

Ф. А. ШУТОВ, д-р техн. наук, профессор РГХТУ им. Д. И. Менделеева (Россия, 125047, г. Москва, ул. Миусская, 9; e-mail: fashutov@mail.ru)

Е. Ю. КРУГЛОВ, научный сотрудник Учебно-научного центра проблем пожарной безопасности в строительстве, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: 89268196698@mail.ru)

Р. М. АСЕЕВА, д-р хим. наук, профессор кафедры пожарной безопасности в строительстве, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: rm-aseeva@yandex.ru)

Б. Б. СЕРКОВ, д-р техн. наук, профессор кафедры пожарной безопасности в строительстве, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: serkov@antip.ru)

А. Б. СИВЕНКОВ, д-р техн. наук, профессор кафедры пожарной безопасности в строительстве, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: sivenkov01@mail.ru)

УДК 641.841

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ИЗ ПОЛИМЕРНОГО ПЕНОКОМПОЗИТА "РЕНОСОМ" НА ОГНЕСТОЙКОСТЬ ОГРАЖДАЮЩИХ ДЕРЕВЯННЫХ КАРКАСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Проведены маломасштабные огневые испытания при стандартном режиме пожара трех систем ограждающих конструкций, моделирующих фрагменты стен и перегородок в деревянных зданиях легкого каркасного типа. Выполнен анализ влияния теплоизоляции из пенокомпозиата "Реносом" с плотностью 43,7–140 кг/м³ на огнестойкость конструкций. Показано, что фактический предел огнестойкости ограждающих конструкций по потере целостности (Е) и теплоизолирующей способности (I) составил 95–110,3 мин. Выявлена тенденция к увеличению предела огнестойкости четырехслойных конструкций с уменьшением плотности пенокомпозиата "Реносом" с 83 до 43,7 кг/м³. Измерены средние значения плотности теплового потока в маломасштабной огневой печи при стандартном режиме пожара в разные моменты его развития. Показано, что полученные в экспериментах значения плотности теплового потока согласуются с зависимостью, установленной при испытаниях в стандартных крупномасштабных устройствах. Рассчитана плотность тепловых потоков на поверхности элементов конструкций и значения их коэффициентов теплопроводности.

Ключевые слова: древесина; огнестойкость; ограждающие каркасные конструкции; теплоизоляция; полимерный пенокомпозит.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.01.28-37

Введение

Применение натуральной древесины в качестве материала для строительства зданий и сооружений различного назначения имеет многовековую историю. Горючесть и высокая пожарная опасность древесины являются одним из главных недостатков, надолго ограничившим область ее применения малоэтажным домостроением. Индустриальное производство новых конструкционных материалов из древесины дало возможность использовать прогрессивные каркасные и каркасно-панельные технологии в строительстве не только малоэтажных деревянных зданий и сооружений. Открыты также перспективы строительства среднеэтажных (от 3 до 10 этажей [1]) и даже высотных (до 30–42 этажей [1–3])

зданий с использованием в основном массивных, крупногабаритных деревянных конструкций с несущими и ограждающими функциями.

Взросший интерес к применению деревянных каркасных конструкций в строительстве высоких сооружений обусловлен рядом их преимуществ по сравнению с конструкциями из других строительных материалов [4]. Помимо наличия возобновляемого сырья, экологически более чистого и менее энергозатратного производства продукции на основе древесины, следует отметить ее стойкость к агрессивным средам и высокую механическую прочность при относительно малой плотности древесины. Благодаря последнему обстоятельству деревянные конструкции имеют более низкую массу по сравне-

нию с конструкциями из других материалов, что позволяет снизить нагрузку здания на фундамент и трудозатраты на его возведение.

Проектирование и строительство высоких зданий с применением деревянных конструкций основаны на общей концепции обеспечения безопасности жизни людей: пожар и токсичный дым не должны распространяться за пределы помещения пожара, а несущие элементы должны сохранять свою устойчивость в течение нормированного периода времени, что обеспечит условия своевременной безопасной эвакуации и спасения людей. Стратегия такого подхода выражена стремлением достичь такого уровня качества высоких деревянных каркасных зданий, при котором они были бы эквивалентны по огнестойкости зданиям с негорючими конструкциями. В частности, желательно достижение двухчасового предела огнестойкости критических конструктивных элементов и частей здания [1]. Проблема решается применением спринклерных систем и систем дымоудаления (снижающих уровень опасности по анализу риска на 70 %), регулированием скорости и глубины обугливания деревянных элементов каркаса за счет увеличения сечения несущих нагрузку элементов, а также полной изоляцией последних с помощью конструктивной огнезащиты или использованием гибридных бетонно-деревянных конструкций [1, 2].

В настоящее время в России с применением массивных деревянных клееных конструкций в качестве несущего каркаса построен целый ряд большепролетных сооружений, например: крытый каток пролетом 58 м (г. Тверь), склад минеральных удобрений пролетом 63 м и высотой в коньке арок 45 м (морской порт, г. Санкт-Петербург) и др. [5]. В жилом секторе малоэтажного деревянного домостроения, при возведении зданий офисов, небольших торговых центров главным образом используют облегченные деревянные каркасные конструкции (*light timber frame constructions*). За рубежом ведется активное строительство среднеэтажных зданий каркасного типа с облегченными деревянными конструкциями. Полагают, что такие конструкции пригодны для зданий не выше 5–6 этажей [1, 2].

Первичным признаком отличия легких деревянных каркасных конструкций от массивных (*heavy timber frame constructions*) служит размер сечения деревянных элементов. Принимают, что минимальный размер сечения облегченного каркаса из древесины не превышает 80 мм [2].

