

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2020.4-1.5>

УДК 536.251:691::66.041.47

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОГНЕСТОЙКОСТИ

Ботян С.С., Жамойдик С.М., Кудряшов В.А., Нгуен Т.К.

*Цель.* На основе экспериментальных исследований и теоретических данных разработать методику и определить теплофизические характеристики цементно-армированных и минераловатных плит при повышенных температурах для решения задач огнестойкости.

*Методы.* Используются методы конечных элементов, параметрической оптимизации, экспериментальные исследования.

*Результаты.* Разработана методика и проведены экспериментальные исследования по прогреву исследуемых материалов в рамках границ температурно-временной кривой стандартного пожара: в стационарном тепловом режиме при температурах 275, 550, 770 и 1150 °С; в нестационарном тепловом режиме при температурах от 20 до 1000 °С. Разработаны расчетные конечно-элементные модели, сформулированы краевые (начальные и граничные) условия, с использованием методов параметрической оптимизации определены теплофизические характеристики цементно-армированных и минераловатных плит при повышенных температурах для решения задач огнестойкости.

*Область применения исследований.* Полученные результаты могут быть использованы для решения задач огнестойкости строительных конструкций на основе минеральных утеплителей и цементно-армированных плит, а также для определения теплофизических характеристик при повышенных температурах иных строительных материалов.

*Ключевые слова:* огнестойкость, теплофизические характеристики, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, плотность, экспериментальные исследования, метод конечных элементов, параметрическая оптимизация, стандартный температурный режим.

(Поступила в редакцию 3 февраля 2020 г.)

### Введение

В настоящее время при строительстве зданий широко применяются комбинированные строительные конструкции (с применением теплоизолирующих и огнезащитных материалов – пористых, минераловатных, вспучивающихся, дегидратирующих и пр.). Большинство существующих экспериментальных методов определения теплофизических характеристик строительных материалов в условиях стационарного и нестационарного теплового поля ограничены низкими значениями температур (до 200 °С). Способы оценки указанных теплофизических характеристик [1] не являются универсальными и могут быть распространены только на условия, близкие к экспериментальным, либо ограничены по видам строительных материалов.

Наиболее распространенным способом оценки теплофизических свойств строительных материалов в условиях пожара является решение обратных задач теории теплообмена [2]. Такие задачи были решены в 80-е и 90-е годы XX века для наиболее простых видов несущих строительных конструкций: стали, железобетона, древесины. Однако в силу сложности исходных сопряженных задач на практике обратные решения нередко формулировались с серьезными упрощениями, либо определяли усредненное значение температуропроводности материала, либо использовались упрощенные линейные зависимости. Указанные подходы дают приемлемый результат для огнеупорных материалов и материалов, мало уязвимых (не разрушающихся, слабо прогреваемых, слабо изменяющих свои свойства

в условиях высоких температур) при нагреве. Однако для современных материалов с эффективными видами теплоизолирующих и огнезащитных материалов – пористых, минераловатных, вспучивающихся, дегидратирующих и прочих необходима более точная оценка.

Оценка нелинейных температурозависимых теплофизических характеристик строительных материалов путем решения обратной задачи теплопроводности требует нетривиального решения дифференциальных уравнений теплопереноса, т. к. сопряжена с изменением фазового состава и высокотемпературными физико-химическими превращениями в материале. Поэтому для их решения целесообразно использовать методы конечных элементов и параметрической оптимизации.

При нагреве до повышенных температур (до 1000 °С) в строительных материалах в большинстве случаев происходят физико-химические превращения (фазовые переходы, пиролиз, деструкция), что существенно сказывается на динамике нагрева. Поэтому теплофизические характеристики должны определяться при аналогичных повышенных температурах, а в некоторых случаях и при аналогичных режимах нестационарного нагрева (например, соответствующего стандартной кривой пожара).

По нашему мнению, является актуальным направление исследований, в которых теплофизические характеристики образцов для оценки огнестойкости будут определяться на наиболее распространенном оборудовании, позволяющем создавать температуры, соответствующие температуре пожаров, – в камерных электропечах. В таких установках достаточно легко можно воссоздать режим нагрева по стандартной кривой пожара<sup>1</sup>. Однако это вынуждает производить оценку теплофизических характеристик в условиях резко нестационарного теплового процесса. Такая постановка задачи, с одной стороны, минимизирует возможные отклонения от реальных условий пожара, с другой стороны, требует использования сложных алгоритмов решения задач теплопроводности, что можно выполнить, применив программные системы конечно-элементного анализа.

### Основная часть

В уравнениях аналитической теории теплопроводности под теплофизическими характеристиками понимают коэффициент теплопроводности, плотность и удельную теплоемкость. Общий вид однородного дифференциального уравнения теплопроводности Фурье (без учета внутренних источников тепла «объемной плотности тепловыделения») показывает зависимость между температурой, временем и координатами для элементарного объема [2]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = -\frac{1}{c\rho} \left[ \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right]; \quad (1)$$

при этом

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}; \quad q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}; \quad q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (2)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость исследуемого материала, Дж/(кг·К);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $\rho$  – плотность образца, кг/м<sup>3</sup>;  $q_x$ ,  $q_y$ ,  $q_z$  – проекция плотности теплового потока на направление нормали к указанной грани, Вт/м<sup>2</sup>;  $T$  – температура, К;  $\tau$  – время, с.

Для стационарных условий дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье принимает вид:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0. \quad (3)$$

<sup>1</sup> ГОСТ 30247.0-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.normy.by/doc2.php?type=-1&id=365>. – Дата доступа: 03.02.2020.

Коэффициент теплопроводности показывает количество тепла, проходящее через тело в единицу времени через единицу изотермической поверхности при температурном градиенте, равном единице. Коэффициент теплопроводности является теплофизической характеристикой тела в отношении его способности к теплопроводности и зависит от химического состава тела (наличие примесей существенно влияет на теплопроводность) и физического состояния (фазовое состояние, степень кристаллизации, объем пористости материала и характеристики пористой структуры) [2]. Коэффициент теплопроводности обычно получают методами обратного решения дифференциального уравнения теплопроводности на основе экспериментальных данных, как правило, в стационарных условиях.

