

УДК 614.841.411

DOI 10.48612/ntp/kbnb-g16r-tv42

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ОГНЕЗАЩИТНЫХ СОСТАВОВ НА ДРЕВЕСИНЕ: РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ, ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ И ИСПЫТАНИЯ ПОКРЫТИЙ

Е. А. СИПЛАТОВ

ФГБУ ВНИИПО МЧС России
Российская Федерация, г. Балашиха
E-mail: siplatov82@mail.ru

Статья посвящена разработке методики и экспериментальной установки для определения теплоизолирующих свойств огнезащитных составов для древесины. Оценено влияние количества последовательно формируемых слоёв на кинетику прогрева поверхностной области древесного композита. Исследованы теплоизолирующие свойства огнезащитных покрытий различной толщины в условиях стационарного теплового воздействия. Полученные результаты с применением разработанной экспериментальной установки могут быть востребованы при создании огнезащитных композиций как на основе силикатных систем, так и альтернативных типов покрытий.

Ключевые слова: жидкое стекло, тепловое воздействие, эффективная теплопроводность, огнезащитное покрытие.

INVESTIGATION OF HEAT-INSULATING PROPERTIES OF FIRE-RETARDANT COATINGS ON WOOD: SETUP DEVELOPMENT, UNCERTAINTY ASSESSMENT, AND COATING TESTING

E. A. SIPLATOV

«Federal State-Financed Establishment All-Russian Research Institute
for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies
and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Balashikha
E-mail: siplatov82@mail.ru

The article is devoted to the development of a methodology and experimental setup for determining the heat-insulating properties of flame retardants for wood. The influence of the number of successively formed layers on the kinetics of heating of the surface area of the wood composite is estimated. The heat-insulating properties of flame-retardant coatings of various thicknesses under conditions of stationary thermal exposure have been studied. The results obtained using the developed experimental setup may be in demand when creating flame-retardant compositions based on both silicate systems and alternative types of coatings.

Keywords: liquid glass, thermal effect, effective thermal conductivity, flame retardant coating.

Введение

Древесина и материалы на её основе широко применяются в строительстве, отделке и производстве конструкций благодаря доступности, технологичности и эксплуатационным свойствам. Однако низкая огнестойкость древесины требует использования эффективных огнезащитных составов. В настоящее время известно большое количество огнезащитных составов для древесины, которые позволяют снизить показатели пожарной опасности (например, горючесть, воспламеняемость и др.).

Собственно эффективность огнезащитного действия защитных составов определяется по стандартному методу¹. Согласно данному стандарту эффективность огнезащитных составов определяется по значению изменения массы образца, обработанного огнезащитным составом, в результате воздействия пламени горелки. При этом пламя воздействует на нижний край образца, обеспечивая наиболее жесткие условия проведения испытаний.

Недостатком стандартных методик испытаний является то обстоятельство, что они

© Сиплатов Е. А., 2026

¹ ГОСТ Р 53292-2009 «Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на её основе. Общие требования. Методы испытаний».

не учитывают способность огнезащитных составов препятствовать термической деструкции древесины.

В отличие от натуральных (крупномасштабных) экспериментов, которые характеризуются высокими материальными затратами, необходимостью использования крупногабаритных образцов и длительной подготовкой, лабораторные методы, напротив, являются более экономичными и обладают возможностью воспроизведения условий испытаний, что обеспечивает повторяемость и сходимостью результатов. Однако при интерпретации полученных данных опускается количественная оценка неопределённости измерений воздействующих факторов (плотности теплового потока, температурных режимов), что напрямую снижает достоверность сравнения различных огнезащитных составов между собой.

В связи с этим целью данной работы явилась разработка лабораторной установки и методики испытаний для количественной оценки теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий по древесине, обеспечивающие достоверность и повторяемость результатов.

Предлагаемый подход позволяет проводить сравнительный анализ теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий, контролировать качество составов на этапе производства и эксплуатации, а также оптимизировать разработку новых огнезащитных составов при снижении материальных и временных затрат. Полученные результаты могут служить основой для планирования крупномасштабных огневых испытаний.

