

УДК [536.21:624.012.45]: 001.891.5

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ЦЕМЕНТНЫХ АРМИРОВАННЫХ ПЛИТ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛОВОМ РЕЖИМЕ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Кудряшов В.А., Ботян С.С.

Проанализированы методы определения теплофизических характеристик материалов в ходе проведения испытаний по различным методикам и видам теплового режима. Разработана методика и проведены экспериментальные исследования динамики прогрева модельных образцов цементных армированных плит толщиной 12,5 и 25 мм. Получены зависимости изменения температуры от времени на обогреваемой и необогреваемой поверхности материала образцов различной толщины при нестационарном тепловом режиме в диапазоне температур от 20 до 1000 °С. Разработана расчетная модель и решена обратная задача теплопроводности с оценкой эффективных коэффициентов теплопроводности рассматриваемых образцов в диапазоне температур от 20 до 1000 °С.

Ключевые слова: огнестойкость; теплофизические характеристики; коэффициент теплопроводности; экспериментальные исследования; обратная задача теплопроводности, стандартный температурный режим.

(Поступила в редакцию 5 апреля 2017 г.)

Введение. Решение задач теплообмена является неотъемлемой частью решения задач огнестойкости строительных конструкций. В настоящее время для внутреннего деления зданий на помещения с устройством противопожарных преград либо конструкций с нормируемой огнестойкостью, широко используются многослойные ненесущие каркасные перегородки на деревянном либо стальном каркасе с применением обшивных листовых материалов. Теплофизические характеристики обшиваемых листов, материала внутреннего заполнения перегородок определяют динамику прогрева конструкций при пожаре и, как следствие, величину их предела огнестойкости. Математическое моделирование процессов теплообмена многослойных ненесущих каркасных перегородок невозможно при отсутствии данных по теплофизическим характеристикам составляющих материалов конструкции. Одним из наиболее распространенных способов определения теплофизических характеристик – решение обратной задачи теплопроводности на основе экспериментальных данных.

Состояние проблемы на современном этапе. При определении теплофизических характеристик строительных материалов наиболее распространенным методом является проведение испытаний в соответствии с [1-7] в условиях стационарного и нестационарного теплового режима. Нестационарные методы основаны на исследовании меняющихся во времени по определенному закону температурных полей. Они более сложны в реализации в отличие от стационарных методов, основанных на исследовании неизменных во времени температурных полей. Однако при оценке огнестойкости строительных конструкций применяют именно нестационарный тепловой режим, соответствующий стандартной кривой пожара ГОСТ 30247.0 [8], что следует учитывать при определении теплофизических характеристик.

Испытания по ГОСТ 30290 [1] распространяются на строительные материалы и изделия (за исключением многослойных изделий) с коэффициентом теплопроводности от 0,02 до 1,00 Вт/(м·К) в интервале температур 5-40 °С. Метод заключается в создании одностороннего кратковременного теплового импульса на поверхности изделия и регистрации изменения температуры на ней. Затем, используя полученные экспериментальные данные, коэффициент теплопроводности определяют путем расчета по формулам, используемым в зависимости от толщины образца. Для изделий толщиной менее 15 мм коэффициент теплопроводности исследуемого материала для каждого измерения вычисляют по формуле (1).

$$\lambda = (z_i - b_3) \sqrt{C_R \cdot \frac{(z_l - b_3)(z_m - z_i)}{(z_m - b_3)(z_l - z_i)}}, \quad (1)$$

где z_i, z_m, z_l – величины, вычисляемые по соответствующим формулам по ГОСТ 30290 [1];

C_R, b_3 – коэффициенты, определяемые при градуировке и зависящие от мощности теплового импульса, чувствительности датчика температуры, размеров нагревателя, теплофизических свойств тела первичного преобразователя;

l, m, i – порядковые номера элементов рабочей зоны.