Удельная теплоемкость численно равна количеству теплоты, которое необходимо передать единичной массе вещества для изменения ее температуры на один градус. Величина удельной теплоемкости определяется строением вещества и в большинстве случаев зависит от температуры вещества. Удельную теплоемкость определяют исключительно в нестационарных условиях нагрева. Плотность зависит от температуры и агрегатного состояния вещества. В большинстве случаев при увеличении температуры плотность снижается.

**Экспериментально-расчетная методика для оценки теплофизических характеристик** строительных материалов при повышенных температурах включает:

– проведение серии экспериментальных исследований по прогреву исследуемых материалов:

для исследования плотности и коэффициента теплопроводности материала – в стационарном тепловом режиме при температурах 275, 550, 770 и 1150 °С;

для исследования удельной теплоемкости материала – в нестационарном тепловом режиме при температурах от 20 до 1000 °С;

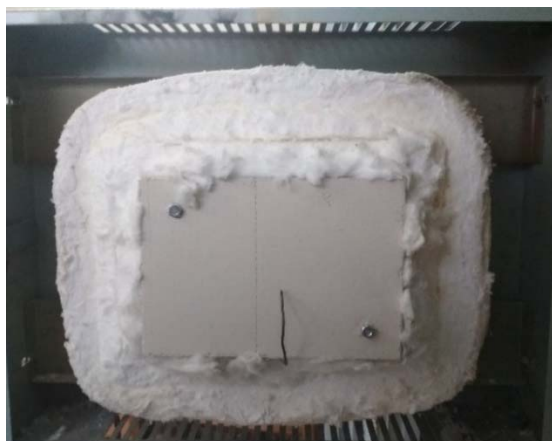
– определение зависимости плотности материала от температуры;

– решение обратной задачи теплопроводности методом параметрической оптимизации в расчетной конечно-элементной модели и получение зависимостей коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры в разработанных конечно-элементных расчетных моделях.

**Экспериментальная часть.** Для реализации экспериментально-расчетной методики использована лабораторная муфельная электропечь ЭКПС-10/1300 с открытыми нагревательными элементами (далее – печь), позволяющая создавать тепловой режим в диапазоне температур от 20 до 1300 °С. Рабочая камера электропечи выполнена из мулитокремнеземистого огнеупорного материала (далее – теплоизоляция печи), внутри рабочей камеры расположены нагревательные элементы спирального типа из еврофехрала.

Экспериментальные исследования по прогреву исследуемых материалов проводились на плоских образцах-пластинах толщиной 10...40 мм, размерами 150 × 100 мм, закрепленных к стальной пластине толщиной 1 мм, размерами 50 × 80 мм посредством болтового соединения (болты диаметром 4 мм). Стальную пластину с закрепленным образцом устанавливали вплотную на дверцу электропечи с помощью стальной шпильки, приваренной к пластине. Зазоры и неплотности, образующиеся по периметру исследуемого образца и теплоизоляции дверцы печи, уплотняли мягким огнеупорным рулонным волокном (рис. 1).

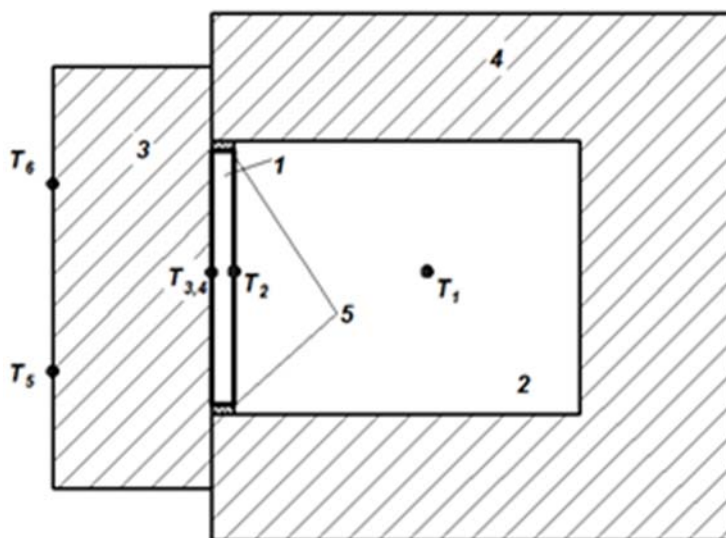
Для измерения температуры использовались термоэлектрические преобразователи с диапазоном измерения до 1200 °С, диаметром не более 0,75 мм и изолированным слоем не менее 300 мм. Температуру фиксировали на обогреваемой и необогреваемой стороне исследуемого образца, внутри печи, а также на наружной стороне теплоизоляции дверцы печи в соответствии с измерительной схемой (рис. 2).



*a* – цементно-армированная плита

*б* – минераловатная плита

Рисунок 1. – Внешний вид образцов, установленных на теплоизоляцию дверцы печи



*1* – исследуемый образец; *2* – рабочая камера электропечи; *3* – теплоизоляция дверцы печи; *4* – теплоизоляция рабочей камеры электропечи; *5* – уплотнение из огнеупорного материала;  $T_1$  – точка установки внутри рабочей камеры печи;  $T_2$  – точка установки на обогреваемой стороне исследуемого образца (в геометрическом центре образца);  $T_{3,4}$  – точки установки на необогреваемой стороне исследуемого образца (на расстоянии 25 мм от геометрического центра образца);  $T_{5,6}$  – точки установки на необогреваемой стороне теплоизоляции дверцы печи (на расстоянии 40 мм от геометрического центра теплоизоляции дверцы печи)

Рисунок 2. – Схема измерения температуры в печи, на поверхностях исследуемого образца и теплоизоляции дверцы печи

Перед установкой образца в измерительное положение замеряли геометрические параметры образца (для образцов с исходной плотностью  $500 \text{ кг/м}^3$  и более – с точностью  $0,1 \text{ мм}$ , для образцов с исходной плотностью менее  $500 \text{ кг/м}^3$  – с точностью  $1,0 \text{ мм}$ ) и массу с точностью  $0,1 \text{ г}$ .

