

Е.Ю. Круглов¹, Р.М. Асеева¹, Б.Б. Серков¹, Ф.А. Шутов²
(¹Академия ГПС МЧС России, ²РГХТУ им Д.И. Менделеева;
e-mail: 89268196698@mail.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ОГРАЖДАЮЩИХ ДЕРЕВЯННЫХ ЛЁГКИХ КАРКАСНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ СТАНДАРТНОМ РЕЖИМЕ ПОЖАРА

Представлена модель нестационарного прогрева ограждающих деревянных лёгких каркасных конструкций для предсказания их огнестойкости по признакам целостности и теплоизолирующей способности.

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

E.Y. Kruglov, R.M. Aseeva, A.B. Serkov, F.A. Shutov

MODELLING OF HEAT TRANSFER IN CLADDING LIGHT WOODEN FRAME CONSTRUCTIONS AT STANDARD FIRE MODE

It was proposed the model of non-stationary heating flow for cladding wooden light frame structures to predict their fire resistance behavior using two parameters: integrity and thermal insulation ability.

Key words: wooden, fire resistance, cladding frame structures, thermal insulation, the polymeric foam composite.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 1 июля 2016 г.

В настоящее время в России широкое распространение получило строительство деревянных зданий и сооружений лёгкого каркасного типа, потребность в которых постоянно возрастает. Наблюдается высокий темп малоэтажного строительства торговых центров, офисов, жилых и других деревянных зданий этого типа. Их обычно относят к V степени огнестойкости, предел которых по закону РФ № 123-ФЗ не нормируется.

Между тем за рубежом уже многие годы практикуется строительство многоэтажных зданий (от 3 до 6 этажей) с применением деревянных лёгких каркасных конструкций. Проектирование и строительство таких деревянных зданий и сооружений регламентируется стандартом EN 1995-1-2, Eurocode 5 "Design of timber structures".

Деревянные лёгкие каркасные конструкции с несущими и ограждающими функциями являются многослойными и состоят из деревянного каркаса и обшивок (облицовочных плит), теплоизоляции между ними. К лёгким каркасным конструкциям традиционно относят конструкции из деревянных элементов (стоек, балок), наименьший размер сечения которых не превышает 80 мм.

Из-за отсутствия в России нормируемых требований по огнестойкости малоэтажных деревянных зданий лёгкого каркасного типа при их строительстве часто применяют самозатухающие блочный или экструзионный **пенополистирол (ППС-С)**, в меньшей степени – **пенополиуретан (ППУ)**. Однако, ППС-С при пожаре довольно легко воспламеняется, опасен скрытым распространением горения внутри конструкций, образованием расплава, дыма и токсичных газов. ППУ при горении также может плавиться, выделяя очень токсичные газы (цианиды и фосген).

Стремление повысить пожарную безопасность и огнестойкость деревянных лёгких каркасных зданий и сооружений привело к разработке и производству облицовочных и теплоизоляционных материалов нового поколения. Новый облицовочный материал – **СМЛ (стекломагнезитовые листы)**, превосходит по огнестойкости гипсокартонные и гипсоволокнистые плиты. Он выдерживает действие открытого пламени с температурой 1200 °С в течение 2 часов. Возрос интерес к трудногоряемым неплавким полимерным **теплоизоляционным материалам (ТИМ)**. Установлено, что теплоизоляция из пенополиизоцианурата может успешно конкурировать с негорючим стекловолоконным ТИМ в обеспечении предела огнестойкости REI30 деревянных лёгких каркасных стен с гипсокартонной и OSB облицовочной плитами [1].

Исследования показали, что применение в качестве теплоизоляции инновационного полимерного пеномкопозита "Penosom" вносит существенный вклад в повышение огнестойкости ограждающих деревянных лёгких каркасных конструкций [2, 3].

Мощным современным средством исследования состояния строительных конструкций в условиях самых разнообразных внешних воздействий является математическое моделирование. За последние два десятилетия были разработаны разные модели и программные комплексы расчёта для предсказания огнестойкости деревянных лёгких каркасных конструкций с несущими и ограждающими функциями [4-6]. Показаны возможности применения для расчёта огнестойкости деревянных конструкций программных отечественных комплексов серии "Огнезащита" [7], которые были созданы для теплотехнических расчётов конструкций из стали и железобетона [8]. Широкую известность и популярность в мировом инженерном сообществе получила программная система американской компании ANSYS Inc., использующая МКЭ и многоцелевые расчётные комплексы для разных типов анализа реальных процессов в рассматриваемых материальных объектах.