Определение коэффициента теплопроводности в соответствии с ГОСТ 30256 [2] осуществляют цилиндрическим зондом при нестационарном тепловом режиме в диапазоне температуры от -183 до 300 °С. Метод основан на зависимости температуры внедренного в материал нагреваемого тела (цилиндрического зонда) от теплопроводности окружающего материала. Испытания распространяются на строительные материалы и изделия с коэффициентом теплопроводности от $0,01$ до $2,00$ Вт/(м·К). Коэффициент теплопроводности вычисляют по формуле (2) для линейного источника тепла постоянной мощности.

$$\lambda_{\Lambda} = 0,05516 \cdot I^2 \cdot R \cdot E_0 / \Delta E, \quad (2)$$

где I – сила тока нагрева зонда, А;

R – сопротивление нагревателя зонда, Ом/м;

E_0 – чувствительность термопары зонда, мкВ/К;

ΔE – прирост ЭДС термопары зонда, мкВ.

Метод определения коэффициента теплопроводности по СТБ 1618 [3] распространяется на строительные материалы и изделия, а также теплоизоляционные материалы и изделия, предназначенные для тепловой изоляции промышленного оборудования и трубопроводов при средней температуре образца от -40 до 200 °С. Сущность метода заключается в создании стационарного теплового потока, проходящего через плоский образец определенной толщины и направленного перпендикулярно к лицевым (наибольшим) граням образца, измерении плотности теплового потока, температуры противоположных лицевых граней и толщины образца. Коэффициент теплопроводности материала образца вычисляют по формуле (3).

$$\lambda_u = \frac{d_u}{\frac{\Delta t_u}{q_u} - 2R_k}, \quad (3)$$

где d_u – толщина образца, м;

Δt_u – разность температур лицевых граней испытываемого образца, °С;

q_u – плотность стационарного теплового потока, проходящего через испытываемый образец, Вт/м²;

R_k – термическое сопротивление между лицевой гранью образца и рабочей поверхностью плиты прибора, принимаемое равным $0,005$ м² · К/Вт, а для теплоизоляционных материалов и изделий – нулю.

Испытания, проводимые по [4, 5] осуществляют при стационарном тепловом режиме в диапазоне температур от -100 до 100 °С для образцов с термическим сопротивлением не менее $0,5$ м² · К/Вт с применением прибора с горячей охранной зоной и прибора, оснащенного тепломером. Стандарты распространяются на строительные теплоизоляционные материалы, но могут использоваться для испытываемых образцов из любого материала, который соответствует установленным требованиям [4, 5] (за исключением влажных материалов). Коэффициент теплопроводности испытываемых образцов определяют по формулам в зависимости от применяемых условий, методик и характеристик образца. Для образцов, в которых теплопередача может осуществляться одновременно проводимостью, конвекцией и излучением, коэффициент теплопроводности определяют по формуле (4).

$$\lambda = \frac{qd}{\Delta T} = \frac{d}{R}, \quad (4)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м²;
 d – толщина; средняя толщина испытываемого образца, м;
 ΔT – разность температур, К;
 R – термическое сопротивление м²· К/Вт.

Метод в соответствии с ГОСТ 23619 [6] распространяется на теплоизоляционные огнеупорные муллитокремнеземистые стекловолоконистые материалы и изделия, применяемые в качестве теплоизоляционного и/или компенсационного материала для теплоизоляции термических (нагревательных) установок. При проведении испытаний исследуемый образец нагревают до температуры (600±25) °С при помощи печи и осевого нагревателя, после чего снимают показания электроизмерительных приборов. Коэффициент теплопроводности испытываемых образцов определяют по формуле (5).

$$\lambda = \frac{Q \cdot \ln(r_2 / r_1)}{2 \cdot \pi \cdot l (\Delta T + \Delta T_n)}, \quad (5)$$

где Q – радиальный тепловой поток, Вт;
 l – расстояние между потенциометрическими выводами, м;
 $\Delta T = (T_2 - T_1)$ – перепад температур в точках r_2, r_1 , °С;
 r_2, r_1 – расстояние между центральной осью нагревателя и координатами спаев холодной и горячей измерительных термопар, м;
 ΔT_n – температурная поправка, °С.