Для проведения исследований в стационарном тепловом режиме образец устанавливали в измерительное положение и закрывали дверцу печи, после чего установили заданную программу нагрева до целевой температуры, соответственно,  $275$ ,  $550$ ,  $770$  либо  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Скорость роста температуры в камере печи не должна превышать  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  в минуту. При достижении целевой температуры в камере печи испытания следует проводить не менее 4 часов либо с длительностью, соответствующей достижению равновесной температуры на теплоизоляции печи в течение 30 мин с точностью  $1,0 \text{ }^\circ\text{C}$ , после чего отключали печь и останавливали испытание. Измерения температуры производились дискретно с периодичностью не реже  $60 \text{ с}$  с момента включения печи до остановки испытания.

Для проведения исследований в нестационарном тепловом режиме следует отметить, что максимальная скорость роста температуры в камере печи ввиду использования электрических нагревателей ниже скорости роста температуры при стандартном пожаре<sup>2</sup>. При необходимости соответствия роста температуры в камере печи росту температуры стандартного пожара предварительно разогревали рабочую камеру печи до 450 °С с заглушкой проема печи, затем в течение не более 3 с закрывали дверцу печи с установленным образцом и устанавливали заданную программу нагрева. Испытания продолжались не менее 60 мин, при необходимости испытания могут быть более длительными, при этом температура в камере печи не должна превышать 1200 °С. После окончания программы нагрева печь отключалась и испытание останавливалось. Измерения температуры производились дискретно с периодичностью не реже 60 с с момента включения печи до остановки испытания.

После остановки испытаний в стационарном и нестационарном тепловом режиме дождалась охлаждения камеры печи до температуры 70 °С либо менее, после чего демонтировали исследуемый образец и производили повторное взвешивание.

Результаты измерений оформлялись в виде протокола испытаний с указанием всех фиксируемых параметров в ходе проведения исследований.

**Расчетная часть.** Для решения обратной задачи теплопроводности с использованием метода параметрической оптимизации и получения зависимостей коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры разработаны компьютерные расчетные модели в системе конечно-элементного анализа ANSYS<sup>3</sup>.

Расчетная конечно-элементная модель во всех случаях состоит из двух частей: модели исследуемого образца и модели теплоизоляции дверцы печи. Ввиду того что теплообмен теплоизоляции дверцы печи с окружающей средой осуществляется с необогреваемой стороны и торцов, расчетная модель принята трехмерной. Из-за высокой теплопроводности в расчетной модели не учитывалась крепежная стальная пластина, а теплообмен между поверхностью исследуемого образца и теплоизоляцией дверцы печи принят идеальным.

Расчетная модель автоматически разбивается на массив призматических конечных элементов с размером грани не более 5 мм (рис. 3).

Для расчетной конечно-элементной модели задаются краевые (начальные и граничные) условия, а также дополнительные расчетные параметры решателя (шаг расчета по времени). В качестве начальных условий в расчетной модели принято, что температура во всех точках образца одинакова и равна температуре окружающей среды во время испытаний:

$$T(x, y, z, 0) = T_c \quad \text{для} \quad 0 < x < H, \quad -B < y < B, \quad -L < z < L; \quad T_c = const, \quad (4)$$

где  $T$  – температура исследуемого материала, К;  $T_c$  – температура окружающей среды, К;

Расчетная схема приведена на рисунке 4.

На наружных поверхностях исследуемого образца и теплоизоляции дверцы печи приняты следующие граничные условия теплообмена 3-го рода.

1. На обогреваемой поверхности исследуемого образца – части плоскости  $\Pi_0 = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : x = 0, -B < y < B, -L < z < L\}$

$$-\lambda_1(T) \frac{\partial T_1(x+0, y, z, \tau)}{\partial x} = \alpha_0 [T_n(\tau) - T_1(0, y, z, \tau)] + \varepsilon_{np} \sigma [T_n^4(\tau) - T_1^4(0, y, z, \tau)] \equiv q_0; \quad (5)$$

$$T_n = f(\tau), \quad (6)$$

где  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности исследуемого материала, Вт/(м×К);  $T_n$  – температура в рабочей камере печи, К;  $T_1$  – температура исследуемого материала, К;  $\alpha_0 = \alpha_0(T_n, T_1)$  –

<sup>2</sup> См. сноску 1.

<sup>3</sup> ANSYS Mechanical APDL Theory Reference [Electronic resource]: Release 18.2 ANSYS, Inc. August 2017. – Mode of access: [http://storage.ansys.com/doc\\_assets/release\\_notes/Release\\_Notes\\_182.pdf](http://storage.ansys.com/doc_assets/release_notes/Release_Notes_182.pdf). – Date of access: 31.01.2020.

коэффициент теплоотдачи конвекцией от печи к исследуемому материалу, Вт/(м<sup>2</sup>×К);  $\epsilon_{np}$  – приведенная степень черноты системы камера печи – исследуемый образец;  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>×К)).