Огнестойкость многослойных деревянных лёгких каркасных конструкций рассчитывают по аддитивному методу элементов, входящих в конструкции (Component Additive Method – CAM), впервые разработанному Национальным исследовательским комитетом Канады [9]. По этому методу предел огнестойкости определяют как сумму временных вкладов каждого элемента системы (облицовочных слоев, каркаса, ТИМ, узлов соединения). При этом учитывают с использованием соответствующих коэффициентов взаимное расположение и типы элементов конструкции, в том числе узлы соединения. Для расчёта огнестойкости деревянных конструкций необходимы вводные данные о тепло-

физических и механических свойствах элементов конструкции в зависимости от температуры. В стандарте EN 1995-1-2, Eurocode 5 и в более поздней рекомендации для расчёта огнестойкости деревянных каркасных конструкций [10] приведены данные лишь для ограниченного числа видов облицовочных материалов (гипсокартонные и гипсоволокнистые плиты, натуральная древесина и плиты на её основе – фанера, ДСП, ДВП, OSB), а также минеральной теплоизоляции (glass wool, stone wool).

Ниже представлена модель нестационарного прогрева ограждающих деревянных лёгких каркасных конструкций с облицовочными плитами и ТИМ нового поколения: стекломагнезитовыми плитами и полимерным пенокомпозитом "Penocom". Для теплотехнического расчёта огнестойкости ограждающих конструкций использован программный комплекс "ANSYS Mechanical". Представляло интерес сравнить влияние на огнестойкость ограждающих конструкций пенокомпозита "Penocom" и неорганической теплоизоляции Rockwool Light, а также сравнить результаты расчёта с экспериментально полученными при испытании образцов в маломасштабной печи по стандартному режиму пожара. Образцы ограждающих конструкций имитируют фрагменты несущих стен (перегородок) деревянного каркасного здания.

В общем случае для учёта обугливания деревянных элементов каркаса математически теплопередача в системе ограждающей конструкции должна быть представлена в двумерной постановке задачи:

$$C_p \rho (\partial T / \partial t) = \partial / \partial x (\lambda \partial T / \partial x) + \partial / \partial y (\lambda \partial T / \partial y) \pm Q, \quad (1),$$

где C_p – удельная теплоемкость;

ρ – плотность;

T – температура;

t – время;

x, y – пространственные координаты;

λ – теплопроводность;

Q – изменение внутренней тепловой энергии, обусловленной протекающими в материале элемента конструкции физико-химическими процессами.

Указанные показатели зависят от температуры. Начальные и граничные условия рассматриваются по каждому элементу конструкции.

Однако, для анализа теплопередачи в ограждающих конструкциях с целью оценки их огнестойкости по признакам целостности и теплоизолирующей способности (EI) достаточно использовать дифференциальные уравнения сохранения энергии и массы в системе, в предположении переноса тепла и продуктов разложения в одном направлении.

Типичная схема теплопередачи через ограждающую деревянную каркасную конструкцию представлена на рис. 1.

В условиях воздействия стандартного температурно-временного режима пожара нарастание температуры среды в камере огневой печи соответствует уравнению:

$$T = 345 \lg(8\tau + 1) + T_0, \quad (2)$$

где T и T_0 – текущая и начальная температура в огневой камере;

τ – время, мин.