Подготовка образцов

Эксперименты проводили на образцах берёзовой фанеры толщиной $(3,0 \pm 0,1)$ мм и диаметром $(65,0 \pm 0,1)$ мм. На подготовленные образцы наносили огнезащитные составы и покрытия. В качестве огнезащитных составов использовали интумесцентный состав на основе ПВА-дисперсии, огнезащитный состав, огнезащитных покрытий – отвердевшую пену на основе жидкого стекла толщиной 10 и 15 мм. Образцы высушивали в течение не менее 48 ч, после чего подвергали термическому воздействию. Толщину образца и нанесённого слоя измеряли штангенциркулем с ценой деления 0,1 мм, массу образца после нанесения покрытия определяли на лабораторных аналитических весах с ценой деления 1 мг.

Экспериментальная часть

Сущность предлагаемого подхода состоит в следующем: в процессе теплового воздействия регистрируют время, по истечении которого температура на стороне образца,

удалённой от источника нагрева, достигает критического значения.

Исследование теплового воздействия на образцы с покрытиями проводили на разработанной экспериментальной установке (рис. 1). В её состав входят следующие основные узлы: нагревательная печь с наружным кожухом, устройство регулирования температуры, узел фиксации исследуемого образца, измеритель-регулятор для регистрации температуры и плотности тепловых потоков, термоэлектрические преобразователи.

Нагревательная камера (см. рис. 1) служит для создания теплового воздействия на образец в соответствии с требуемым температурным режимом. Конструктивно она выполнена в виде металлического короба, закреплённого на опорной раме. Внутреннее пространство камеры имеет цилиндрическую форму с диаметром 120 ± 5 мм и глубиной 150 ± 5 мм. Источником нагрева служат трубчатые электронагреватели (ТЭНы). Контроль за режимом их работы ведётся с помощью термоэлектрических преобразователей.

Контроль температуры внутри печи в процессе нагрева осуществляется термопарой, которая монтируется в центре держателя образца на удалении (10 ± 1) мм от его поверхности. Для отвода газообразных продуктов, образующихся при нагреве, в тыльной части печи выполнено вентиляционное отверстие.

Блок управления нагревом обеспечивает возможность программирования режима испытаний. Узел крепления образца выполняет несколько функций: фиксацию испытываемого материала, его размещение внутри нагревательной камеры и тепловую изоляцию тыльной (необогреваемой) стороны. Изоляция реализована с помощью вермикулитового элемента, в котором выполнено углубление глубиной $(3 \pm 0,1)$ мм. Размещение образца в углубление позволяет блокировать прогрев через боковые стороны нанесённого огнезащитного слоя.

Регистрация температуры на необогреваемой поверхности образца производится термоэлектрическим преобразователем. Прижатие термоэлектрического преобразователя вермикулитовой крышкой создаёт устойчивый контакт с поверхностью образца.

Измеритель-регулятор служит для снятия показаний с двух термопар: одна контролирует режим нагрева печи, вторая фиксирует температуру прогрева образца. Диапазон измерений от -270 до 2500 °С, класс точности – не ниже 0,25, градуировка соответствует типу хромель-алюмель (ХА). Термоэлектрические преобразователи относятся к типу ХА (ТХА) и рассчитаны на измерение температур в интервале от -40 до 800 °С.