Легкие деревянные каркасные конструкции с несущими и ограждающими функциями являются многослойными и состоят из деревянного каркаса, обшивок (облицовочных плит) и теплоизоляции в пространстве между ними. В европейском стандарте

по проектированию деревянных каркасных сооружений [6] и рекомендациях по огнестойкости деревянных конструкций [7], разработанных по результатам стандартных крупномасштабных испытаний и расчетов вклада отдельных слоев конструкций по методу конечных элементов, отражена роль разных комбинаций материалов в общей каркасной системе. Установлена иерархия вклада различных слоев в огнестойкость деревянной конструкции в целом [8]. Особенно важен вклад в огнестойкость всей конструктивной системы слоев, подвергаемых прямому воздействию пожара. Следует отметить особую роль негорючей теплоизоляции, которая повышает огнестойкость деревянного каркаса [9].

Необходимо заметить, что теплоизоляционные материалы на органической полимерной основе были исключены из рассмотрения в работах [6, 7]. Между тем, они достаточно широко используются в строительстве. Особенно это касается теплоизоляции из пенополистирола и его модификаций. Стандартные испытания пожарной опасности блочного самозатухающего пенополистирола ПСБ-С (ГОСТ 15588–86) от разных производителей (с плотностью 25–50 кг/м³) показали, что он относится к группе горючести Г3 и Г4, воспламеняемости В2 и В3, дымообразующей способности Д3. Материал имеет высокую теплоту сгорания ($Q_n = 41,2$ МДж/кг) и низкое значение кислородного индекса (КИ = 20 %). Плавится он при температуре около 200 °С, а при 310 °С — воспламеняется. Теплопроводность ПСБ-С находится в пределах 0,035–0,037 Вт/(м·К). Испытания при режиме стандартного пожара фрагментов стен из трехслойных панелей со стальными или асбоцементными обшивками и ПСБ-С с плотностью $\rho = 30\div 35$ кг/м³ показали, что утеплитель воспламеняется через 3–4 мин одностороннего нагрева, а затем происходит скрытое распространение горения внутри конструкции, сопровождающееся образованием расплава, дыма и токсичных газов. Этот процесс продолжается до полного выгорания теплоизоляции даже при удалении источника теплового воздействия на конструкцию. Навесные стены с обшивками из тонких металлических листов или асбоцементных плит толщиной $\delta = 10$ мм и теплоизоляцией ПСБ-С независимо от ее толщины были отнесены к группе сгораемых конструкций с пределом огнестойкости 0,1–0,2 ч. Теплоизоляционные материалы из “самозатухающего” экструзионного и блочного пенополистирола не рекомендованы для применения на важных строительных объектах [10, 11].

В настоящее время в строительной индустрии популярность приобретают так называемые SIP-панели (*Structural Insulated Panels*), для соединения которых используют элементы деревянного каркаса. SIP-панели представляют собой многослойные

конструкции из теплоизоляции и негорючих или сгораемых облицовок, приклеиваемых прямо к теплоизоляции разными адгезивами. Отсутствие в SIP-панелях воздушных зазоров и металлических узлов соединения повышает их предел огнестойкости.

В 2013 г. были проведены крупномасштабные испытания по стандартам ГОСТ 30247.0–94 и ГОСТ 30247.1–94 SIP-панелей фирмы “Хотвелл” с теплоизоляцией из самозатухающего ПСБ-С [12]. Конструкция наружной несущей стены из SIP-панели с теплоизоляцией ПСБ-С 25 толщиной 150 мм, внешней обшивкой OSB (*Oriented Strand Boards*) толщиной 12 мм и внутренней облицовкой гипсоволокнистым листом (ГВЛ) толщиной 2,5 мм при равномерно распределенной нагрузке 1500 кг на 1 м показала предел огнестойкости 60 мин (R60). При облицовке двумя слоями ГВЛ предел огнестойкости конструкции по несущей способности возрастал до 90 мин [13, 14]. Если учесть низкую температуру плавления и склонность ПСБ-С к скрытому горению, то огнестойкость подобных конструкций при пожаре по теплоизолирующей способности (I) остается под вопросом.

Объемы применения в строительстве малоэтажных зданий и сооружений в Российской Федерации другого теплоизоляционного материала из сгораемого пенополиуретана (ППУ) очень малы из-за высокой токсичности продуктов его горения (цианиды, фосген) и более высокой стоимости по сравнению с ПСБ-С. За рубежом не ослабевает интерес к использованию в строительстве теплоизоляционных материалов на органической основе [13, 15].

Ранее были показаны перспективы применения в качестве теплоизоляции в деревянных зданиях и сооружениях легкого каркасного типа неплавкого, трудносгораемого полимерного пенокомпозиата “Репосом” (РС) [16–18]. Важно отметить, что этот инновационный материал при огневом воздействии обугливается, не теряя формы, а образовавшийся пенококс не тлеет после удаления источника нагрева и продолжает выполнять в конструкции функцию термостойкой теплоизоляции.

Цель данной работы — выяснить влияние свойств теплоизоляции из пенокомпозиата “Репосом” разной плотности на огнестойкость трех систем ограждающих деревянных конструкций, моделирующих фрагменты ненесущих стен и перегородок в деревянных зданиях легкого каркасного типа при стандартном температурно-временном режиме пожара. Кроме того, представлялось важным измерить плотность теплового потока в огневой печи по мере развития стандартного пожара и оценить плотность тепловых потоков на поверхности элементов конструкций в этих условиях.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования были два образца четырехслойных конструкций (№ 1 и 2) и один образец трехслойной конструкции (№ 3) с площадью поверхности, подвергаемой одностороннему нагреву, $0,30 \times 0,37 \text{ м}^2$. Деревянные стойки изготовлены из сосновых досок толщиной 50 мм, с плотностью древесины $\rho = 464 \text{ кг/м}^3$. В качестве облицовок конструкций со стороны огневого воздействия использовали только негорючие стекломagnesитовые плиты (СМЛ), а с ненагреваемой стороны — как СМЛ, так и сгораемые плиты OSB ($\rho = 727 \text{ кг/м}^3$). В образцах конструкций применялся полимерный композит плотностью 43,7; 83 и 140 кг/м³.