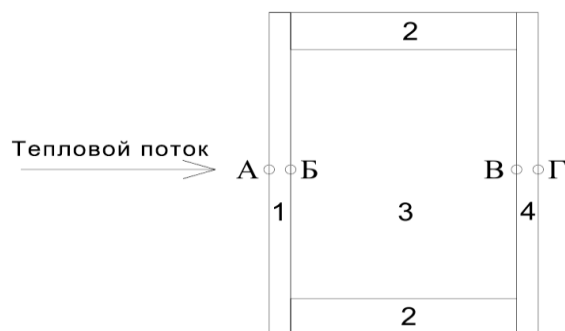


Рис. 1. Схема расположения элементов ограждающей деревянной каркасной конструкции и локация температурных измерений:

- 1 – облицовочные плита со стороны огневого воздействия; 2 – деревянные стойки;
 3 – теплоизоляция; 4 – облицовочная плита на обратной стороне конструкции;
 А, Б, В, Г – локация спаев термопар T_n

Рассмотрим возможные физико-химические процессы, протекающие в отдельных элементах изучаемых ограждающих деревянных каркасных конструкций. Первый слой СМЛ со стороны огневого воздействия является высокотермостойким. Можно полагать, что он не подвергается термическому разложению. В слое минеральной теплоизоляции могут протекать реакции дегидратации и процессы, влияющие на теплопередачу: испарение воды и конденсация, массоперенос пара и воды через пористый материал. Слой полимерной теплоизоляции при нагревании выше определённой температуры (T_{np}) разлагается выделением газообразных летучих продуктов и образованием карбонизованного остатка. В этом случае можно рассматривать два варианта расчёта теплопередачи через теплоизоляцию.

1. Твёрдая матрица мгновенно пиролизуется при достижении T_{np} вне зависимости от скорости нагрева. Образующийся кокс не влияет на транспорт продуктов разложения (принцип постоянства давления в κ -фазе).

2. Пиролиз твёрдой матрицы является многостадийным с соответствующими кинетическими параметрами стадий. Выход продуктов пиролиза зависит от давления в пористой среде. Из-за усадки ТИМ разной природы (в результате плавления или "выгорания"), пространство между элементами конструкции и теплоизоляцией становится частично незаполненным (рис. 2), что сказывается на процессе теплопередачи. Усиление переноса тепла через этот слой за счёт теплопроводности, конвекции и лучистой энергии должно в принципе снижать огнестойкость ограждающей конструкции в целом. Результирующий лучистый теплообмен в пустой полости между поверхностями элементов конструкции зависит от угловых коэффициентов излучения [8].

В качестве контролирующего параметра обугливания органических элементов ограждающей конструкции (древесины, пенокомпозита "Реносом", OSB) принята температура $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ [15]. Максимальная температура $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ на необогреваемой стороне конструкции использована как реперная точка потери её теплоизолирующей способности.

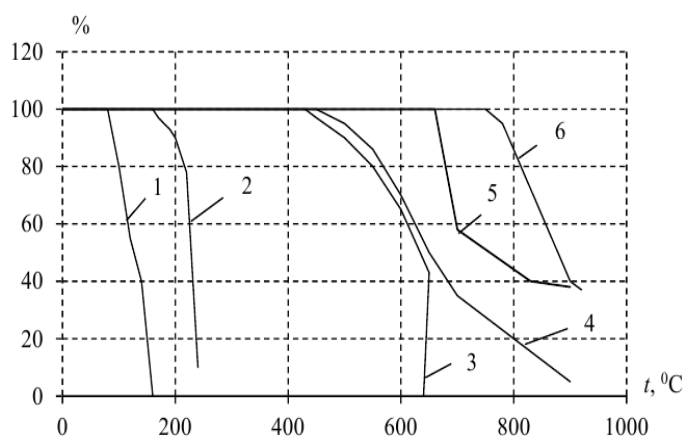


Рис. 2. Влияние температуры на линейную усадку ТИМ:

1 – ППС ($\rho = 26 \text{ кг/м}^3$); 2 – ППУ ($\rho = 30 \text{ кг/м}^3$); 3 – стекловолокнистая плита ($\rho = 12 \text{ кг/м}^3$); 4* – пенокомпозит "Penosom" ($\rho = 140 \text{ кг/м}^3$); 5 – базальтовая волокнистая теплоизоляция ($\rho = 38 \text{ кг/м}^3$); 6* – Rockwool Light ($\rho = 36 \text{ кг/м}^3$). *Нагрев со скоростью $12 \text{ }^\circ\text{C/мин}$ на воздухе