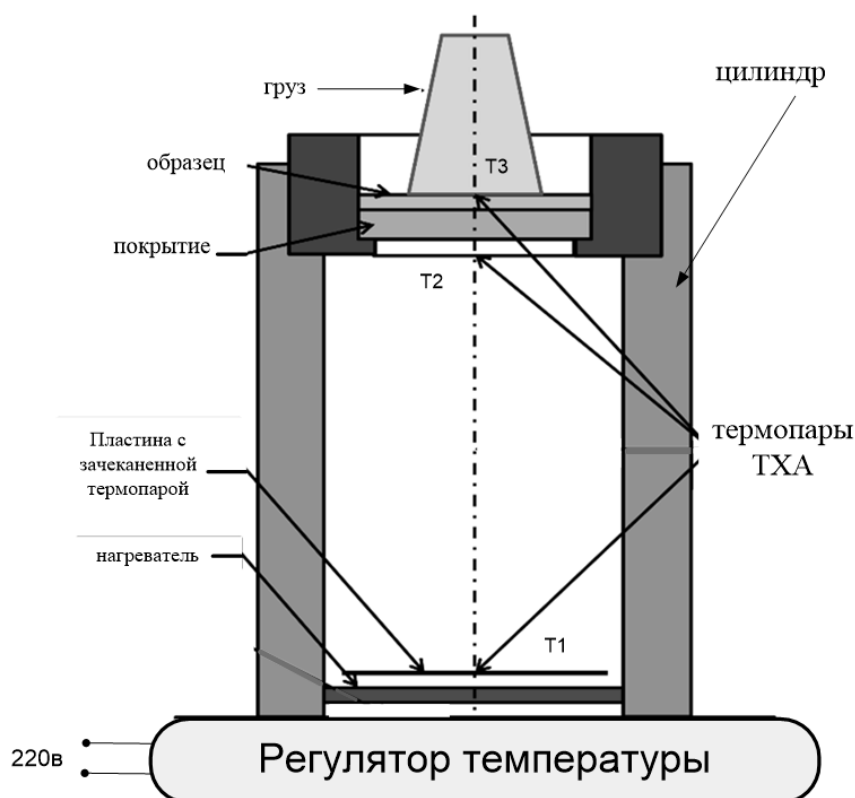


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. ТХА-термопара «хромель-алюмель»

Испытания проводятся при следующих климатических условиях: температура окружающей среды $10\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительная влажность воздуха $40\text{--}80\%$, атмосферное давление $84\text{--}106\text{ кПа}$. Для каждого эксперимента готовят не менее пяти идентичных образцов – кружков из фанеры диаметром $(65\pm 1)\text{ мм}$ и толщиной $(3\pm 0,1)\text{ мм}$.

Эксперимент выполняют при включённой вытяжной вентиляции. Перед началом испытаний образец помещают в углубление фланца и проверяют правильность установки термопары, фиксирующей температуру перед лицевой поверхностью образца. К тыльной стороне образца прижимают термоэлектрический преобразователь, измеряющий температуру прогрева. Включают регистрирующий прибор, который отображает температуру на ТЭНах.

В ходе эксперимента непрерывно фиксируют показания обеих термопар. Ключевым оценочным параметром теплоизолирующих

свойств покрытия служит промежуток времени от начала испытаний до момента, когда температура на необогреваемой стороне образца достигнет критического значения. По достижении этого значения испытание прекращают. Перед проведением последующего опыта печь должна быть охлаждена до температуры, превышающей температуру окружающей среды не более чем на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для установления значений плотности тепловых потоков, воздействующих на поверхность образца, получены градуировочные зависимости падающего теплового потока в центре экспонируемой зоны от температуры нагревательного элемента, которые представлены в табл. 1. Измерения теплового потока выполнялись преобразователем ТП-2000 с относительной погрешностью не более 5% , температуры – термоэлектрическими преобразователями типа ХА (класс допуска 2) (ТХА).

Таблица 1. Зависимость плотности падающего теплового потока от температуры перед образцом в камере печи

№ п/п	Температура на нагревательном элементе T_1 , °С	Температура в камере перед образцом T_2 , °С	Падающий тепловой поток Q , кВт/м ²
1	275 ± 4	150 ± 4	2,7±0,2
2	375 ± 5	200 ± 4	4,8±0,3
3	450 ± 5	250 ± 4	6,7±0,5
4	510 ± 5	300 ± 4	9,0±0,6
5	555 ± 6	350 ± 4	11,8±0,8
6	605 ± 6	400 ± 5	16,0±1,0
7	660 ± 6	450 ± 5	20,0±1,0
8	695 ± 6	500 ± 5	24,0±2,0

Оценку неопределённости измерений выполняли в соответствии со стандартными методиками^{2,3}.

Оценка неопределённости измерений – это процесс, который позволяет оценить разброс измеренных значений, в пределах которого они могут быть объективно приписаны измеряемой величине³.

Рассмотрим на примере расчет при $T_2 = (200 \pm 4) \text{ °С}$.

Значения температуры при температуре установки на нагревательном элементе 375,1 °С, зарегистрированные преобразователем ТХА (термопара хромель-алюмель), составили 200,1; 200,0; 200,0; 200,1; 200,1 °С. Показания приемника теплового потока составили 4,8; 4,7; 4,9; 4,7; 4,8 кВт/м².

Расчет неопределенности типа А для измерений температуры преобразователем ТХА выполнялся по следующим формулам [1-3].

