., Rostam N.A.Q.A., Khan A.M.* Substitution of workforce with robotics in the construction industry: A wise or witless approach // Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity. 2024. No. 4 (10). P. 100420. DOI: 10.1016/J.JOITMC.2024.100420
16. *You K., Zhou C., Ding L., Wang Y.* Construction Robotics in Extreme Environments: From Earth to Space // Engineering. 2025. DOI: 10.1016/J.ENG.2024.11.037
17. *Zhao C., Chen J.-Y., Sun T., Fan W., Sun X.-Y., Shao Y. et al.* Robotic motion planning for autonomous in-situ construction of building structures // Automation in Construction. 2025. No. 171. P. 105993. DOI: 10.1016/J.AUTCON.2025.105993
18. *Прядко И.П.* Тенденции современной зеленой архитектуры: мировой и российский опыт // Экономика и предпринимательство. 2023. № 11 (160). С. 1016–1024. DOI: 10.34925/EIP.2023.160.11.193. EDN MMJMUZ.
19. *Priyanshu P., Anugya S.* Embracing Sustainable Living : Modern Trend in Architecture // IJFMR — International Journal For Multidisciplinary Research. 2024. No. 2 (6). Pp. 1–6. DOI: 10.36948/IJFMR.2024.V06I02.16403
20. *Kostina E.K., Dudchenko M.Y., Myronenko O.V.* Modern trends in architecture. Green architecture as a form of efficient architecture energy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. No. 3 (698). P. 033048. DOI: 10.1088/1757-899X/698/3/033048. EDN PZSJHV.
21. *Patkó C., Adamik P., Pásztor Z.* The Effect of Wooden Building Materials on the Indoor Air Quality of Houses // E3S Web of Conferences. 2024. No. 514. DOI: 10.1051/E3SCONF/202451404003

22. Eom Y.G. Wood and engineering wood as environment — friendly building materials // *Air Cleaning Technology*. 2007. No. 2 (20). Pp. 26–49.
23. Бирюков В.Г., Мишков С.Н., Соболев А.В. Огнезащищенные клееные материалы на основе древесины // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2014. № 3. С. 28–31. EDN SXJPLN.
24. Бирюков В.Г., Мишков С.Н., Соболев А.В. Исследование огнезащитных свойств трудногорючей фанеры, применяемой в конструкции пассажирского вагона // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. 2010. № 1 (1). С. 37–40. EDN LHQAQJ.
25. Трушкин Д.В. Проблемы классификации строительных материалов по пожарной опасности. Ч. 2. Сравнительный анализ экспериментальных методов по оценке пожарной опасности строительных материалов, принятых в России и странах Евросоюза. Определение горючести строительных материалов // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2014. № 4 (23). С. 24–32. EDN SCXYRZ.
26. Гравит М.В., Недрышкин О.В., Вайтццкий А.А., Шпакова А.М., Нугматуллина Д.Г. Пожарно-технические характеристики строительных материалов в Европейских и Российских нормативных документах. Проблемы гармонизации методов исследования и классификации // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2016. № 10 (25). С. 16–29. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.10.16-29. EDN XCNSNZ.
27. Хасанов И.Р., Гравит М.В., Косачев А.А., Пехотиков А.В., Павлов В.В. Гармонизация европейских и российских нормативных документов, устанавливающих общие требования к методам испытаний на огнестойкость строительных конструкций и применению температурных режимов, учитывающих реальные условия пожара // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2014. № 3 (23). С. 49–57. EDN SFOCFF.
28. Zhang Z., Zhou A., Shi Z., Zhang H., He X., Wang Y. et al. Explaining relationships between chemical structure and tar-rich coal pyrolysis products yield based on Pearson correlation coefficient // *Fuel*. 2025. No. 395. P. 135029. DOI: 10.1016/J.FUEL.2025.135029
29. García-Bertrand R., Baringo L., García-Cerezo Á. Introduction to probability theory // *Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering*, 2023. No. 1 (1-3). Pp. 734–746. DOI: 10.1016/B978-0-12-821204-2.00016-7
30. Шмаков А.Г., Коробейничев О.П., Чернов А.А., Полищук Е.Ю., Хохолко В.С., Кирилюк А.В. и др. Совершенствование метрологического обеспечения системы подтверждения соответствия при определении показателя горючести строительных материалов // *Современные пожаробезопасные материалы и технологии : сб. мат. IV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 30-й годовщине МЧС России*. 2020. С. 128–130. EDN DZTBXP.
31. Балакин В.М., Полищук Е.Ю. Азот-фосфорсодержащие антипирены для древесины и древесных композиционных материалов : литературный обзор // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2008. № 2 (17). С. 43–51. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/azot-fosforsoderzhaschie-antipireny-dlya-drevesiny-i-drevesnyh-kompozitsionnyh-materialov-literaturnyy-obzor/viewer>
32. Jiang J., Li J., Hu J., Fan D. Effect of nitrogen phosphorus flame retardants on thermal degradation of wood // *Construction and Building Materials*. 2010. No. 12 (24). Pp. 2633–2637. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.04.064
33. Peck G. The Decomposition of Polyurethane and Fire Retardants : a Review. 2023. DOI: 10.20944/PREPRINTS202311.1646.V1
34. Трушкин Д.В., Корольченко О.Н., Бельцова Т.Г. Горючесть древесины, обработанной огнезащитными составами // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2008. № 1 (17). С. 29–33. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/goryuchest-drevesiny-obrabotannoy-ognezashchitnymi-sostavami/viewer>