Одним из наиболее современных методов по определению теплофизических характеристик материалов является метод лазерной вспышки (лазерного импульса). Метод относится к группе нестационарных в диапазоне температур от –125 до 2800 °С, позволяющий определить теплопроводность от 0,1 до 2000 Вт/(м·К). Сущность метода – поглощение короткого импульса лучистой энергии в тонком слое фронтальной поверхности плоского испытываемого образца, вызванное возмущение температуры регистрируется на тыльной поверхности образца. Полученные данные позволяют оценить одновременно коэффициент температуропроводности (термической диффузии), теплоемкость и теплопроводность образца. Для их определения используют следующие зависимости (6, 7, 8).

$$a = \frac{1,388 \cdot l^2}{\pi^2 \cdot \tau_{1/2}}, \quad (6)$$

$$C_p = \frac{Q}{T_{max} \cdot m}, \quad (7)$$

$$\lambda = a \cdot C_p \cdot \rho, \quad (8)$$

где l – толщина образца, м;
 m – масса образца, кг;
 ρ – плотность образца, кг/м³;
 a – температуропроводность образца, кг/м³;
 $\tau_{1/2}$ – время достижения половины амплитуды перегрева образца, с;
 C_p – теплоемкость образца, Дж/(кг·°С);
 Q – энергия поглощенная образцом, Дж;
 T_{max} – амплитуда перегрева образца, °С;
 λ – теплопроводность, Вт/(м·°С).

Все вышеприведенные методы и зависимости для определения теплофизических характеристик, изложенные в [1-7], весьма схожи с обратным решением задачи теплопровод-

ности (закона Фурье) [13]. Зависимости (2)-(5) для определения коэффициента теплопроводности являются частным решением задачи теплопроводности для стационарного режима, при этом в зависимости (2) геометрические параметры образца заложены в расчетном коэффициенте, а суммарная тепловая нагрузка определяется исходя из закона Джоуля-Ленца. Очевидно, что зависимость (1) является решением задачи теплопроводности с использованием алгоритмов подобия и линейной интерполяции. Зависимости (6)-(8) основаны на принципе использования коэффициента температуропроводности (термической диффузии), определяемого исходя из известной мощности поглощенного импульса. Примечательно, что для оценки удельной теплоемкости (7) в испытаниях по методу лазерной вспышки, используется также обратное решение классической задачи, но применительно к количеству теплоты, поглощаемое единицей массы вещества.

Аналогичный подход используется при определении удельной теплоемкости в соответствии с ГОСТ 23250 [7] распространяется на строительные материалы в диапазоне температур от +20 °С до 100 °С. Метод определения удельной теплоемкости основан на измерении количества теплоты, отданной калориметру образцом известной массы, нагретым до заданной температуры. Удельную теплоемкость в выбранном температурном интервале калориметрического опыта вычисляют по формуле (9).

$$C = \left[\frac{(M_{жс} + E)C_{жс}(t_p - t_0)}{t_e - t_p} - M_k C_k \right] / M_0, \quad (9)$$

где $M_{жс}$ – масса дистиллированной воды, г;

E – водяной эквивалент, с;

t_p – равновесная температура калориметра, °С;

$C_{жс}$ – удельная теплоемкость дистиллированной воды, равная 1 ккал/(кг·°С) или 4187 Дж/(кг·К);

t_0 – температура калориметра в момент погружения эталона, °С;

t_e – температура нагретой капсулы с образцом, °С;

M_k – масса капсулы, г;

C_k – удельная теплоемкость материала капсулы, ккал/(кг·°С) или Дж/(кг·К);

M_0 – масса образца, г.

В целом, для определения теплофизических характеристик материалов по методам, изложенным в [1-5, 7], необходимо наличие специализированных лабораторных установок. Исходя из температурного диапазона испытаний, полученные теплофизические характеристики применяются в основном для оценки тепловых потерь при теплопередаче через ограждающие строительные конструкции зданий. Такие диапазоны лишь частично соответствуют температурам стандартной кривой ГОСТ 30247.0 [8]. Применение теплофизических характеристик, полученных по методам изложенным в [1-7] для более высоких температур, чревато серьезными погрешностями в решении теплотехнической задачи огнестойкости [15].

Метод лазерной вспышки соответствуют требуемому температурному диапазону для оценки огнестойкости. Однако для их использования также необходимо специализированное оборудование. Кроме того, метод лазерной вспышки позволяет оценить теплофизические характеристики для сравнительно небольших образцов – от 0,1 до 6,0 мм. Предварительные испытания по указанному методу показали, что он не позволяет определить теплофизические характеристики многослойных либо пористых материалов.