Рис. 2 показывает, что плавление и усадка ППС начинается при $110 \text{ }^\circ\text{C}$, ППУ – с $170 \text{ }^\circ\text{C}$. Стекловолокнистая теплоизоляция плавится выше $430 \text{ }^\circ\text{C}$, а базальтовая теплоизоляция – выше $650 \text{ }^\circ\text{C}$. При $700 \text{ }^\circ\text{C}$ её усадка составляет 42% , а при $900 \text{ }^\circ\text{C}$ – 62% [8]. При этом стекловолокнистая теплоизоляция теряет 6% массы к $310 \text{ }^\circ\text{C}$ за счёт разложения связующего и далее сохраняет массу постоянной, а базальтовая к моменту плавления теряет 3% массы и 6% к $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Таким образом, усадка минеральной теплоизоляции происходит исключительно в результате плавления волокон. Используемый образец пенокомпозита "Penosom" не плавится. Его усадка наблюдается при температуре выше $470\text{-}480 \text{ }^\circ\text{C}$ вследствие частичного "выгорания" пенококса при нагревании на воздухе, к $600 \text{ }^\circ\text{C}$ она достигает 30% . В ограждающей конструкции при испытании при стандартном режиме пожара в огневой печи концентрация кислорода меньше атмосферной и процесс уменьшения толщины (усадки) полимерной теплоизоляции "Penosom" должен быть более медленным. По формоустойчивости при нагреве пенокомпозит "Penosom" превосходит стекловолокнистую теплоизоляцию. Образец Rockwool Light Scandic представляет собой наиболее тугоплавкий ТИМ. Его усадка начинается при температуре выше $750 \text{ }^\circ\text{C}$. От базальтовой теплоизоляции (рис. 2, кривая 5 [8]), он отличается, по-видимому, более высоким суммарным содержанием оксидов кремния и алюминия и более низким содержанием оксидов щелочноземельных металлов (Ca и Mg).

Уменьшение массы в результате термического разложения полимерного пенокомпозита "Penosom" при сохранении его объёма означает уменьшение плотности и изменение пористости ТИМ на этом этапе теплового воздействия. Последующая усадка ТИМ в результате пиролиза (выгорания) пенококса приводит к дальнейшему снижению его плотности и пористости.

Текущую пористость пенокомпозита, с учётом степени превращения при разложении (α), количества образующегося коксового остатка (K) и усадки (γ), можно определить по формуле [8]:

$$\varphi = 1 - \{\rho_0' [1 - \alpha(1 - K)](1 - \varphi_0)\} / \rho'(1 - \gamma), \quad (3)$$

где φ_0 и ρ_0' – начальные значения пористости и плотности каркаса пенокомпозита;

ρ' – текущая плотность полимерного каркаса.

Так как начальная плотность пенокомпозита равна $\rho_0 = (1 - \varphi_0)\rho_0'$; текущая плотность пенокомпозита с учётом его карбонизации и усадки соответствует уравнению:

$$\rho = (1 - \varphi)\rho' = \rho_0[1 - \alpha(1 - K)] / (1 - \gamma). \quad (4)$$

Математическая модель тепломассопереноса в ограждающих деревянных лёгких каркасных конструкциях с указанными выше элементами и полимерным ТИМ включает в себя следующие дифференциальные уравнения:

1. Уравнение сохранения энергии:

$$(1 - \varphi)\rho'c_p \partial T / \partial t = \partial / \partial x (\lambda \partial T / \partial x) + m''c_p'' \partial T / \partial x - L_v R. \quad (5)$$

2. Уравнение массопереноса продуктов термического разложения ТИМ:

$$C_m \partial p / \partial t = \partial / \partial x (\lambda_m \partial p / \partial x) + \partial / \partial x (K_D \partial p / \partial x) + R. \quad (6)$$

Начальные условия для уравнения сохранения энергии (5) для всех элементов конструкции и уравнения (6):

$$T_{t=0} = T_0; p_{t=0} = p_0. \quad (7)$$

Граничное условие на обогреваемой поверхности ограждающей конструкции:

$$-\lambda(\partial T / \partial x) = \alpha_f(T_f - T_{смл}) + \varepsilon\sigma(T_f^4 - T_{смл}^4). \quad (8)$$