Среднее арифметическое значение определялось по формуле:

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

где x_i – результаты отдельных измерений, n – количество измерений.

$$\bar{x} = \frac{(200,1 + 200,0 + 200,0 + 200,1 + 200,1)}{5} = 200,1 \text{ °С}$$

Стандартное отклонение выборки рассчитывалось по формуле:

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

В результате вычислений получено $s = 0,05477 \text{ °С}$.

Стандартная неопределенность типа А определялась по формуле:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

$$u_A = \frac{0,05477}{\sqrt{5}} = 0,0245 \text{ °С}. \quad (4)$$

Расчет неопределенности типа В выполнялся на основе паспортных данных средств измерений [1-3].

Для измерителя-регулятора, используемого при измерении температуры преобразователем ТХА, относительная погрешность составляет 0,5 %. Границы интервала, в которых находится измеряемая величина, определялись как произведение относительной погрешности на среднее значение температуры (200,1 °С). При предполагаемом равномерном распределении вероятность нахождения величины внутри интервала одинакова, поэтому стандартная неопределенность типа В рассчитывалась по формуле [1-3]:

$$u_B = \frac{\Delta}{\sqrt{3}}, \quad (5)$$

где Δ – полуширина интервала, в котором равномерно распределена случайная величина.

² ГОСТ 8.736 «Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения многократные. Методы обработки результатов измерений».

³ ГОСТ 34100.3-2017 «Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения».

Подстановка значений для измерителя-регулятора (при работе с ТХА):

$$\Delta = 0,005 \cdot 200,1 = 1,0005 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$u_{B1} = \frac{1,0005}{\sqrt{3}} = 0,5777 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Для преобразователя термоэлектрического ТХА класса допуска 2 пределы допускаемой погрешности составляют $\Delta = 2,5, ^\circ\text{C}$ (без учета слагаемого, зависящего от температуры, так как в паспортных данных указано большее значение). При равномерном распределении стандартная неопределенность равна [1-3]:

$$u_{B2} = \frac{2,5}{\sqrt{3}} = 1,443 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Расчет суммарной стандартной неопределенности для измерений температуры преобразователем ТХА. Суммарная стандартная неопределенность определяется путем суммирования стандартных неопределенностей типа А и типа В по формуле:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2} \quad (6)$$

$$u_c = \sqrt{(0,0245)^2 + (0,5777)^2 + (1,443)^2} = 1,554 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Расчет расширенной неопределенности для измерений. Расширенная неопределенность определяется путем умножения суммарной стандартной неопределенности на коэффициент охвата. Коэффициент Стьюдента (t) используется при обработке результатов измерений с малым количеством данных – менее 30 измерений [1-3].

Коэффициент Стьюдента для:

$$P = 0,95, \nu = n - 1 = 4:$$

$$t_{0,95;4} = 2,776$$

$$U = t_{0,95;4} \times u_c$$

В результате вычислений получено $U = 2,776 \times 1,554 = 4,314 \text{ } ^\circ\text{C}$

Температура, измеренная преобразователем ТХА, составила: $T_2 = (200 \pm 4) \text{ } ^\circ\text{C}$, где расширенная неопределенность $U = 4,3 \text{ } ^\circ\text{C}$ получена при коэффициенте охвата $t_{0,95;4} = 2,776$, что для нормального распределения соответствует доверительной вероятности $P = 0,95$.

Аналогично были проведены расчёты для всех температурных режимов.

Определение

критической температуры

По разрабатываемой методике необходимо определение критической температуры. Под критической температурой понимается такое значение температуры, при превышении которой начинает происходить термическая деструкция материала. Определение численного значения критической температуры для древесины был использован метод термического анализа. Испытание проводилось на термоанализаторе в среде воздуха, при скорости нагрева $20 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{мин}$. Результаты термического анализа представлены на рис. 2.