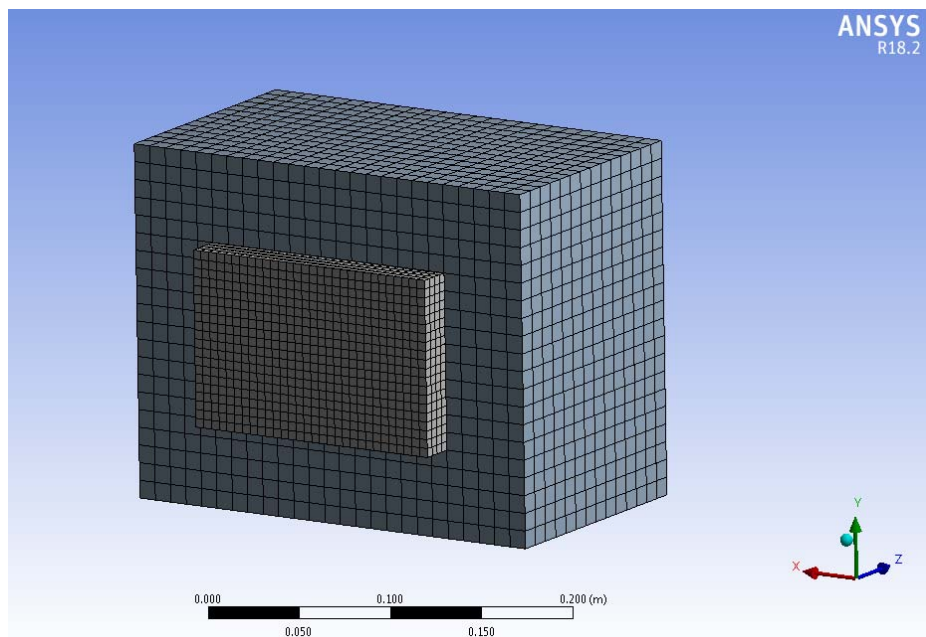


Рисунок 3. – Расчетная модель исследуемого образца с теплоизоляцией дверцы печи

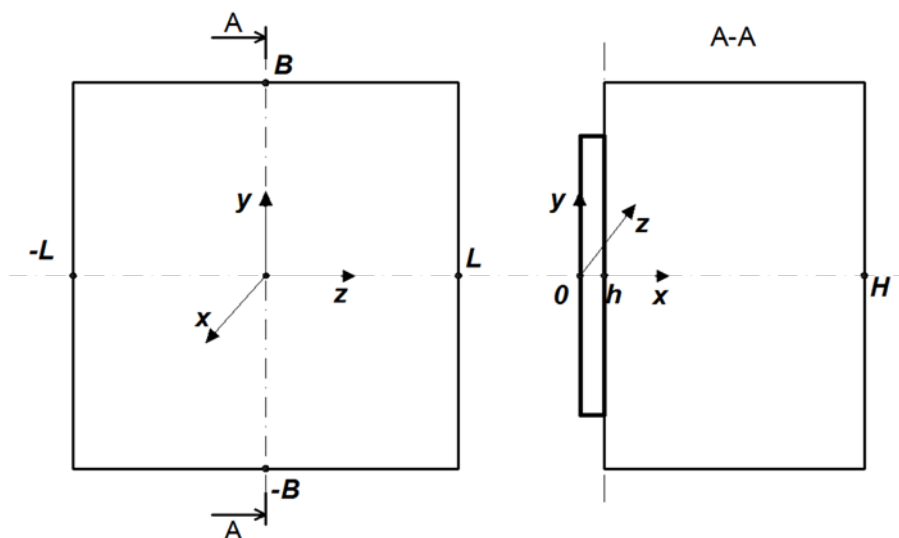


Рисунок 4. – Расчетная схема для определения граничных условий

2. На необогреваемых поверхностях теплоизоляции дверцы печи:

– для части вертикальной плоскости  $\Pi_H = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : x = H, -B < y < B, -L < z < L\}$

$$-\lambda_2(T) \frac{\partial T_2(x-0, y, z, \tau)}{\partial x} = \alpha_H [T_2(H, y, z, \tau) - T_c(\tau)] + \epsilon_{np} \sigma [T_2^4(H, y, z, \tau) - T_c^4(\tau)] \equiv q_H, \quad (7)$$

где  $T_2$  – температура теплоизоляции дверцы печи, К;  $\alpha_H = \alpha_H(T_c, T_2)$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией от вертикальной поверхности теплоизоляции дверцы печи в окружающую среду, Вт/(м<sup>2</sup>×К);

– для частей горизонтальных плоскостей  $\Pi_{\pm B} = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : h < x < H, y = \pm B, -L < z < L\}$

$$-\lambda_2(T) \frac{\partial T_2(x, y \mp 0, z, \tau)}{\partial y} = \pm \alpha_{\pm B} [T_2(x, \pm B, z, \tau) - T_c(\tau)] \pm \varepsilon_{np} \sigma [T_2^4(x, \pm B, z, \tau) - T_c^4(\tau)] \stackrel{\text{обозн.}}{\equiv} \pm q_{\pm B}, \quad (8)$$

где  $\alpha_{+B} = \alpha_{+B}(T_c, T_2)$  и  $\alpha_{-B} = \alpha_{-B}(T_c, T_2)$  – коэффициенты теплоотдачи конвекцией от верхней и нижней горизонтальных поверхностей теплоизоляции дверцы печи в окружающую среду, Вт/(м<sup>2</sup>×К). Отметим, что проекция плотности теплового потока положительна для верхней поверхности  $\Pi_{+B}$  и отрицательна для нижней  $\Pi_{-B}$ ;

– для частей вертикальных плоскостей  $\Pi_{\pm L} = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : h < x < H, -B < y < B, z = \pm L\}$

$$-\lambda_2(T) \frac{\partial T_2(x, y, z \mp 0, \tau)}{\partial z} = \pm \alpha_{\pm L} [T_2(x, y, \pm L, \tau) - T_c(\tau)] \pm \varepsilon_{np} \sigma [T_2^4(x, y, \pm L, \tau) - T_c^4(\tau)] \stackrel{\text{обозн.}}{\equiv} \pm q_{\pm L}, \quad (9)$$

где  $\alpha_{\pm L} = \alpha_{\pm L}(T_c, T_2)$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией от вертикальной поверхности от боковых поверхностей теплоизоляции дверцы печи в окружающую среду, Вт/(м<sup>2</sup>×К). Проекция плотности теплового потока положительна для поверхности  $\Pi_{+L}$  и отрицательна для нижней  $\Pi_{-L}$ .

В месте контакта исследуемого материала и теплоизоляции печи – части плоскости  $\Pi_h = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : x = h, -B < y < B, -L < z < L\}$  – приняты граничные условия 4-го рода:

$$\begin{cases} T_1(h-0, y, z, \tau) = T_2(h+0, y, z, \tau); \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1(h-0, y, z, \tau)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(h+0, y, z, \tau)}{\partial x}, \end{cases} \quad (10)$$

где  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности теплоизоляции дверцы печи, Вт/(м×К).