Граничное условие на необогреваемой стороне ограждающей конструкции:

$$-\lambda(\partial T / \partial x) = \alpha_e(T_x - T_e) + \varepsilon\sigma(T_x^4 - T_e^4). \quad (9)$$

При отсутствии усадочных явлений и плотном соприкосновении поверхности элементов ограждающей конструкции условия на границах между отдельными слоями отвечают равенству температур и плотности тепловых потоков:

$$T|_{x_{гр-0}} = T|_{x_{гр+0}}; \quad (10)$$

$$-\lambda(\partial T / \partial x)|_{x_{гр-0}} = -\lambda(\partial T / \partial x)|_{x_{гр+0}}. \quad (11)$$

При усадке теплоизоляции и возникновении пустого пространства между СМЛ и теплоизоляцией со стороны огневого воздействия должны быть учтены условия на границе СМЛ и полости, а также на границе полости и поверхности теплоизоляции (с угловыми коэффициентами излучения поверхностей, ограждающих полость).

Условие на границе поверхности СМЛ и полости может быть описано уравнением:

$$-\lambda(\partial T/\partial x) = \alpha_c(T_{смл} - T_c) + F_{12} \varepsilon \sigma (T_{смл}^4 - T_{тим}^4). \quad (12)$$

Соответственно, условие на границе полости и поверхности теплоизоляции:

$$-\lambda(\partial T/\partial x) = \alpha_c(T_c - T_{тим}) - F_{21} \varepsilon \sigma (T_{тим}^4 - T_{смл}^4). \quad (13)$$

Рассматриваемой системе ограждающей конструкции присуще свойство взаимного обмена излучением поверхностей с учётом угловых коэффициентов $F_{21} = F_{12}$ [9] и свойство замкнутости. Последнее состоит в том, что сумма всех угловых коэффициентов излучения на поверхности, ограждающей полости, равна 1 [8].

В приведённых выше уравнениях с граничными условиями приняты следующие обозначения:

ϕ – пористость; ρ – плотность; λ – коэффициент теплопроводности; c_p – теплоёмкость; T – температура; t – время; p – давление; L_v – энтальпия газификации; m'' – массовая скорость фильтрации пиролизного газа; α – степень превращения при пиролизе; $R = d\alpha/dt$ – скорость превращения (газовыделения при пиролизе); α_i – коэффициент теплообмена; ε – степень черноты; σ – постоянная Стефана-Больцмана; C_m – ёмкость пористого материала по отношению к газам пиролиза с молекулярной массой M : $C_m = M \phi / RT$; λ_m – коэффициент молярного переноса пиролизного газа: $\lambda_m = \phi k / \nu$, где k , ν – коэффициент газопроницаемости и кинематическая вязкость пиролизного газа; K_D – коэффициент диффузии газа. Размерные характеристики представлены в системе СИ.

На начальном этапе моделирования теплопереноса в ограждающей конструкции с полимерной теплоизоляцией принят алгоритм расчёта по первому варианту с применением только уравнения нестационарной теплопроводности без тепловых стоков. Важно было выяснить, насколько недооценивается (или переоценивается), по сравнению с экспериментом, вклад реальных физико-химических процессов.

Для расчёта строится геометрическая модель образца конструкции, которая свободно разбивается на сетку конечных элементов с шагом 1 мм.

При расчёте теплопередачи через ограждающую конструкцию приняты теплофизические характеристики СМЛ и пенокомпозиата, полученные ранее по экспериментальным результатам до момента начала разложения теплоизоляции [7]. Теплопроводность образующегося далее пенококса принята равной 0,070 Вт/м×К. Коэффициент теплообмена для условий в используемой огневой маломасштабной печи принят постоянным $a_f = 15$ Вт/м²К.

На рис. 3 показаны результаты расчёта температуры на поверхности элементов конструкции, в сравнении с экспериментальными значениями [7].