Слои в образцах располагались в такой последовательности (со стороны огневого воздействия):

- № 1: два слоя СМЛ ($\delta = 0,006 \text{ м}$) – слой теплоизоляции “Репосом” ($\delta = 0,15 \text{ м}$, $\rho = 43,7 \text{ кг/м}^3$) – плита OSB ($\delta = 0,009 \text{ м}$);
- № 2: слой СМЛ 1 ($\delta = 0,006 \text{ м}$) – слой СМЛ 2 ($\delta = 0,01 \text{ м}$) – слой теплоизоляции “Репосом” ($\delta = 0,15 \text{ м}$, $\rho = 83 \text{ кг/м}^3$) – плита OSB ($\delta = 0,009 \text{ м}$);
- № 3: слой СМЛ ($\delta = 0,006 \text{ м}$) – слой теплоизоляции “Репосом” ($\delta = 0,15 \text{ м}$, $\rho = 140 \text{ кг/м}^3$) – слой СМЛ ($\delta = 0,006 \text{ м}$).

Крепление облицовочных плит к стойкам деревянного каркаса выполнено с помощью металлических саморезов длиной 4 см.

Испытание образцов на огнестойкость проводили в маломасштабной огневой печи с огневой камерой размером $0,5 \times 0,39 \times 0,4 \text{ м}$. В камере с помощью специально регулируемой газовой горелки устанавливали стандартный температурно-временной режим пожара в соответствии с [12, 15]. Температура в печи и в контрольных точках на поверхности, подвергаемой одностороннему огневому воздействию, на ненагреваемой поверхности конструкции, а также внутри нее (рис. 1) регистрировалась автоматически в процессе испытания.

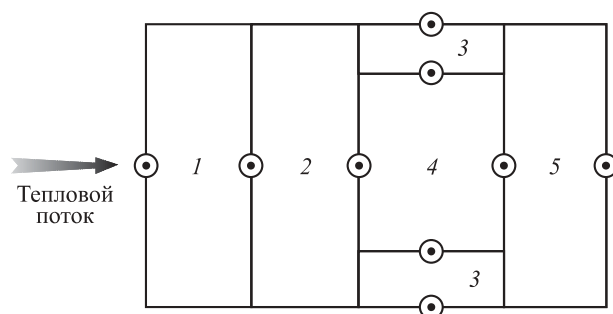


Рис. 1. Схема расположения элементов ограждающей деревянной каркасной конструкции и контрольных точек температурных измерений: 1, 2 — облицовочные плиты со стороны огневого воздействия; 3 — деревянные стойки; 4 — теплоизоляция; 5 — облицовочная плита на обратной стороне конструкции; ⊙ — термодатчики

Предел огнестойкости ограждающих конструкций определяли по времени потери целостности (Е) и теплоизолирующей способности (И), определяемой временем достижения критической максимальной температуры 180 °С на ненагреваемой стороне конструкции. Вклад каждого слоя в общую огнестойкость конструкции оценивали по температурным кривым в предположении, что начало обугливания древесины и OSB возможно после достижения на тыльной стороне огнезащитной плиты или теплоизоляции температуры 270 °С [7, 19]. Среднюю плотность в огневой печи при стандартном режиме пожара определяли путем измерения плотности теплового потока при горении пропан-бутановой газовой смеси. Плотность тепловых потоков измерялась водоохлаждаемым датчиком полного потока (датчик Гордона), температура пламени — хромель-алюмелевой термопарой с регистрацией сигналов на приборе ИРТМ.

Результаты и их обсуждение

В настоящее время во всех индустриально развитых странах наблюдается опережающий рост производства и потребления в строительстве теплоизоляционных материалов из полимерных пенопластов на основе термореактивных смол (~5 % в год) по сравнению с ростом производства всей мировой полимерной продукции (2–2,5 % в год).

В России в связи с массовым строительством малоэтажных деревянных зданий и сооружений легкого каркасного типа ощущается острая потребность в пожаробезопасных полимерных теплоизоляционных материалах из относительно недорогого и доступного отечественного сырья. Разработанный теплоизоляционный материал “Репосом” отвечает этим требованиям. Он выпускается в промышленном масштабе ООО “Пеноком” (г. Москва) с 2012 г. и изготавливается по заливочной энергосберегающей технологии без подвода тепла и давления извне. Плотность пенокомполита “Репосом” может варьироваться в широких пределах (от 30 до 500 кг/м³), а значит, в широком диапазоне могут изменяться его теплопроводность и прочностные свойства. По результатам стандартных испытаний пенокомполита “Репосом” он сертифицирован как материал слабогорючий Г1, средней воспламеняемости В2, с умеренным дымообразованием Д2.

Фактический предел огнестойкости ограждающих деревянных конструкций определяли по потере их теплоизолирующей способности с момента ввода образцов в огневую камеру. На рис. 2 и 3 показана динамика изменения температуры в печи при стандартном режиме пожара, а также на поверхности элементов четырехслойных конструкций, близких по своему устройству.