Для остальных неуказанных наружных поверхностей расчетной модели граничные условия приняты:

$$-\lambda_1(T) \frac{\partial T_1(x, y, z, \tau)}{\partial x} = -\lambda_1(T) \frac{\partial T_1(x, y, z, \tau)}{\partial y} = -\lambda_1(T) \frac{\partial T_1(x, y, z, \tau)}{\partial z} = 0. \quad (11)$$

В случае стационарного теплообмена для температуры  $T_n$  в рабочей камере печи, принимающей значения 275, 550, 770 и 1150 °С, вводятся дополнительные граничные условия:

$$\tau \rightarrow \infty; \quad q_i = const, \quad i \in \{0, H, \pm B, L\}; \quad T_j = const, \quad j \in \{n, c, 1, 2\}. \quad (12)$$

Температура греющей среды  $T_n$  определяется данными измерений в камере печи, температура окружающей среды  $T_c$  определяется температурой в лабораторном помещении.

Для необогреваемой стороны расчетной модели коэффициент теплоотдачи конвекцией определяли с учетом характера конвективного теплообмена с окружающим воздухом, геометрическим размером и положением тела. Указанное решение выполняли с использованием физического аппарата критериев подобия, на основе чисел Нуссельта (Nu), Прандтля (Pr), Грасгофа (Gr) и Рэлея (Ra), а также числа Рейнольдса (Re) в случае свободной конвекции (во всех случаях в качестве теплоносителя принят воздух). Изменение коэффициента

теплоотдачи конвекцией  $\alpha$  на внешней поверхности теплоизоляции печи показано на графике (рис. 5).

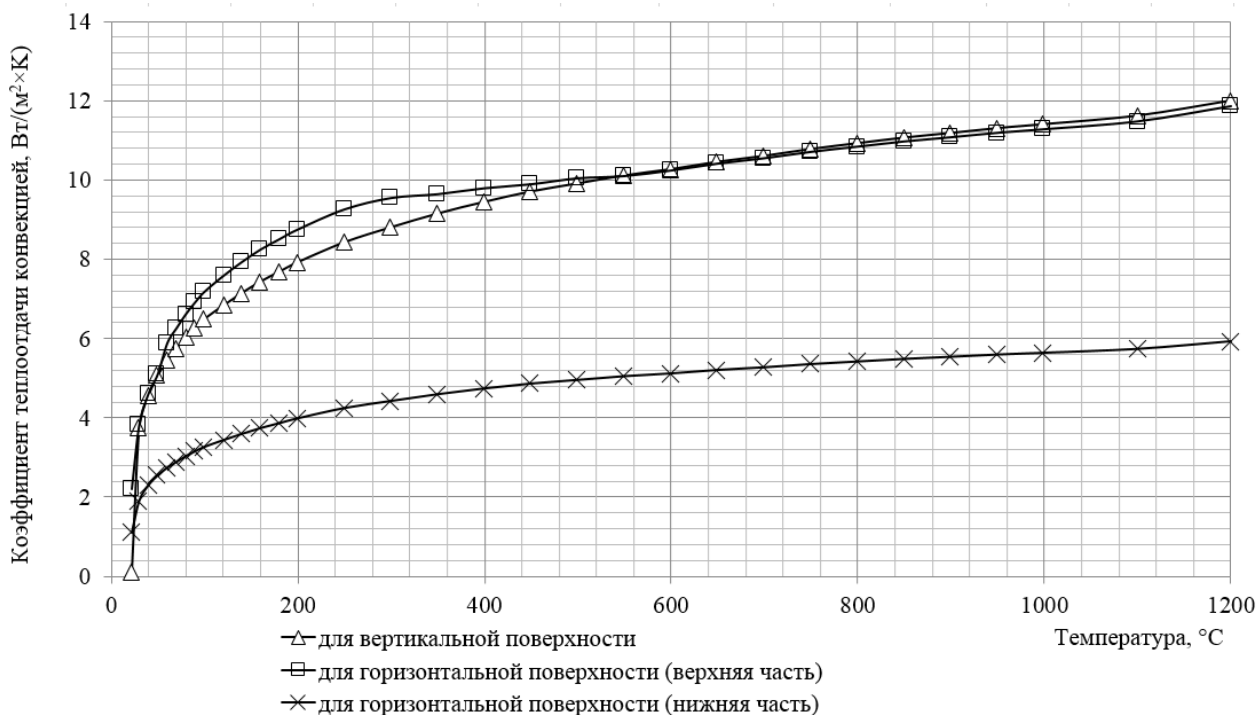


Рисунок 5. – График изменения коэффициента теплоотдачи конвекцией на внешней поверхности теплоизоляции печи от температуры

Оценка плотности осуществлялась исходя из формулы

$$\rho(\tau) = \frac{m(\tau)}{V_0}, \quad (13)$$

где  $m$  – масса исследуемого образца, кг;  $V_0$  – объем исследуемого образца, м<sup>3</sup>.

**Параметрическая часть.** Одна из наиболее важных возможностей системы конечно-элементного анализа ANSYS – использование метода параметрической оптимизации относительно искомого теплофизического параметра (коэффициента теплопроводности либо удельной теплоемкости). Суть метода параметрической оптимизации заключается в проведении серии итерационных расчетов с последовательным уточнением искомого параметра исходя из полученных отклонений от стандарта (в частности, температуры одной из точек конечно-элементной модели). Иными словами, метод параметрической оптимизации обеспечивает автоматический поиск целевой функции:

$$f_1(\tau) - f_2(\tau) \rightarrow 0, \quad (14)$$

где  $f_1$  и  $f_2$  – функции изменения температуры на необогреваемой поверхности исследуемого образца, полученные в результате выполнения расчета и в ходе выполнения экспериментальных исследований.

В параметрической оптимизации используется следующая терминология: входные параметры, переменные состояния и целевая функция.

Входные параметры являются целевыми значениями, которые необходимо варьировать. В качестве входных параметров для стационарного теплообмена принимали коэффициент теплопроводности, для нестационарного – удельную теплоемкость.

Переменные состояния представляют собой значения параметров, функция которых известна. В качестве переменных состояний в модели параметризации использованы резуль-



таты экспериментальных исследований – значения температуры в центре необогреваемой поверхности исследуемого образца в заданный момент времени. Ввиду того что точные значения целевой функции методом параметрической оптимизации определить невозможно, для переменных состояния задается шаг точек по времени (в зависимости от нелинейности экспериментальных данных) и величина отклика модели, т. е. допустимые границы отклонений.