REFERENCES

1. Gu X., Ling Y. Research progress of aerogel materials in the field of construction. *Alexandria Engineering Journal*. 2024; 91:620-631. DOI: 10.1016/J.AEJ.2024.02.039
2. Vasileva I.L., Nemova D.V. Prospects of using aerogels in construction. *AlfaBuild*. 2018; 4(6):135-145. DOI: 10.34910/ALF.6.12
3. Baetens R., Jelle B.P., Gustavsen A. Aerogel insulation for building applications : a state-of-the-art review. *Energy and Buildings*. 2011; 4(43):761-769. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.12.012
4. Jin R. Research and application of graphene in construction. *IET Conference Proceedings*. 2024; 19:638-641. DOI: 10.1049/ICP.2024.4057
5. Khvorova N.M. Building materials of the future: graphene. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal/International Research Journal*. 2016; 1(43). DOI: 10.18454/IRJ.2016.43.052. EDN VJUMOX. (rus).
6. Deng S., Fan J., Yi B., Ye J., Li G. Effect of industrial multi-walled carbon nanotubes on the mechanical properties and microstructure of ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2025; 156:105850. DOI: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2024.105850

7. Motta E.F.B., de Carvalho A.R., Barra J.G.D., Maciel I.O., de Oliveira T.M. Thermomechanical behavior of concretes with addition of non-functionalized and functionalized carbon nanotubes. *Journal of Building Engineering*. 2024; 96:110642. DOI: 10.1016/J.JOBE.2024.110642
8. Lesovik V., Fediuk R., Amran M., Vatin N., Timokhin R. Self-healing construction materials: The geomimetic approach. *Sustainability*. 2021; 16(13):9033. DOI: 10.3390/SU13169033
9. Vafaeva Kh.M., Vatin N.I., Kordas G. Self-healing building materials: The future of construction. *AlfaBuild*. 2023; 4(29):2912-2912. DOI: 10.57728/ALF.29.12
10. Kotov E.V., Nemova D., Sergeev V., Dontsova A., Koriakovtseva T., Andreeva D. Thermal Performance Assessment of Aerogel Application in Additive Construction of Energy-Efficient Buildings. *Sustainability*. 2024; 16(6):2398. DOI: 10.3390/SU16062398
11. Chen Z., Zhang W., Huang R., Dong Z., Chen C., Jiang L. et al. 3D model-based terrestrial laser scanning (TLS) observation network planning for large-scale building facades. *Automation in Construction*. 2022; 144:104594. DOI: 10.1016/J.AUTCON.2022.104594
12. Kim M., Kim H. Optimal Pre-processing of Laser Scanning Data for Indoor Scene Analysis and 3D Reconstruction of Building Models. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2024; 1(28):1-14. DOI: 10.1007/S12205-023-2406-9
13. Kotlyarskaya I.L., Vatin N.I., Nemova D.V. Thermal Characteristics of a Modular Additive Enclosing Structure. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024; 335:33-42. DOI: 10.1007/978-3-031-30570-2_4
14. Kotlyarskaya I., Iakovlev N., Vatin N., Nemova D. Modular energy-efficient enclosing structures with the aerogel thermal insulation : a review. *AlfaBuild*. 2022; 4(24):2402. DOI: 10.57728/ALF.24.2
15. Musarat M.A., Alaloul W.S., Rostam N.A.Q.A., Khan A.M. Substitution of workforce with robotics in the construction industry: A wise or witless approach. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 2024; 4(10):100420. DOI: 10.1016/J.JOITMC.2024.100420
16. You K., Zhou C., Ding L., Wang Y. Construction Robotics in Extreme Environments: From Earth to Space. *Engineering*. 2025. DOI: 10.1016/J.ENG.2024.11.037
17. Zhao C., Chen J.Y., Sun T., Fan W., Sun X.Y., Shao Y. et al. Robotic motion planning for autonomous in-situ construction of building structures. *Automation in Construction*. 2025; 171:105993. DOI: 10.1016/J.AUTCON.2025.105993
18. Pryadko I.P. Trends in modern green architecture: global and Russian experience. *Economics and entrepreneurship*. 2023; 11(160):1016-1024. DOI: 10.34925/EIP.2023.160.11.193. EDN MMJMUZ. (rus).
19. Priyanshu P., Anugya S. Embracing Sustainable Living : Modern Trend in Architecture. *IJFMR — International Journal For Multidisciplinary Research*. 2024; 2(6):1-6. DOI: 10.36948/IJFMR.2024.V06I02.16403