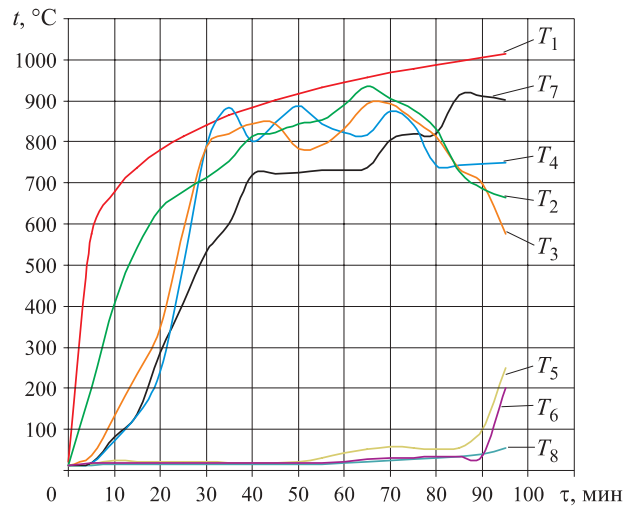


Рис. 2. Динамика изменения температуры в огневой печи (T_1) и контрольных точках на поверхности элементов конструкции (образец № 1): T_2, T_3 — на нагреваемой и тыльной сторонах СМЛ 1; T_4 — на тыльной стороне СМЛ 2 (нагреваемая сторона теплоизоляции “Репосом”); T_5 — на тыльной стороне “Репосом” (нагреваемая сторона OSB); T_6 — на ненагреваемой стороне конструкции; T_7, T_8 — на нагреваемой и ненагреваемой сторонах стойки

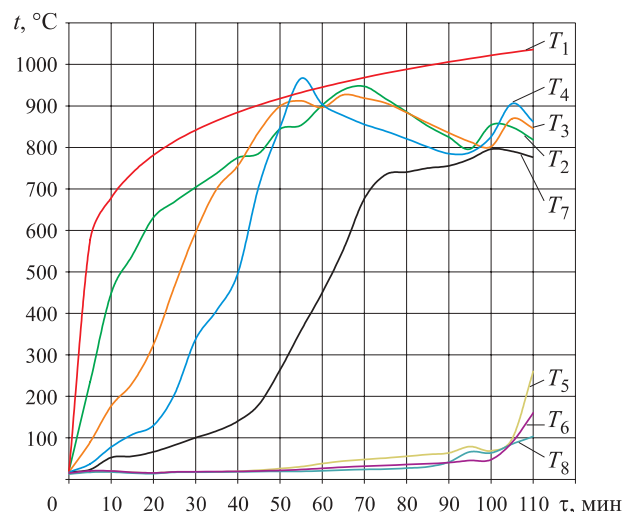


Рис. 3. Динамика нарастания температуры в огневой печи (T_1) и на поверхности элементов конструкции (образец № 2): T_2 — на нагреваемой стороне СМЛ 1; T_3 — на тыльной стороне СМЛ 1 (нагреваемая сторона СМЛ 2); T_4 — на поверхности теплоизоляции (тыльная сторона СМЛ 2); T_5 — на тыльной стороне теплоизоляции “Репосом” (нагреваемая поверхность OSB); T_6 — на ненагреваемой стороне OSB; T_7 — на нагреваемой стороне стойки; T_8 — на внешней поверхности стойки

Фактический предел огнестойкости ограждающей конструктивной системы образца № 1 $P_{\phi} = 97,2$ мин. Согласно аддитивному методу он состоит из вкладов элементов ограждающей конструкции:

$$P_{\phi} = \sum P_{\phi i} = P_{\text{СМЛ 1}} + P_{\text{СМЛ 2}} + P_{\text{PC}} + P_{\text{OSB}} = 18,6 + 4 + 73,7 + 0,9 = 97,2 \text{ мин.}$$

Таким образом, вклад двух негорючих облицовок СМЛ в теплоизолирующую способность рассматриваемой ограждающей деревянной каркасной конструкции составляет 23,3 %, а полимерного пенокомпозиата “Репосом” — 76,7 %. На тыльной стороне теплоизоляции температура 270 °С достигается только через 96,3 мин после начала испытания. Плита OSB мало влияет на общую огнестойкость конструкции по теплоизолирующей способности (I), несмотря на то что до конца испытания она полностью сохраняла свою целостность.

В четырехслойной ограждающей конструкции № 2 использована теплоизоляция, плотность которой была почти вдвое меньше по сравнению с образцом № 1.

В результате анализа температурных измерений установлено, что фактический предел огнестойкости этой ограждающей конструкции достигает 110,3 мин. Согласно аддитивному методу он представляет собой сумму вкладов отдельных элементов конструкции:

$$\begin{aligned} P_{\Phi} &= \sum P_{\Phi i} = P_{\text{СМЛ } 1} + P_{\text{СМЛ } 2} + P_{\text{РС}} + P_{\text{OSB}} = \\ &= 15,9 + 12,1 + 82 + 0,3 = 110,3 \text{ мин.} \end{aligned}$$

В данном случае вклад двух слоев СМЛ в предел огнестойкости конструкции образца № 2 составляет 25,3 %, а пенокомпозиата “Репосом” — 74,3 %. Как и прежде, вклад облицовочной плиты OSB в огнестойкость используемой ограждающей деревянной каркасной системы невелик, несмотря на то что плита в течение всего испытания оставалась целой. Температура 270 °С на поверхности стоек со стороны огневого воздействия достигалась лишь на 51-й минуте испытания, а с ненагреваемой стороны оставалась ниже 100 °С до конца испытания. Сравнение температурных измерений для этих образцов четырехслойных конструкций показало явную тенденцию к увеличению положительного влияния на предел огнестойкости конструкции теплоизоляции с низкой плотностью. Ее вклад возрастал, несмотря на увеличение толщины СМЛ и системы в целом.

На рис. 4 представлена динамика прогрева элементов образца № 3 деревянной каркасной конструкции при стандартном режиме пожара.