В результате применения параметрической оптимизации для экспериментальных данных с заданной точностью определяются зависимости от температуры искомых теплофизических характеристик – коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости. Итоговое значение коэффициента теплопроводности образцов принимали при температуре, равной средней температуре между обогреваемой и необогреваемой стороной исследуемого образца.

**Результаты применения экспериментально-расчетной методики для оценки теплофизических характеристик цементно-армированных и минераловатных плит.** Для применения экспериментально-расчетной методики на практике предварительно были проведены экспериментальные исследования в полном объеме по разработанной методике для теплоизоляции печи. При этом расчетная конечно-элементная модель была упрощена до однослойной путем исключения слоя исследуемого материала, а граничные условия 3-го рода были перенесены на внутреннюю поверхность теплоизоляции дверцы печи, граничные условия 4-го рода – исключены. В результате были определены зависимости от температуры теплофизических характеристик теплоизоляции дверцы печи – коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости, плотность принята постоянной.

На следующем этапе экспериментально-расчетная методика была применена для образцов цементно-армированных плит Аквапанель производства Knauf (плотностью 1100 кг/м<sup>3</sup>) и минераловатных плит Технорф ПРОФ производства Техноколь (плотностью 160 кг/м<sup>3</sup>). К испытаниям приняты образцы требуемых геометрических размеров с толщиной цементно-армированной плиты 12,5 мм, минераловатной плиты – 25 мм.

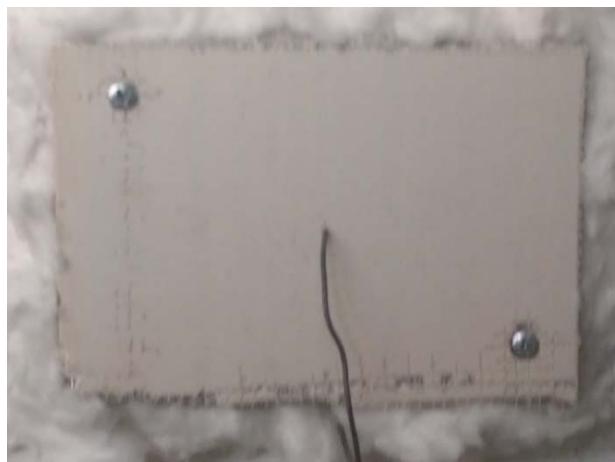
В стационарных условиях эксперимент прекращали при установившейся температуре на необогреваемой поверхности образца в течение 30 мин с точностью в 1,0 °С, в нестационарных условиях – эксперимент ограничивали интервалом времени 60 мин. Перед проведением экспериментальных исследований, а также после их проведения определяли массу исследуемых образцов. В таблице 1 представлены результаты экспериментальных исследований по прогреву цементно-армированной и минераловатной плит в условиях стационарного теплового режима.

**Таблица 1. – Результаты экспериментальных исследований по прогреву цементно-армированной и минераловатной плит в условиях стационарного теплового режима**

№	Величина температуры в печи (в условиях стационарного теплового режима), °С	Температура на необогреваемой поверхности (прогрева) образца, °С		Плотность образца (по отношению к начальной), %	
		цементно-армированная плита толщиной 12,5 мм	минераловатная плита толщиной 25 мм	цементно-армированная плита толщиной 12,5 мм	минераловатная плита толщиной 25 мм
1	275 ± 2,5	234 ± 2,5	212 ± 2,5	96,7	96,4
2	550 ± 4,1	503 ± 3,8	468 ± 3,5	93,7	93,1
3	770 ± 5,8	699 ± 5,2	682 ± 5,1	88,1	92,4
4	1150 ± 8,6	1105 ± 8,3	1150 ± 8,6	77,2	84,2

*Примечание.* Указана инструментальная погрешность термоэлектрических преобразователей.

Следует отметить, что воздействие повышенной температуры на образцы цементно-армированных плит приводит к образованию трещин (каверн) (рис. 6), что, вероятнее всего, вызвано испарением структурно-связанной воды в материале и плавлением армирующей стеклосетки.



а – до испытаний



б – после испытаний при  $T_n = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$



в – после испытаний при  $T_n = 770\text{ }^{\circ}\text{C}$



г – после испытаний при  $T_n = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$

**Рисунок 6. – Вид исследуемых образцов цементно-армированных плит до и после испытаний в стационарных условиях теплообмена**

Воздействие высоких температур на образцы минераловатных плит (рис. 7) приводит к выгоранию органических связующих, что влечет изменение цвета, плотности и в последующем – спекание (рис. 7г).

Результаты изменения температуры греющей среды  $T_n$  в камере печи, температуры на обогреваемой и необогреваемых сторонах образцов для предварительных испытаний и испытаний цементно-армированных и минераловатных плит при нестационарных условиях теплообмена представлены на рисунке 8.

Из рисунка 8 следует, что динамика температуры в камерной печи соответствовала стандартному температурному режиму пожара с учетом допустимых отклонений<sup>4</sup>. Изменение скорости изменения температуры в области  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  для образцов цементно-армированных плит свидетельствует о процессах дегидратации. Изменение скорости изменения температуры для образцов минераловатных плит в области  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  объясняется выгоранием органических связующих.

<sup>4</sup> См. сноску 1.