Согласно данным А.И. Яковлева [10], для оценки теплофизических характеристик строительных материалов в рамках решения задачи огнестойкости, использование методов, основанных на решении обратных задач теплопроводности, также является наиболее достоверным путем. Это позволяет учесть нелинейные изменения теплофизических характеристик, вызванные изменением фазового состава и физико-химическими превращениями в материале, которые зависят от значения температуры и продолжительности нагрева.

По нашему мнению, актуальным также является 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 стандартной кривой пожара по ГОСТ 30247 [8]. 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, но с другой стороны требует использование сложных алгоритмов решения задач теплопроводности, что требует в конечном итоге применение программных систем конечно-элементного анализа. Указанный подход был принят в настоящих исследованиях в качестве основного.

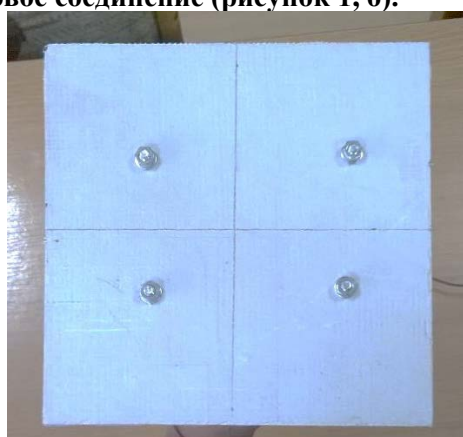
Для определения эффективных теплофизических характеристик строительных материалов при пожаре, на примере цементных армированных плит были решены следующие задачи:

- разработана методика проведения экспериментальных исследований модельных образцов, включающая: подготовку фрагмента модельного образца цементной армированной плиты и расстановку термоэлектрических преобразователей на обогреваемой и необогреваемой поверхности; обеспечение температурного режима в камерной электропечи SNOL-30/1300L, соответствующего стандартной температурной зависимости пожара по ГОСТ 30247 [8];

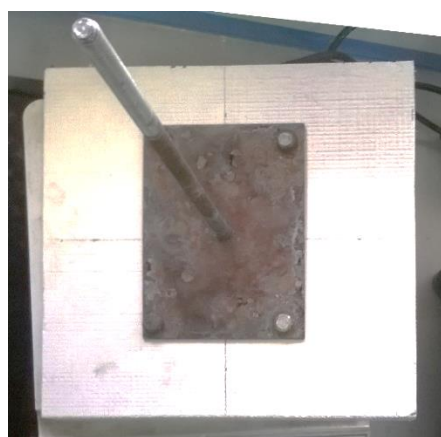
- проведены экспериментальные исследования в соответствии с разработанной методикой и получены данные, включающие: динамику температуры на обогреваемой и необогреваемой поверхности материала в диапазоне температур от 20 до 1000 °С и температуры в камерной электропечи SNOL-30/1300 L при нестационарном тепловом режиме;

- разработана методика решения обратной задачи теплопроводности с применением программной системы конечно-элементного анализа, включающая: расчетную модель прогрева образца, начальные и граничные условия, а также принятые неопределенности и упрощения в модели.

Методика и результаты экспериментальных исследований. В качестве исследуемого объекта принят образец цементной армированной плиты размерами 210×210 мм (размер образца обусловлен геометрическими размерами камерной электропечи), толщиной 12,5 и 25 мм (рисунок 1, а). Крепление образца осуществляли при помощи стальной пластины через болтовое соединение (рисунок 1, б).



а) вид с лицевой стороны



б) вид с тыльной стороны с креплением

Рисунок 1. – Вид образца материала

Камерная электропечь SNOL-30/1300L с применением микропроцессорного программируемого терморегулятора Е5СК-Т создает тепловой режим в зависимости от необходимых данных в диапазоне температур от 50 до 1300 °С (рисунок 2, а). Рабочая камера электропечи выполнена из волокнистой термоизоляции в виде нагревательного блока с от-

крытым нагревательный элементом. Нагревательные элементы электропечи открытого типа, намотаны на трубки и размещены на боковых стенках (рисунок 2, б).