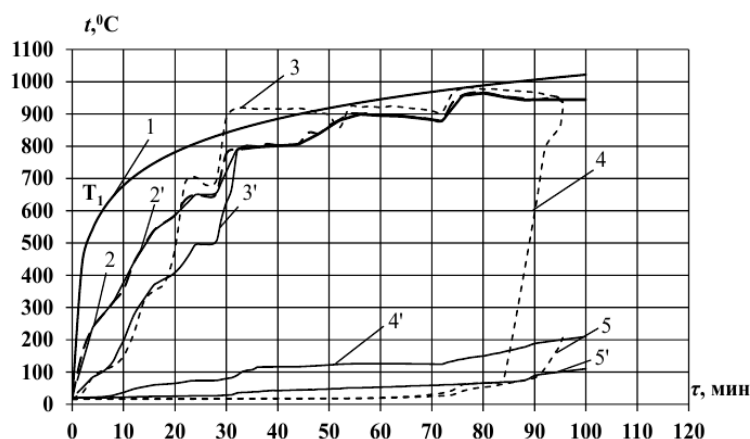


Рис. 3. Температурно-временные кривые прогрева элементов ограждающей конструкции № 1 при стандартном режиме пожара:

1 – температура в печи; 2 – на внешней поверхности СМЛ № 1; 3 – с тыльной стороны поверхности СМЛ № 1 (на поверхности теплоизоляции); 4 – на внутренней поверхности СМЛ № 2; 5 – на необогреваемой поверхности конструкции (СМЛ № 2). 2'; 3'; 4'; 5' – расчёт

Как видно из рис. 3, экспериментальное значение предела огнестойкости трехслойной ограждающей конструкции по признаку теплоизолирующей способности и целостности равно 95 мин., а по расчёту – около 100 мин. Фактический предел огнестойкости конструкции P_{ϕ} включает следующие вклады её элементов:

$$P_{\phi} = (13)_{\text{СМЛ1}} + (75)_{\text{РС}} + (7)_{\text{СМЛ2}} = 95 \text{ мин.}$$

Из-за аккумуляции тепловой энергии на поверхности теплоизоляции со стороны огневой экспозиции на 20-й мин., наблюдается резкое увеличение температуры на межфазной границе её с СМЛ 1. Такая динамика в некоторой степени обусловлена, по-видимому, экзотермической реакцией окисления пенококса, которая начинает активно протекать при температуре свыше 450-480 °С. Недоучёт теплового эффекта этого процесса приводит к занижению расчётной температурной кривой на рассматриваемом этапе нагрева. Другая картина наблюдается на межфазной поверхности полимерной теплоизоляции и СМЛ 2. Расчётные значения температуры при нагреве конструкции в течение почти

85 мин., немного превышают экспериментально установленные, но затем они становятся ниже. Близкими к расчётным являются значения температур, фиксируемые на необогреваемой поверхности ограждающей конструкции, хотя расчёт указывает на более существенный вклад в предел огнестойкости последнего элемента СМЛ 2, по сравнению с экспериментом.

Аналогичным образом проведён анализ и расчёт четырёхслойной ограждающей конструкции № 2, включающей элементы: СМЛ 1 ($\delta = 0,006 \text{ м}$) – СМЛ 2 ($\delta = 0,006 \text{ м}$) – теплоизоляция "Репосом" ($\delta = 0,15 \text{ м}$, $\rho = 83 \text{ кг/м}^3$) – плита OSB ($\delta = 0,009 \text{ м}$). Толщина конструкции $\Delta = 171 \text{ мм}$. Фактический предел огнестойкости конструкции составляет 97,2 мин., и включает следующие вклады элементов:

$$P_{\phi} = \sum(\tau_i) = (18,6)_{\text{СМЛ1}} + (4)_{\text{СМЛ2}} + (73,7)_{\text{РС}} + (0,9)_{\text{OSB}} = 97,2 \text{ мин.}$$

Вклад двух неразрушающихся СМЛ облицовок конструкции в её теплоизолирующую способность составляет 23,3 %, при этом наибольшую роль играет первый, внешний слой. Полимерная теплоизоляция значительно повышает огнестойкость ограждающей конструкции, её вклад составляет 76,7 %. Плита OSB практически не влияет на общую огнестойкость конструкции, хотя до окончания испытания она сохраняла свою целостность. На рис. 4 дано сравнение результатов расчёта и измерения температуры на поверхности элементов ограждающей конструкции №2 при стандартном режиме пожара. При расчёте использованы известные теплофизические свойства плиты OSB в зависимости от температуры [10].