а – после испытаний при  $T_n = 275\text{ }^{\circ}\text{C}$

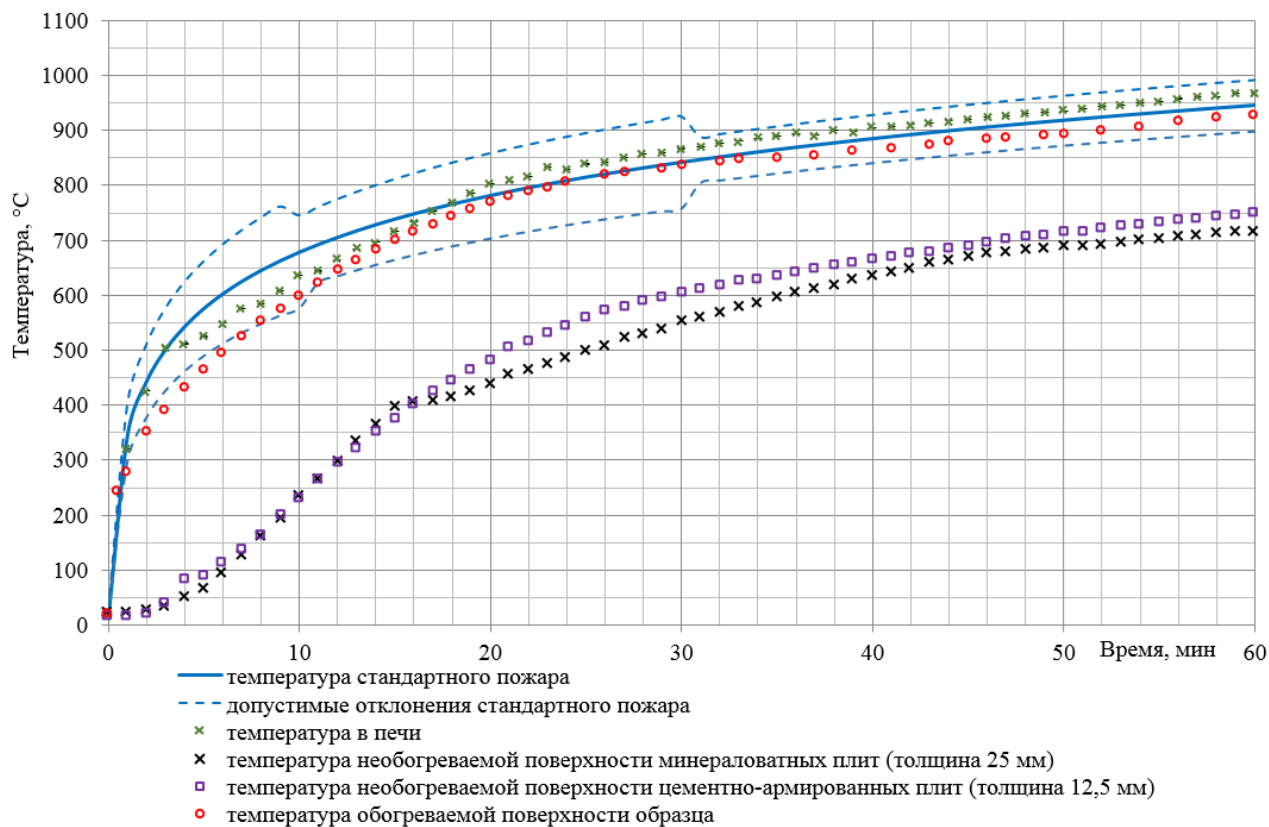
б – после испытаний при  $T_n = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$



в – после испытаний при  $T_n = 770\text{ }^{\circ}\text{C}$

з – после испытаний при  $T_n = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$

**Рисунок 7. – Вид исследуемых образцов минераловатных плит после испытаний в стационарных условиях теплообмена**



**Рисунок 8. – График изменения температуры при проведении экспериментальных исследований**

В результате применения параметрической оптимизации для расчетных конечно-элементных моделей и экспериментальных данных высокотемпературного нагрева образцов цементно-армированных и минераловатных плит (в стационарных и нестационарных условиях) получены зависимости коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры (табл. 2). Максимальные значения температуры для коэффициента теплопроводности образцов принимали соответствующими средней температуре между обогреваемой и необогреваемой стороной исследуемого образца. Максимальные значения температуры для удельной теплоемкости образцов принимали соответствующими максимальной температуре обогреваемой стороны исследуемого образца.

**Таблица 2. – Результаты теплофизических характеристик цементно-армированной и минераловатной плит**

Образец цементно-армированной плиты толщиной 12,5 мм		Образец минераловатной плиты толщиной 25 мм	
Температура, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м×К)	Температура, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м×К)
20	0,27	20	0,037
255	0,21	240	0,16
525	0,46	510	0,44
735	0,49	720	0,59
1127	0,82	1150	1,10
Температура, °С	Удельная теплоемкость, Дж/(кг×К)	Температура, °С	Удельная теплоемкость, Дж/(кг×К)
20	1000,0	20	1000,00
50	1384,0	50	1316,75
100	1246,4	100	1395,95
150	1204,8	150	1323,35
250	1006,4	250	1089,05
350	939,0	350	673,25
400	932,8	400	600,00
500	958,4	500	1603,85
600	1176,0	600	1527,95
700	2366,4	700	2422,25
900	4300,0	1000	3567,35

Полученные теплофизические характеристики для цементно-армированной плиты удовлетворительно согласуются с данными, полученными методом лазерной вспышки в предыдущих исследованиях [3]. Теплофизические характеристики для минераловатных плит удовлетворительно согласуются с данными, полученными в диссертации V. Schleifer [4].

### **Заключение**

Для оценки теплофизических характеристик материалов при повышенных температурах в условиях пожара разработана экспериментально-расчетная методика, включающая:

– проведение серии экспериментальных исследований по прогреву исследуемых материалов:

для исследования плотности и коэффициента теплопроводности материала – в стационарном тепловом режиме при температурах 275, 550, 770 и 1150 °С;

для исследования удельной теплоемкости материала – в нестационарном тепловом режиме при температурах от 20 до 1000 °С;

– определение зависимости плотности материала от температуры;

– решение обратной задачи теплопроводности методом параметрической оптимизации в расчетной конечно-элементной модели и получение зависимостей коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры в разработанных конечно-элементных расчетных моделях.