20. Kostina E.K., Dudchenko M.Y., Myronenko O.V. Modern trends in architecture. Green architecture as a form of efficient architecture energy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 3(698):033048. DOI: 10.1088/1757-899X/698/3/033048. EDN PZSJHV.
21. Patkó C., Adamik P., Pásztor Z. The Effect of Wooden Building Materials on the Indoor Air Quality of Houses. *E3S Web of Conferences*. 2024; 514. DOI: 10.1051/E3SCONF/202451404003
22. Eom Y.G. Wood and engineering wood as environment — friendly building materials. *Air Cleaning Technology*. 2007; 2(20):26-49.
23. Biryukov V.G., Mishkov S.N., Sobolev A.V. Fire-proof adhesive-bonded wood-based materials. *Fires and emergencies: prevention, elimination*. 2014; 3:28-30. EDN SXJPLN. (rus).
24. Biryukov V.G., Mishkov S.N., Sobolev A.V. Study of fire-protecting properties of hardly-combustible plywood used in structures of passenger cars. *VNIIZHT bulletin (railway research institute bulletin)*. 2010; 1(1):37-40. EDN LHQAQJ. (rus).
25. Trushkin D.V. Problems of classification of construction materials on fire hazard. Part 2. Comparative analysis of experimental methods for fire hazard assessment of construction materials accepted in Russia and the European Union countries. Determination of combustibility for construction materials. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 4(23):24-32. EDN SCXYRZ. (rus).
26. Gravit M.V., Nedryshkin O.V., Vaytitskiy A.A., Shpakova A.M., Nigmatullina D.G. Fire technical characteristics of building materials in the European and Russian regulatory documents. Problems of harmonization of research methods and classification. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 10(25):16-29. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.10.16-29. EDN XCNSNZ. (rus).
27. Khasanov I.R., Gravit M.V., Kosachev A.A., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V. Harmonization of European and Russian regulatory documents establishing general requirements for fire resistance testing methods for building structures and the use of temperature curves that take into account real fire conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 3(23):49-57. EDN SFOCFF. (rus).
28. Zhang Z., Zhou A., Shi Z., Zhang H., He X., Wang Y. et al. Explaining relationships between chemical structure and tar-rich coal pyrolysis products yield based on Pearson correlation coefficient. *Fuel*. 2025; 395:135029. DOI: 10.1016/J.FUEL.2025.135029

29. García-Bertrand R., Baringo L., García-Cerezo Á. Introduction to probability theory. *Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering*. 2023; 1(1-3):734-746. DOI: 10.1016/B978-0-12-821204-2.00016-7
30. Shmakov A.G., Korobeynichev O.P., Chernov A.A., Polishchuk E.Yu., Hoholko V.S., Kirilyuk A.V. et al. Improvement the metrological support of the conformity assessment system for determining the combustibility index of building materials. *Modern fireproof materials and technologies : collection of materials of the IV International Scientific and practical conference dedicated to the 30th anniversary of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2020; 128-130. EDN DZTBXP. (rus).
31. Balakin V.M., Polishchuk E.Y. Nitrogen-phosphorus flame retardants for wood and wood composite materials : literature review. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2008; 2(17):43-51. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/azot-fosforsoderzhaschie-antipireny-dlya-drevesiny-i-drevesnyh-kompozitsionnyh-materialov-literaturnyy-obzor/viewer> (rus).
32. Jiang J., Li J., Hu J., Fan D. Effect of nitrogen phosphorus flame retardants on thermal degradation of wood. *Construction and Building Materials*. 2010; 12(24):2633-2637. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.04.064
33. Peck G. The Decomposition of Polyurethane and Fire Retardants : a Review. *Preprints*. 2023. DOI: 10.20944/PREPRINTS202311.1646.V1
34. Trushkin D.V., Korolchenko O.N., Beltsova T.G. Flammability of wood treated with flame retardants. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2008; 1(17):29-33. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/goryuchest-drevesiny-obrabotannoy-ognezaschitnymi-sostavami/viewer> (rus).