Фактический предел огнестойкости этой ограждающей деревянной конструкции состоит из следующих вкладов ее элементов:

$$\begin{aligned} P_{\Phi} &= \sum P_{\Phi i} = P_{\text{СМЛ } 1} + P_{\text{РС}} + P_{\text{СМЛ } 2} = \\ &= 13 + 75 + 7 = 95 \text{ мин.} \end{aligned}$$

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что уменьшение толщины и эффективности первого слоя огнезащиты конструкции приводит к увеличению роли теплоизоляции, а также негорючей облицовки на необогреваемой стороне конструкции

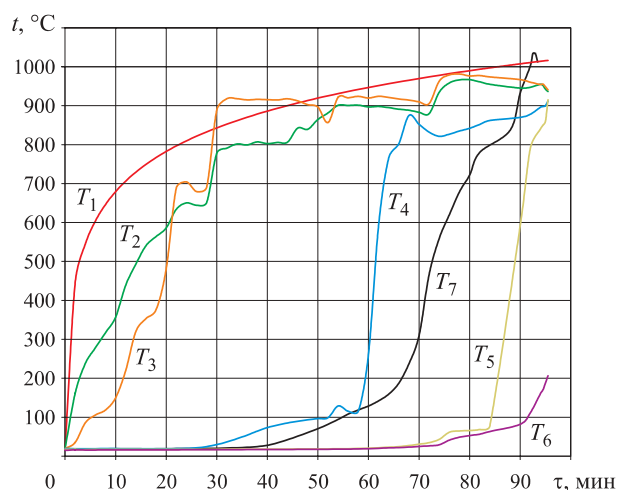


Рис. 4. Динамика прогрева элементов ограждающей деревянной конструкции (образец № 3) при стандартном режиме пожара (T_1): T_2 , T_3 — температура на нагреваемой и тыльной поверхностях СМЛ 1 (нагреваемая сторона теплоизоляции “Репосом”); T_4 — внутри утеплителя “Репосом” на расстоянии от обогреваемой стороны 75 мм; T_5 — на ненагреваемой стороне “Репосом”; T_6 — на ненагреваемой стороне СМЛ 2; T_7 — на поверхности стойки со стороны утеплителя

по сравнению с OSB. Обугливание деревянной стойки со стороны утеплителя начинается на 71-й минуте. К концу испытания, судя по фотографии стойки на рис. 5, обугленный слой со стороны теплоизоляции имеет толщину около 15 мм. В среднем скорость обугливания стойки в этих условиях составляет: $15 \text{ мм} / (95 - 71) \text{ мин} = 0,62 \text{ мм/мин}$, т. е. меньше, чем при прямом воздействии огня на древесину ($0,80 \text{ мм/мин}$).

Зная плотность тепловых потоков в огневой печи при стандартном режиме пожара и температурные характеристики на поверхности элементов конструкции, можно получить важную информацию об ограждающей системе в целом и ее элементах. Как следует из табл. 1, плотность теплового потока в огневой печи при стандартном режиме пожара в период со 2-й по 58-ю минуту с начала испытаний изменяется с 17 до 90 кВт/м², возрастая по степенному закону: $q'' = 17,2\tau^{0,4}$ (где τ — время испытания, мин). Полученная степенная зависимость плотности теплового потока от времени в маломасштабной огневой печи согласуется с зависимостью, установленной в стандартных крупномасштабных испытаниях для средней плотности теплового потока: $q'' = 18\tau^{0,4}$ [20].

Таким образом, при стандартном температурно-временном режиме пожара исследуемые образцы ограждающих деревянных каркасных конструкций с пределом огнестойкости 95–110 мин к концу испытаний подвергаются действию теплового потока плотностью выше 100 кВт/м².

Таблица 1. Плотность теплового потока в огневой печи при стандартном режиме пожара

$T_{\text{печ}}, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{мин}$	$q'', \text{кВт/м}^2$
318	2	17
350	2,5	21
400	3	23
450	4	26
518	5	32
608	7	38
650	10	39
700	15	46
750	20	52
808	30	57
850	40	63
905	45	73
1000	58	90

Измерение температуры на поверхности элементов ограждающей конструкции на начальной стадии развития пожара позволяет определить плотность падающих на поверхность элементов конструкции тепловых потоков и оценить коэффициент теплопроводности используемых материалов.

В качестве примера приведем расчет плотности теплового потока и коэффициентов теплопроводности элементов образца ограждающей конструкции № 3.

Суммарный тепловой поток q''_{Σ} (Вт/м²) от газовой среды пожара к поверхности конструкции складывается из потоков, переносимых конвекцией $q''_{\text{конв}}$ (Вт/м²) и излучением $q''_{\text{л}}$ (Вт/м²):

$$q''_{\Sigma} = q''_{\text{конв}} + q''_{\text{л}};$$

$$q''_{\text{конв}} = \alpha (T_{\text{печ}} - T_{w1});$$

$$q''_{\text{л}} = \varepsilon \sigma (T_{\text{печ}}^4 - T_{w1}^4),$$

где α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

$\alpha = 15 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$;

$T_{\text{печ}}$ — температура газовой среды в огневой печи, К;

T_{w1} — температура на нагреваемой поверхности СМЛ, К;

ε — степень черноты среды; $\varepsilon = 0,6$ для чисел Бугера $Bu \leq 1$;

σ — константа Стефана – Больцмана, Вт/(м²·К);

$\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$.