В результате применения параметрической оптимизации для конечно-элементных расчетных моделей и экспериментальных данных высокотемпературного нагрева образцов цементно-армированных (Аквапанель производства Knauf) и минераловатных плит (Техноруф ПРОФ производства Технониколь) получены зависимости коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры. Полученные теплофизические характеристики для цементно-армированной плиты удовлетворительно согласуются с данными, полученными методом лазерной вспышки в предыдущих исследованиях [3]. Теплофизические характеристики для минераловатных плит удовлетворительно согласуются с данными, полученными в диссертации V. Schleifer [4].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кудряшов, В.А. Теплопроводность цементных армированных плит при нестационарном тепловом режиме на основе данных экспериментальных исследований и численного моделирования / В.А. Кудряшов, С.С. Ботян // Вестник Ун-та гражд. защиты МЧС Беларуси. – 2017. – Т. 1, № 2. – С. 139–152. DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-2.139.
2. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
3. Кудряшов, В.А. Теплофизические характеристики цементных армированных плит для решения задач нестационарного высокотемпературного нагрева / В.А. Кудряшов [и др.] // Вестник Ун-та гражд. защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 3. – С. 327–334. DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-3.327.
4. Schleifer, V. Zum verhalten von raumabschliessenden mehrschichtigen holzbauteilen im brandfall: dissertation ETH Nr. 18156 / Vanessa Schleifer. – Zürich, 2009. – 147 s.

**Экспериментально-расчетная методика оценки теплофизических характеристик строительных материалов с использованием камерной электропечи для решения задач огнестойкости**

**Experimental-computing technique of evaluating thermophysical properties of building materials with a muffle electric furnace for solving fire resistance problems**

**Ботян Сергей Сергеевич**

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра пожарной безопасности, старший преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, г. Минск, Беларусь  
e-mail: aseckis@mail.ru  
ORCID: 0000-0002-8593-4413

**Sergey S. Botyan**

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus»,  
Chair of Fire Safety, Senior lecturer

Address: ul. Mashinostroiteley, 25,  
220118, Minsk, Belarus  
e-mail: aseckis@mail.ru  
ORCID: 0000-0002-8593-4413

**Жамойдик Сергей Михайлович**

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра пожарной безопасности, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, г. Минск, Беларусь  
e-mail: zhamoidik.kii@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-0407-5176

**Sergey M. Zhamoydik**

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus»,  
Chair of Fire Safety, Associate Professor

Address: ul. Mashinostroiteley, 25,  
220118, Minsk, Belarus  
e-mail: zhamoidik.kii@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-0407-5176

**Кудряшов Вадим Александрович**

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», отдел научной и инновационной деятельности, начальник отдела

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, г. Минск, Беларусь  
e-mail: vadkud@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-4889-1060

**Vadim A. Kudryashov**

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus»,  
Department of Scientific and Innovation Activity,  
Head of the Department

Address: ul. Mashinostroiteley, 25,  
220118, Minsk, Belarus  
e-mail: vadkud@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-4889-1060

**Нгуен Тхань Киен**

кандидат технических наук

Университет противопожарной безопасности Министерства общественной безопасности Вьетнама, факультет пожарной безопасности, заместитель декана

Адрес: ул. Кхуат Зиу Тиен, 243,  
район Тхань Суан, Ханой, Вьетнам  
e-mail: thanhkienpcct34@gmail.com

**Nguyen Thanh Kien**

PhD in Technical Sciences

University of Fire Fighting & Prevention of the Ministry of Public Security of Vietnam,  
Fire Safety Department, Deputy Dean

Address: Khuat Duy Tien, 243,  
Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam  
e-mail: thanhkienpcct34@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2020.4-1.5>

## EXPERIMENTAL-COMPUTING TECHNIQUE OF EVALUATING THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF BUILDING MATERIALS WITH A MUFFLE ELECTRIC FURNACE FOR SOLVING FIRE RESISTANCE PROBLEMS

**Botyan S.S., Zhamoydik S.M., Kudryashov V.A., Nguyen T.K.**

*Purpose.* Based on experimental studies and theoretical data to develop a technique for thermal properties evaluation of a cement-reinforced and mineral wool specimens under high temperature for fire resistance problems solving.

*Methods.* Finite element methods, parametric optimization, experimental studies.

*Findings.* The experimental-computing technique has been developed and experimental studies have been carried out on heating the test materials within the boundaries of the standard fire temperature-time curve: in stationary thermal conditions at temperatures of 275, 550, 770 and 1150 °C; in transient thermal conditions at temperatures from 20 to 1000 °C. Computational finite-element models have been developed, boundary (initial and boundary) conditions have been formulated, with the use of the parametric optimization methods, the thermal properties at high temperatures of cement-reinforced and mineral wool specimens have been determined for the fire resistance problems solving.

*Application field of research.* The results can be used to solve the fire resistance problems for building structures based on mineral insulation and cement-reinforced slabs, as well as to determine the thermal properties of other building materials at high temperatures.

*Keywords:* fire resistance, thermal properties, coefficient of thermal conductivity, specific heat, density, experimental studies, finite element method, parametric optimization, standard temperature regime.

(The date of submitting: February 3, 2020)

### REFERENCES

1. Kudryashov V.A., Botyan S.S. Teploprovodnost' tsementnykh armirovannykh plit pri nestatsionarnom teplovom rezhime na osnove dannykh eksperimental'nykh issledovaniy i chislennogo modelirovaniya [Cement boards thermal conductivity based on experimental research and numerical simulation data in relation to nonstationary heat flows]. *Journal of Civil Protection*, 2017. Vol. 1, No. 2. Pp. 139–152. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-2.139.
2. Lykov A.V. *Theory of heat conduction*. Moscow: Higher School, 1967. 600 p.
3. Kudryashov V.A., Botyan S.S., Danilova-Tret'yak S.M., Nikolaeva K.V. Teplofizicheskie kharakteristiki tsementnykh armirovannykh plit dlya resheniya zadach nestatsionarnogo vysokotemperaturnogo nagreva [Cement boards thermophysical characteristics for solving the tasks of nonstationary high-temperature heating]. *Journal of Civil Protection*, 2018. Vol. 2, No. 3. Pp. 327–334. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-3.327.
4. Schleifer V. *Zum Verhalten von raumabschliessenden mehrschichtigen Holzbauteilen im Brandfall* [For the behaviour of room-closing multi-layer wood components in case of fire]: Dissertation ETH Nr. 18156. Zürich, 2009. 147 s. (deu)