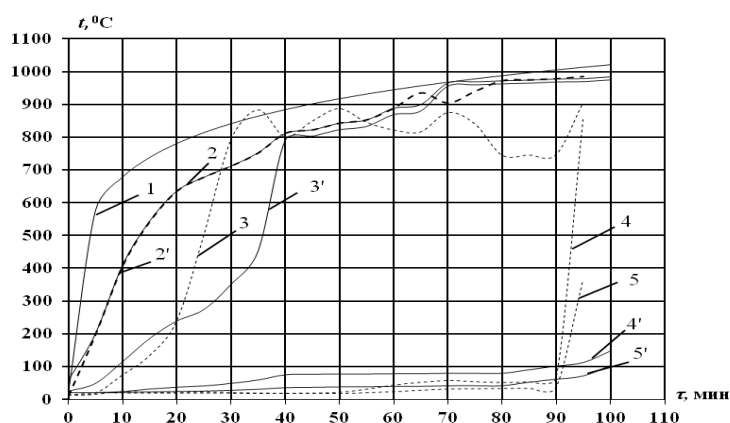


Рис. 4. Динамика изменения температуры на поверхности элементов конструкции в зависимости от времени стандартного огневого воздействия:

- 1 – температура в печи; 2 – на поверхности СМЛ 1;
- 3 – на поверхности теплоизоляции "Репосом" (тыльная сторона СМЛ 2);
- 4 – на поверхности OSB (тыльная сторона теплоизоляции);
- 5 – на не обогреваемой поверхности OSB; 2', 3', 4', 5' –расчёт

Расчёт показывает, что облицовка ограждающей конструкции двумя слоями СМЛ замедляет нагрев полимерной теплоизоляции, Температура начала её разложения в этом случае достигается почти на 10 мин. позже, чем при облицовке одним слоем. Однако общий характер последующего быстрых изменений температуры на межфазной поверхности СМЛ 2 – теплоизоляции сохраняется. Расчёт фиксирует естественную аккумуляцию тепла на поверхности теплоизоляции (одинаковый характер подъема температуры кривых 3 и 3' в диапазоне 450 – 800 °C), но заметна явная недооценка реальных термохимических процессов, протекающих в полимерной теплоизоляции при стандартном огневом действии на конструкцию. Это приводит к некоторому завышению расчётного предела огнестойкости конструкции по признаку EI. На последующем этапе математического моделирования огнестойкости подобной конструкции с полимерной теплоизоляцией "Репосом" следует учитывать более сложное её поведение, проводить теплотехнический расчёт по второму варианту.

Представляло интерес провести по программе ANSYS Mechanical расчёт теплоизолирующей способности ограждающей деревянной каркасной конструкции с базальтосланцевой теплоизоляцией Rockwool Scandic такой же толщины, как и полимерной. Теплофизические свойства базальтовой теплоизоляции в зависимости от температуры приняты в соответствии с рекомендацией [10].

Образец № 3 представлял ограждающую конструкцию с элементами: СМЛ ($\delta = 0,01 \text{ м}$) – Rockwool Scandic ($\delta = 0,150 \text{ м}$; $\rho = 36 \text{ кг/м}^3$) – OSB ($\delta = 0,009 \text{ м}$). Общая толщина конструкции $\Delta = 169 \text{ мм}$. По комбинации материалов облицовок (СМЛ и OSB), толщине деревянных стоек конструкция близка к образцу № 2, но фактический предел огнестойкости конструкции с базальтосланцевой теплоизоляцией оказался существенно ниже [7]:

$$P_{\phi} = \sum (\tau_i) = (15)_{\text{СМЛ}} + (30)_{\text{Rockwool}} + (7)_{\text{OSB}} = 52 \text{ мин.}$$

На рис. 5 показаны результаты расчёта нестационарного прогрева элементов ограждающей конструкции № 3, в сравнении с экспериментально полученными значениями.