По значениям суммарного теплового потока на нагреваемую поверхность СМЛ 1, установленным для определенного момента развития стандартного пожара, рассчитаем коэффициент теплопроводности λ (Вт/(м·К)) для СМЛ 1 ($\delta = 0,006 \text{ м}$; $\rho = 1057 \text{ кг/м}^3$):

$$\lambda_{\text{СМЛ 1}} = q''_{\Sigma} \delta / (T_{\text{печ}} - T_{w1}).$$

Таблица 2. Коэффициент теплопроводности СМЛ при стандартном режиме пожара

$\tau, \text{мин}$	$T_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	$\lambda_{\Sigma}, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$
0	20	0,26 [18]
2	98	0,456
4	161	0,521
6	192	0,472
8	218	0,486
16	446	0,647
18	470	0,609
20	530	1,090

Например, при $\tau = 2$ мин и температуре $T_{\text{ср}} = 98 ^\circ\text{C}$, которая определяется как средняя между температурами на нагреваемой (T_{w1}) и ненагреваемой (T_{w2}) поверхностях СМЛ ($T_{\text{ср}} = (T_{w1} + T_{w2})/2$), коэффициент теплопроводности СМЛ составит:

$$\lambda_{\Sigma [2]} = [15 \cdot (677 - 434) + 0,6 \cdot 5,669 \cdot 10^{-8} \times (677^4 - 434^4)] \cdot 0,006 / (434 - 308) =$$

$$= [3585 + (6977,8 - 1206,7)] \cdot 0,006 / 126 =$$

$$= 56,5 / 126 = 0,456 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

В табл. 2 приведены значения коэффициента теплопроводности СМЛ, рассчитанные аналогичным образом при повышении температуры в процессе развития стандартного пожара в течение 20 мин. Далее пиролиз и обугливание теплоизоляции влияют на величину T_{w2} .

Для оценки теплопроводности теплоизоляции “Репосом” с плотностью 140 кг/м^3 используем уравнение нестационарной теплопроводности и краевые условия на нагреваемой и ненагреваемой сторонах этого элемента конструкции при толщине пенокомполита $0,075 \text{ м}$. Приняты следующие допущения:

- 1) на границе между элементами конструкции (слоем СМЛ 1 и поверхностью теплоизоляции) имеется идеальный контакт и соблюдается условие равенства температур: $T_{w2} = T_{w3}$;
- 2) до температуры начала разложения в пенокомполите не происходят физико-химические превращения; форма и объем этого элемента конструкции практически не изменяются. Пенокомполит рассматривается как пористый материал с неразлагающимся каркасом;
- 3) теплопроводность и излучение играют доминирующую роль в переносе тепла в слое теплоизоляции.

Расчет коэффициентов теплопроводности “Репосом” проведен для интервала 6–12 мин (включительно) с начала развития стандартного пожара, когда на поверхности теплоизоляции температура достигает $220 ^\circ\text{C}$ и становится возможной деструкция пенокомполита.

Уравнение нестационарной теплопроводности в рассматриваемом слое элемента конструкции с учетом вектора потока можно представить в виде:

$$c' \rho' (1 - \varphi) \frac{\partial T}{\partial \tau} = -\operatorname{div} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \operatorname{div} q''_{\text{л}}, \quad (1)$$

где c' — удельная теплоемкость каркаса полимерного пенокомпозиата, Дж/(кг·К);

ρ' — плотность каркаса полимерного пенокомпозиата, кг/м³; $\rho' (1 - \varphi) = \rho_0 = 140$ кг/м³;

φ — пористость материала;

ρ_0 — исходная плотность пенокомпозиата;

$q''_{\text{л}}$ — лучистый тепловой поток;

$q''_{\text{л}} = \varepsilon \sigma (T_3^4 - T_4^4)$ (см. обозначения на рис. 4).

Удельная теплоемкость пенокомпозиата практически не зависит от его плотности и соответствует теплоемкости каркаса: $c' = c = 1600$ Дж/(кг·К). Преобразуя уравнение (1), получим:

$$\lambda \Delta T / \delta = q''_{\text{л}} - c \rho_0 \delta (T_3 - T_4) / \Delta \tau = q'',$$

откуда $\lambda = q'' \delta / \Delta T$.

При средней температуре слоя теплоизоляции $T_{\text{ср}} = (106 + 19) / 2 = 62,5$ °С коэффициент теплопроводности пенокомпозиата $\lambda^{(62,5)} = 0,0417$ Вт/(м·К), что согласуется с данными, полученными стандартным методом определения теплопроводности пенокомпозиата “Penocom” [17].

При увеличении средней температуры рассматриваемого слоя теплоизоляции “Penocom” в усло-

виях стандартного пожара ее коэффициент теплопроводности растет следующим образом: $\lambda^{(69)} = 0,0675$ Вт/(м·К); $\lambda^{(84,5)} = 0,1319$ Вт/(м·К); $\lambda^{(119)} = 0,3075$ Вт/(м·К).

Заключение

Полученные результаты показывают эффективность полимерного пенокомпозиата “Penocom” в качестве теплоизоляционного материала для ограждающих деревянных конструкций каркасного типа. Установлен значительный вклад теплоизоляции в огнестойкость ограждающих конструкций, а также влияние плотности пенокомпозиата на предел их огнестойкости. Применение теплоизоляции “Penocom” позволяет достигнуть фактического предела огнестойкости несущих ограждающих деревянных каркасных конструкций по потере целостности (Е) и теплоизолирующей способности (I) 95–110 мин. Измеренные значения плотности теплового потока в используемой маломасштабной печи при стандартном режиме пожара согласуются со степенной зависимостью средней плотности теплового потока от времени развития пожара, установленной при испытаниях в крупномасштабных стандартных огневых устройствах: $q'' = 18\tau^{0,4}$. По изменению температуры на поверхности элементов конструкции рассчитаны плотности падающих тепловых потоков; проведена оценка коэффициентов теплопроводности СМЛ и полимерного пенокомпозиата “Penocom”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Buchanan A., Östman B., Frangi A. Fire resistance of timber structures: a report for the National Institute of Standards and Technology. URL: www.nist.gov/el/fire_research/upload/NIST-Timber-Report-v4-Copy.pdf (дата обращения: 20.10.2015).
2. Barber D., Gerard R. High-rise timber buildings // Fire Protection Engineering, July 2014. URL: http://www.sfpe.org/?page=2014_Q3_1 (дата обращения: 20.10.2015).
3. 10 of the best wooden skyscrapers. URL: <https://www.worldbuild365.com/news/detail/sawxeob2a/building-architecture/10-of-the-best-wooden-skyscrapers> (дата обращения: 20.10.2015).
4. Казейкин В. С., Баронин С. А., Черных А. Г., Андросов А. Н. Проблемные аспекты развития малоэтажного жилищного строительства в России. — М.: ИНФРА М, 2011. — 278 с.
5. Асеева Р. М., Серков Б. Б., Сивенков А. Б. Горение древесины и ее пожароопасные свойства. — М.: Академия ГПС МЧС России, 2010. — 262 с.
6. BS EN 1995-1-2:2004; Eurocode 5: Design of timber structure. Part 1-2: General — Structural fire design. — Belgium, Brussels: CEN, 2004.
7. Fire safety in timber buildings. Technical guideline for Europe / SP Report 2010:19. URL: http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/Fire_Timber_Ch_5-7.pdf (дата обращения: 10.10.2015).
8. White R. H. Analytical methods for determining fire resistance of timber members // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. — New York: Springer, 2016. — P. 1979–2011. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_55.
9. White R. H. Fire resistance of wood with members with directly applied protection // Proceedings of 11th International Conference and Exhibition “Fire and Materials 2009”. — UK, London: Interscience Communications, 2009. — 971 p. URL: <http://naldc.nal.usda.gov/download/44930/PDF> (дата обращения: 10.10.2015).