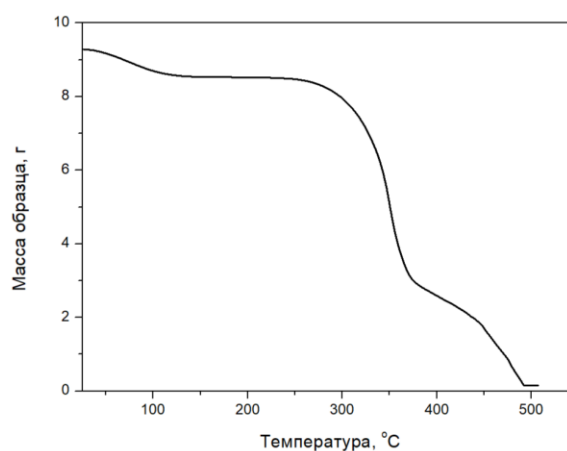


Рис. 2. Кривая термического анализа образца древесины сосны

Термогравиметрическая кривая характеризуется несколькими участками, что согласуется с литературными источниками [4, 5]. На первом участке до температуры $150 \text{ } ^\circ\text{C}$ происходит удаление воды. Второй участок термодеструкции начинается с температуры $250 \text{ } ^\circ\text{C}$ и продолжается до $370 \text{ } ^\circ\text{C}$ и сопровождается потерей примерно 50 % от изначальной массы образца. Третий участок с $370 \text{ } ^\circ\text{C}$ и до $500 \text{ } ^\circ\text{C}$. Авторами [4] указывается, что процесс термической деструкции непосредственно древесины начинается с температуры $180 \text{ } ^\circ\text{C}$. При этом с увеличением температуры скорость термической деструкции увеличивается. Поэтому, на основе собственных и литературных данных значение критической температуры в эксперименте по оценке эффективности теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий для древесины выбрано значение $200 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Результаты испытаний

По результатам исследований получены следующие зависимости прогрева пластины слоеной фанеры от вида нанесённого покрытия (рис. 3.).

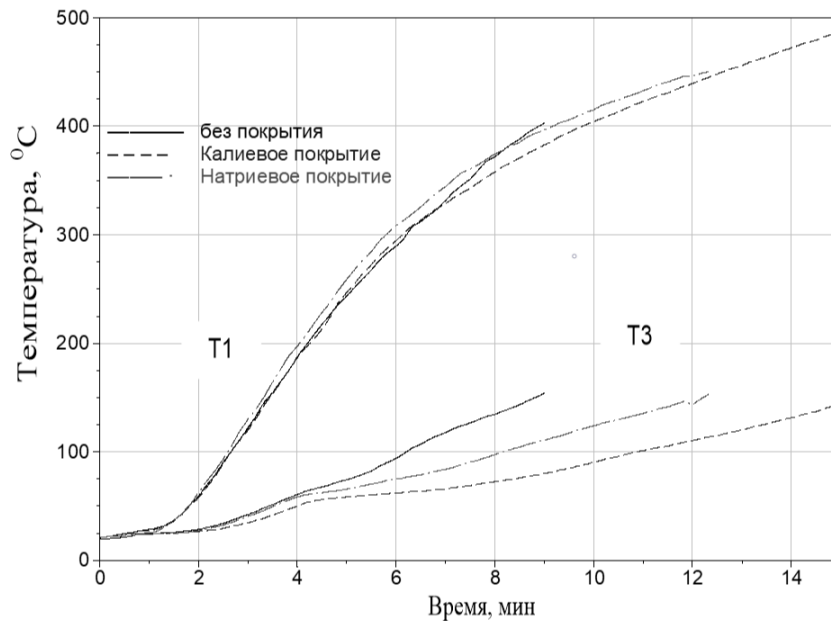


Рис. 3. Температурные зависимости прогрева образцов с различным покрытием и толщиной в 4 слоя. T1 – температура в печи, T3 – температура не обогреваемой стороны образца

Из полученных зависимостей видно, что время прогрева образца без покрытия до 100,0 °C достигает через 6,2 мин, до 150,0 °C через 8,8 мин. Соответственно для образцов с покрытием равной толщины для натриевого стекла составили 6,0 и 9,0 мин, а калиевого стекла – 10,8 и 15,4 мин.

Дальнейшим этапом исследования было определение теплоизолирующих свойств

огнезащитных составов для древесины. В качестве объектов были использованы огнезащитные составы ведущих отечественных производителей различного принципа действия (огнезащитный состав на основе антипиренов, огнезащитный состав интумесцентного типа), а также покрытие, на основе отвердевшей жидкостекольной пены толщиной 10 и 15 мм. Результаты испытаний приведены на рис. 4.