Поступила 07.04.2025, после доработки 30.06.2025;

принята к публикации 10.07.2025

Received April 07, 2025; Received in revised form June 30, 2025;

Accepted July 10, 2025

Информация об авторах

ПОЛИЩУК Евгений Юрьевич, к.т.н., руководитель направления «Пожарная безопасность строительных материалов и конструкций», СБЕ ПМИПИР ГК ТехноНИКОЛЬ, Россия, 129110, г. Москва, ул. Гиляровского, 47, стр. 5; ORCID: 0000-0001-9412-823X; ResearcherID: R-6837-2016; e-mail: polishchuk@tn.ru

КРУГЛОВ Евгений Юрьевич, к.т.н., старший научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0000-0003-3684-5083; e-mail: 89268196698@mail.ru

КУДРЯШОВ Вадим Александрович, к.т.н., ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательское республиканское унитарное предприятие по строительству «Институт БелНИИС», Республика Беларусь, 220076, г. Минск, ул. Скорины, 15 «Б»; ORCID: 0000-0003-4889-1060; e-mail: vadmud@gmail.com

ШОЯ Владислав Сергеевич, руководитель лаборатории пожарных испытаний, СБЕ ПМИПИР ГК ТехноНИКОЛЬ, Россия, 390047, г. Рязань, район Восточный Промузел, 21, пом. 6Н; ORCID: 0009-0008-5455-5278; e-mail: iravassilek@mail.ru

ГРАВИТ Марина Викторовна, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории механики многокомпонентных и многофазных сред, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251,

Information about the authors

Evgeny Yu. POLISHCHUK, Cand. Sci. (Eng.), Head of the department “Fire Safety of building materials and structures”, SBE PMiPIR TechnoNICOL Group, Gelyarovskogo St., 5, Moscow, 129110, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9412-823X; ResearcherID: R-6837-2016; e-mail: polishchuk@tn.ru

Evgeny Yu. KRUGLOV, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-3684-5083; e-mail: 89268196698@mail.ru

Vadim A. Kudryashov, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Research and Development Republican Unitary Enterprise for Construction BelNIIS Institute, Skaryna St., 15 “B”, Minsk, 220076, Republic of Belarus; ORCID: 0000-0003-4889-1060; e-mail: vadmud@gmail.com

Vladislav S. SHOYA, Head of the Fire Testing Laboratory, SBE PMiPIR TechnoNICOL Group, Vostochniy promuzel distr., 21, room 6H, Ryazan’, 390027, Russian Federation; ORCID: 0009-0008-5455-5278; e-mail: iravassilek@mail.ru

Marina V. GRAVIT, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Lead scientific co-workers Laboratory of Mechanics of Multicomponent and Multiphase Media, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politekhnikeskaya St., 29, letter B, St. Petersburg,

г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д. 29, литера Б; ORCID: 0000-0003-1071-427X; ResearcherID: B-4397-2014; AuthorID: 56826013600; e-mail: marina.gravit@mail.ru

КОТЛЯРСКАЯ Ирина Леонидовна, младший научный сотрудник лаборатории защищенных и модульных сооружений, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д. 29, литера Б; ORCID: 0000-0002-8396-4870; ResearcherID: ABE-1858-2021; AuthorID: 57208300172; e-mail: iravassilek@mail.ru

Вклад авторов:

Полищук Е.Ю. — концепция исследования; научное редактирование текста.

Круглов Е.Ю. — сбор материала.

Кудряшов В.А. — обработка материала.

Шоя В.С. — экспериментальные исследования.

Гравит М.В. — научное руководство.

Котлярская И.Л. — составление литературного обзора; редактирование текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

inner territory of the city, Municipal District Akademicheskaya, 195251, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1071-427X; ResearcherID: B-4397-2014; AuthorID: 56826013600; e-mail: marina.gravit@mail.ru

Irina L. KOTLYARSKAYA, Jr. scientific co-workers Laboratory of Secure and Modular Structures, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politekhnicheskaya St., 29, letter B, St. Petersburg, inner territory of the city, Municipal District Akademicheskaya, 195251, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8396-4870; ResearcherID: ABE-1858-2021; AuthorID: 57208300172; e-mail: iravassilek@mail.ru

Contribution of the authors:

Polishchuk E.Yu. — *research concept; scientific text editing.*

Kruglov E.Yu. — *collection of material.*

Kudryashov V.A. — *processing of material.*

Shoya V.S. — *experimental research.*

Gravit M.V. — *scientific guidance.*

Kotlyarskaya I.L. — *compilation of a literary review; editing the text of an article.*

The authors declare no conflicts of interests.