10. Покровская Е. Н., Портнов Ф. А., Кобелев А. А., Корольченко Д. А. Дымообразующая способность и токсичность продуктов сгорания древесных материалов при поверхностном модифицировании элементоорганическими соединениями // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 10. — С. 40–45.
11. Лукьянов А. М., Корольченко Д. А., Агапов А. Г. О пожароопасности древесины при возведении мостов // Мир транспорта. — 2012. — Т. 10, № 4 (42). — С. 158–162.
12. Сайт HotWell. SIP-технологии. URL: www.hotwell.ru (дата обращения: 10.10.2015).
13. Fire resistance of timber frame wall construction // PU EUROPE excellence in insulation. — February 2013. — Factsheet no. 20. URL: <http://ecotermix.ru/wp-content/uploads/2013/12/Test-PU-Europe.pdf> (дата обращения: 10.10.2015).
14. Just A., Schmid J., König J. Gypsum plasterboards used as fire protection — analysis of a database / SP Report 2010:29. — Stockholm, 2010.
15. Sultan M. A. Factors affecting fire resistance performance of lightweight frame floor assemblies // Proceedings of 8th International Fire Science and Engineering Conference. Interflam'99. — Scotland, Edinburg, 1999. — P. 897–910.
16. Шутов Ф. А. Огнестойкие материалы для снижения пожарной опасности малоэтажных объектов из древесины // Технологии техносферной безопасности : интернет-журнал. — 2014. — № 3 (55). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-3/22-03-14.ttb.pdf> (дата обращения: 15.10.2015).
17. Шутов Ф. А., Ярборо Д. Теплоизоляционные и экологические характеристики огнестойкого полимерного пенокомпозиата PENOCOM® // Технологии техносферной безопасности : интернет-журнал. — 2014. — № 4 (56). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-4/37-04-14.ttb.pdf> (дата обращения: 15.10.2015).
18. Круглов Е. Ю., Шутов Ф. А., Асеева Р. М., Серков Б. Б., Сивенков А. Б. Огнестойкость ограждающих легких деревянных каркасных конструкций с теплоизоляцией из пенокомпозиата “Penocom” // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. — 2015. — № 3. — С. 63–70.
19. СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции (актуализированная ред. СНиП II-25-80). — Введ. 20.05.2011. — М. : ОАО “ЦПП”, 2011.
20. Babrauskas V. Wood char depth: interpretation in fire investigations // Proceedings of International Symposium on Fire Investigation. United Kingdom, Moreton-in-Marsh : Fire Science and Technology Inc., 2004. — 12 p.

Материал поступил в редакцию 26 октября 2015 г.

Для цитирования: Шутов Ф. А., Круглов Е. Ю., Асеева Р. М., Серков Б. Б., Сивенков А. Б. Влияние теплоизоляции из полимерного пенокомпозиата “Реносом” на огнестойкость ограждающих деревянных каркасных конструкций // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 1. — С. 28–37. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.01.28-37.

English

INFLUENCE OF POLYMERIC FOAM COMPOSITE “PENOCOM” ON FIRE RESISTANCE OF WOOD FRAME SEPARATING CONSTRUCTIONS

SHUTOV F. A., Doctor of Technical Sciences, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya Sq., 9, Moscow, 125047, Russian Federation; e-mail address: fashutov@mail.ru)

KRUGLOV E. Yu., Researcher, Educational-Scientific Centre of Problems of Fire Safety in Construction, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail address: 89268196698@mail.ru)

ASEEVA R. M., Doctor of Chemical Sciences, Professor of Fire Safety in Construction Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail address: rm-aseeva@yandex.ru)

SERKOV B. B., Doctor of Technical Sciences, Professor of Fire Safety in Construction Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail address: serkov@antip.ru)

SIVENKOV A. B., Doctor of Technical Sciences, Professor of Fire Safety in Construction Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail address: sivenkov01@mail.ru)

ABSTRACT

Using a small-scale fire tests three separating construction assemblies modeling fragments of walls and partitions in timber buildings of light frame type have been studied. As a thermal insulation layer have used a commercial polymer foam composite “Penocom” with different density between 43.7–140 kg/m³. It was established that the actual limit of fire resistance of separating constructions for the integrity and insulating capacity (EI) was 95–110.3 min. It was found that there is a tendency: increasing the fire resistance of four-layers structures corresponds decreasing the density foam composites “Penocom” from 83 to 43.7 kg/m³. The average values of the heat flow in the small-scale fire oven at the standard mode of fire at different periods of fire actions have been measured as well. These values correspond the relationship found at standard large-scale apparatus. Thermal conductivity of polymer foam composite was calculated.