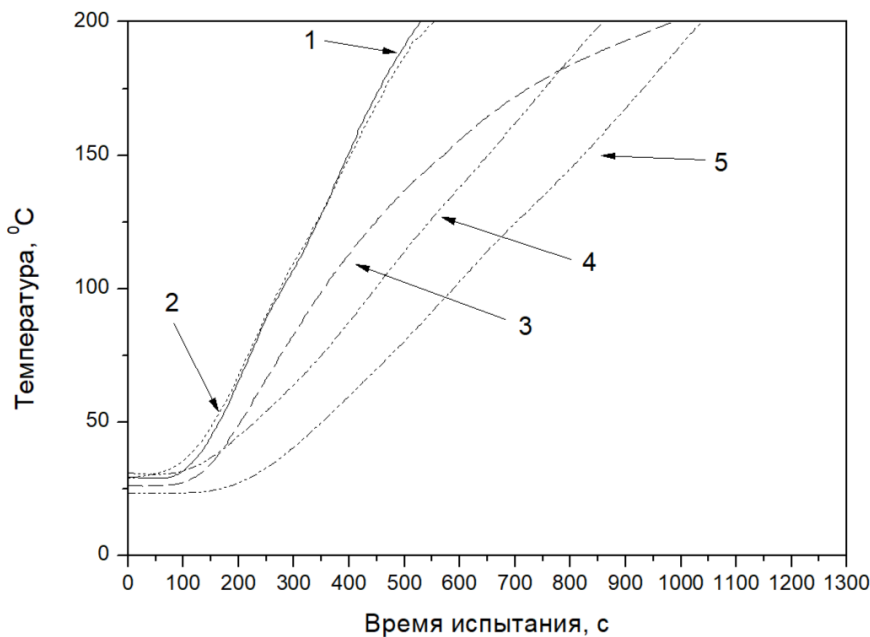


Рис. 4. Температура на необогреваемой стороне образца древесины:
 1 – необработанная древесина;
 2 – древесина, обработанная огнезащитным составом;
 3 – древесина, обработанная огнезащитным составом интумесцентного типа;
 4 – древесина с отвердевшим слоем быстротвердеющей пены толщиной 10 мм;
 5 – древесина с отвердевшим слоем быстротвердеющей пены толщиной 15 мм

Обработка древесины огнезащитным составом на основе антипиренов (3) на ранних этапах обеспечивает более быстрый нагрев образца древесины. В дальнейшем процесс замедляется, что вызвано протеканием химических эндотермических реакций деструкции компонентов огнезащитного состава. Более медленное достижение критической температуры наблюдаются при обработке огнезащитным составом интумесцентного типа. Однако, несмотря на образование вспученного слоя в процессе испытания, критическая температура достигается за 15,5 мин, что больше, чем для состава на основе быстротвердеющей пены толщиной 10 мм, для которого время достижения критической температуры составляет 14 мин. При увеличении толщины состава на основе быстротвердеющей пены до 15 мм время достижения критической температуры увеличивается до 17,5 мин.

Заключение

В результате выполнения работы достигнута поставленная цель – разработана лабораторная установка и методика испытаний для количественной оценки теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий по древесине, обеспечивающая достоверность и повторяемость результатов. На основании проведенных исследований сформулированы следующие основные выводы:

1. Разработанная экспериментальная установка позволяет воспроизводить тепловое воздействие в диапазоне плотностей падающего теплового потока от 2,7 до 24,0 кВт/м² при температурах в камере перед образцом от 150 до 500 °С. Выполнена градуировка установки

(табл. 1) и проведена оценка расширенной неопределённости измерений температуры ($U = 4$ °С при доверительной вероятности $P = 0,95$) и теплового потока, что обеспечивает метрологическую корректность сравнения различных огнезащитных составов.

2. На основе данных термического анализа и литературных сведений обосновано значение критической температуры для древесины, равное 200 °С. Превышение данной температуры инициирует активную термическую деструкцию материала с потерей массы до 50 % в диапазоне 250–370 °С.

3. Экспериментально установлено, что применение огнезащитных покрытий на основе жидкого стекла позволяет увеличить время прогрева образца фанеры до 100 °С и 150 °С по сравнению с незащищённым образцом. Покрытие на основе калиевого жидкого стекла обеспечивает более высокие теплоизолирующие свойства (время прогрева до 150 °С – 15,4 мин) по сравнению с натриевым жидким стеклом (9,0 мин) при одинаковой толщине покрытия (4 слоя).