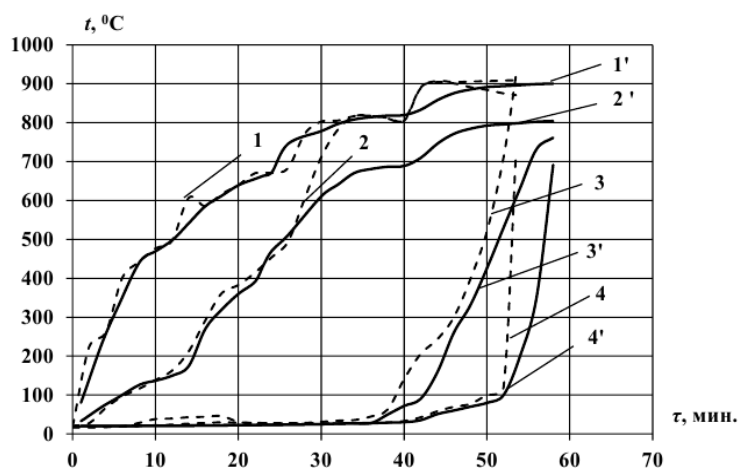


Рис. 5. Изменение температуры на поверхности элементов конструкции в зависимости от времени воздействия пожара:

- 1 – на внешней поверхности СМЛ со стороны огня;
- 2 – на тыльной стороне СМЛ (внешней поверхности теплоизоляции);
- 3 – на тыльной стороне теплоизоляции (внутренней поверхности OSB);
- 4 – на необогреваемой поверхности конструкции; 1'; 2'; 3'; 4' – расчёт

Как следует из рис. 5, наблюдается удовлетворительное совпадение расчётных и экспериментальных значений температуры на поверхности элементов конструкции. Соответственно, получено удовлетворительное совпадение расчётного (54 мин.) и фактического пределов огнестойкости конструкции (52 мин.), а также индивидуальных вкладов отдельных элементов в предел огнестойкости ограждающей конструкции.

Таким образом, при замене плиты Rockwool Lighth, толщиной 150 мм на полимерную теплоизоляцию "Репосом" такой же толщины позволяет существенно увеличить предел огнестойкости ограждающей деревянной лёгкой каркасной конструкции. Этот эффект обусловлен существенным уменьшением приведённого термического сопротивления R^{np} негорючей базальтволоконистой теплоизоляции выше 400 °С по сравнению с величиной R^{np} полимерной теплоизоляции из-за образования пенококса с более низким значением коэффициента теплопроводности, чем у минеральной теплоизоляции.

Литература

1. *Fire* resistance of timber frame wall constructions // PU EUROPE excellence in insulation – Factsheet № 20 (February 2013).
2. **Круглов Е.Ю., Шумов Ф.А., Асеева Р.М. и др.** Огнестойкость ограждающих лёгких деревянных каркасных конструкций с теплоизоляцией из пенокомпозита "Репосом" // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2015. № 3. С. 63-71.
3. **Шумов Ф.А., Круглов Е.Ю., Асеева Р.М. и др.** Влияние теплоизоляции из полимерного пенокомпозита "Репосом" на огнестойкость ограждающих деревянных каркасных конструкций // Пожаровзрывобезопасность. 2016. № 1. С. 28-37.
4. **Takeda H.** A model to predict fire resistance of non-load bearing wood-stud walls // Fire and Materials. 2003. Vol. 27. Pp. 19-39.
5. **Collier P.C.R., Buchanan A.H.** Fire Resistance of lightweight timber framed walls // Fire technology. 2002. Vol. 38. Pp.125-145.
6. **Frangi A., Schleifer V., Fontana M.** Design model for the verification of the separating function of light timber frame assemblies // Engineering Structures. 2010. Vol. 32. № 4. Pp. 1184-1195.
7. **Гаращенко Н.А.** Исследование эффективности огнезащиты деревоклееных конструкций: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. МГСУ, 2007.
8. **Страхов В.Л., Крутов А.М., Давыдкин Н.Ф.** Огнезащита строительных конструкций. ТИМР, 2000. 433 с.
9. **Benichou N., Sultan M.A.** Fire Resistance Performance of Lightweight Wood-Framed Assemblies // Fire Technology. 2000. Vol. 36. № 3. Pp. 184-219.
10. *Fire* safety in timber buildings. Technical guideline for Europe SP Report 2010, № 19. <http://www.jrc.ec.europa.eu>.