Keywords: wood; fire resistance; separating frame constructions; thermal insulation; polymeric foam composite.

REFERENCES

1. Buchanan A., Östman B., Frangi A. *Fire resistance of timber structures: a report for the National Institute of Standards and Technology*. Available at: www.nist.gov/el/fire_research/upload/NIST-Timber-Report-v4-Copy.pdf (Accessed 20 October 2015).
2. Barber D., Gerard R. High-rise timber buildings. *Fire Protection Engineering*, July 2014. Available at: http://www.sfpe.org/?page=2014_Q3_1 (Accessed 20 October 2015).
3. 10 of the best wooden skyscrapers. Available at: <https://www.worldbuild365.com/news/detail/sawxeob2a/building-architecture/10-of-the-best-wooden-skyscrapers> (Accessed 20 October 2015).
4. Kazeykin V. S., Baronin S. A., Chernykh A. G., Androsova A. N. *Problemy razvitiya malo-etazhnogo zhillishchnogo stroitelstva* [Problem aspects of development of low housing construction in Russia]. Moscow, INFRA M Publ., 2011. 278 p.
5. Aseeva R. M., Serkov B. B., Sivenkov A. B. *Goreniye drevesiny i yeye pozharoopasnyye svoystva* [Burning wood and its fire behavior]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2010. 262 p.
6. *BS EN 1995-1-2:2004: Eurocode 5: Design of timber structure. Part 1-2: General — Structural fire design*. Belgium, Brussels, CEN, 2004.
7. Fire Safety in Timber Buildings. Technical Guideline for Europe, *SP Report 2010:19*. Available at: http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/Fire_Timber_Ch_5-7.pdf (Accessed 10 October 2015).
8. White R. H. Analytical methods for determining fire resistance of timber members. In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. New York, Springer, 2016, pp. 1979–2011. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_55.
9. White R. H. Fire resistance of wood with members with directly applied protection. *Proceedings of 11th International Conference and Exhibition “Fire and Materials 2009”*. UK, London, Interscience Communications, 2009. 971 p. Available at: <http://naldc.nal.usda.gov/download/44930/PDF> (Accessed 10 October 2015).
10. Pokrovskaya E. N., Portnov F. A., Kobelev A. A., Korolchenko D. A. Dymobrazuyushchaya sposobnost i toksichnost produktov sgoraniya drevesnykh materialov pri poverkhnostnom modifitsirovani elementoorganicheskimi soyedineniyami [The smoke generation property and combustion products toxicity of wood which was modified by organoelemental compounds]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 10, pp. 40–45.
11. Lukianov A. M., Korolchenko D. A., Agapov A. G. O pozharoopasnosti drevesiny pri vozvedenii mostov [Fire hazards of the timber during bridge construction]. *Mir transporta — World of Transport and Transportation*, 2012, vol. 10, no. 4 (42), pp. 158–162.

12. Web-site HotWell. SIP technologies. Available at: www.hotwell.ru (Accessed 10 October 2015) (in Russian).
13. Fire resistance of timber frame wall construction. In: *PU EUROPE excellence in insulation, February 2013, Factsheet no. 20*. Available at: <http://ecotermix.ru/wp-content/uploads/2013/12/Test-PU-Europe.pdf> (Accessed 10 October 2015).
14. Just A., Schmid J., König J. Gypsum plasterboards used as fire protection — analysis of a database. *SP Report 2010:29*. Stockholm, 2010.
15. Sultan M. A. Factors affecting fire resistance performance of lightweight frame floor assemblies. *Proceedings of 8th International Fire Science and Engineering Conference. Interflam '99*. Edinburgh, Scotland, 1999, pp. 897–910.
16. Shutov F. A. Ognestoykiye materialy dlya snizheniya pozharnoy opasnosti maloetazhnykh ob'yektov iz drevesiny [Fire-resistant materials to reduce the risk of fire of low-rise objects of wood]. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti. Internet-zhurnal — Technologies of Technosphere Safety. Internet-Journal*, 2014, no. 3 (55). Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-3/22-03-14.ttb.pdf> (Accessed 15 October 2015).
17. Shutov F. A., Yarbrough D. Teploizolyatsionnyye i ekologicheskiye kharakteristiki ognestoykogo polimernogo penokompozita PENOCOM® [Insulation and environmental specifications flame retardant polymer foam composites PENOCOM®]. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti. Internet-zhurnal — Technologies of Technosphere Safety. Internet-Journal*, 2014, no. 4 (56). Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-4/37-04-14.ttb.pdf> (Accessed 15 October 2015).
18. Kruglov E. Yu., Shutov F. A., Aseeva R. M., Serkov B. B., Sivenkov A. B. Ognestoykost ograzhdayushchikh legkikh derevyannykh karkasnykh konstruktsiy s teploizolyatsiyey iz penokompozita “PENOCOM” [Fire resistance of cladding light wooden framework structures with thermal insulation made of foam composite PENOCOM]. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya — Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2015, no. 3, pp. 63–70.
19. Set of rules 64.13330.2011. Timber structures. Moscow, Center of Design Production in Construction Publ., 2011 (in Russian).
20. Babrauskas V. Wood char depth: interpretation in fire investigations. *Proceedings of International Symposium on Fire Investigation*. United Kingdom, Moreton-in-Marsh, Fire Science and Technology Inc., 2004. 12 p.

For citation: Shutov F. A., Kruglov E. Yu., Aseeva R. M., Serkov B. B., Sivenkov A. B. Vliyaniye teploizolyatsii iz polimernogo penokompozita “Penocom” na ognestoykost ograzhdayushchikh derevyannykh karkasnykh konstruktsiy [Influence of polymeric foam composite “Penocom” on fire resistance of wood frame separating constructions]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 1, pp. 28–37. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.01.28-37.