4. Предложенная методика и установка могут быть использованы для:

- сравнительного анализа теплоизолирующей эффективности огнезащитных покрытий различных типов;
- оптимизации толщины и количества слоёв покрытия;
- контроля качества огнезащитных составов на этапе производства и эксплуатации;
- предварительного скрининга новых рецептов перед крупномасштабными огневыми испытаниями, что позволяет существенно снизить материальные и временные затраты.

Список литературы

1. Ольховский А. Н., Крикун В. М. Оценка неопределённости или оценка погрешности? // Методы оценки соответствия. 2009. № 12. С. 30–35. EDN: МТЕНСJ.

2. Воронова Т. С., Пильцов М. В., Кулыгин В. А. Неопределённость измерений при определении их точности // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2023. № 20. С. 12–15. EDN: BGCWGS.

3. Оценка неопределённости измерений: сравнение методов GUM и Монте-Карло на примере биметаллического термометра / Б. Қ. Ермек, Р. С. Беккожин, А. Әлиқызы [и др.] // Вестник Академии гражданской авиации. 2025. № 4 (39). С. 82–97. DOI: 10.53364/24138614_2025_39_4_7. EDN: DHPVXV.

4. Федотов И. О., Сивенков А. Б., Нагановский Ю. К. Эффективность огнезащитных пропиточных составов для деревянных конструкций // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 3 (67). С. 67–78. EDN: IWXLOX/

5. Котлярова И. А., Степина И. В. Определение кинетических параметров термодеструкции и группы огнезащитной эффективности древесины сосны, модифицированной боразотным антипиреном // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2020. № 1. С. 70–77. EDN: CMNSDH.

References

1. Olkhovskiy A. N., Krikun V. M. Otsenka neopredelennosti ili otsenka pogreshnosti?

[Uncertainty Estimation or Error Estimation?]. *Metody otsenki sootvetstviya*, 2009, issue 12, pp. 30-35.

2. Voronova T. S., Piltsev M. V., Kulygin V. A. Neopredelennost' izmereniy pri opredelenii ikh tochnosti [Measurement Uncertainty in Determining Their Accuracy]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2023, issue 20, pp. 12–15.

3. Otsenka neopredelennosti izmereniy: sravneniye metodov GUM i Monte-Karlo na primere bimetallicheskogo termometra [Evaluation of Measurement Uncertainty: Comparison of the GUM and Monte Carlo Methods Using the Example of a Bimetallic Thermometer] / B. K. Yermek, R. S. Bekkozhin, A. Alikyzy [et al.]. *Vestnik Akademii grazhdanskoj aviatsii*, 2025, issue 4(39), pp. 82–97. DOI: 10.53364/24138614_2025_39_4_7.

4. Fedotov I. O., Sivenkov A. B., Nagovskiy Yu. K. Effektivnost' ognezashchitnykh propitochnykh sostavov dlya derevyannykh konstruktiv [Effectiveness of Fire-Retardant Impregnating Compounds for Wooden Structures]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*, 2023, vol. 3 (67), pp. 67–78.

5. Kotlyarova I. A., Stepina I. V. Opredeleniye kineticheskikh parametrov termodestruksii i gruppy ognezashchitnoy effektivnosti drevesiny sosny, modifitsirovannoy borazotnym antipirenom [Determination of Thermal Destruction Kinetic Parameters and Fire Protection Efficiency Group of Pine Wood Modified with Boron-Nitrogen Fire Retardant]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova*, 2020, issue 1, pp. 70–77.

Сиплатов Евгений Александрович

ФГБУ ВНИИПО МЧС России

Российская Федерация, Московская обл., г. Балашиха

начальник отдела (инструментальных методов контроля в области пожарной безопасности)

научно-исследовательского центра технического регулирования

E-mail: siplatov82@mail.ru

Siplatov Yevgeniy Aleksandrovich

FSBI VNIIPo of EMERCOM of Russia,

Russian Federation, Balashikha

Head of Department (instrumental control methods in the field of fire safety)

of the Scientific Research Center for Technical Regulation

E-mail: siplatov82@mail.ru