а) общий вид камерной электропечи



б) общий вид рабочей камеры с открытыми нагревательными элементами

Рисунок 2. – Внешний вид камерной электропечи с открытым нагревательный элементом

Следует отметить, что скорость роста температуры в камерной электропечи с использованием электрических нагревателей ниже скорости роста температуры стандартного пожара в соответствии с ГОСТ 30247.0 [8]. С целью воссоздания стандартного температурного режима пожара, рабочую камеру предварительно нагревали до 450 °С, затем испытуемый образец помещали в рабочую камеру с последующим повышением температуры с учетом роста стандартной кривой. На рисунке 3 представлены данные изменения температуры рабочей камеры печи в сопоставлении с изменением температуры по стандартному огневому режиму с допустимыми отклонениями по ГОСТ 30247.0 [8].

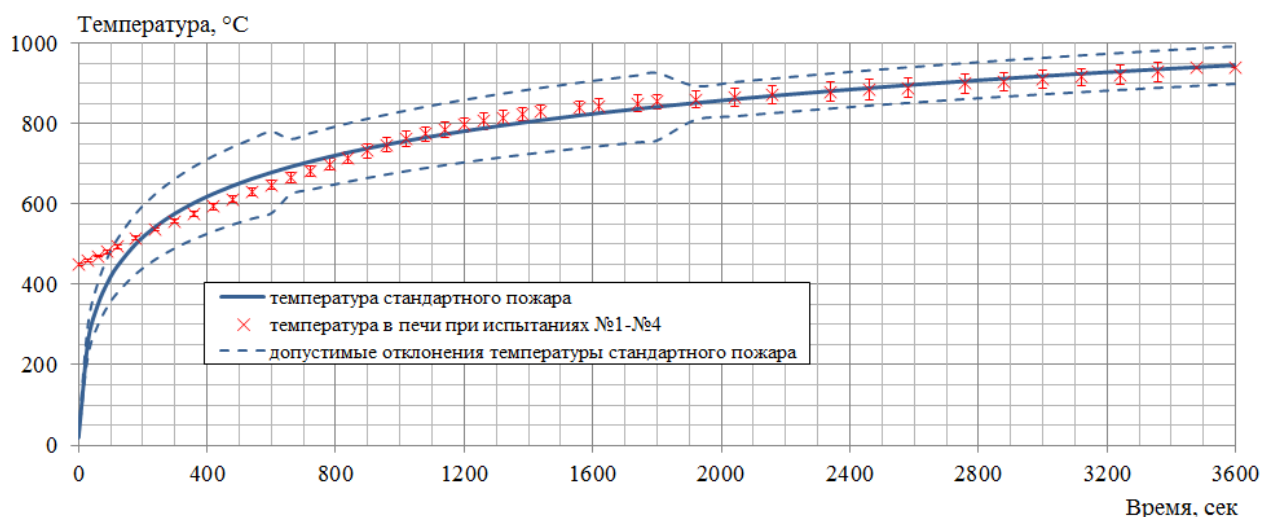


Рисунок 3. – График изменения температуры в камерной электропечи в ходе проведения экспериментальных исследований

Исходя из рисунка 3 следует, что динамика температуры в камерной электропечи соответствовала стандартному температурному режиму пожара по ГОСТ 30247.0 [8] с учетом допустимых отклонений, за исключением первых 100 с.

Перед проведением экспериментальных исследований, а также после их проведения определяли массу каждого образца с использованием лабораторных весов (тип ЕК-12К1) геометрические параметры с использованием линейки металлической (тип ЛС-ПР-30) и штангенциркуля (тип ST3505-150). В ходе проведения экспериментальных исследований регистрировали изменение температуры на обогреваемой и необогреваемой поверхностях

материала и в рабочей камере электропечи с использованием термоэлектрических преобразователей (тип ТХА(К)-1199/51/2/450/1,5/10) и измерителя регулятора типа «Сосна-004». Периодичность фиксации данных температуры была принята равной 60 с, длительность эксперимента – 3600 с.

Исследования осуществляли в 2 этапа, для приведенной толщины 12,5 и 25 мм, по 4 образца каждой толщины. Температура окружающей среды в ходе всех испытаний составляла 22 °С, влажность – 45 %. Среднее значение плотности образцов в результате высокотемпературного воздействия составило 80,84 % от исходного. На рисунке 4 представлены данные изменения средней температуры на обогреваемой и необогреваемой стороне образцов. Статистическая обработка результатов экспериментов была проведена согласно ГОСТ 8.207 [8].

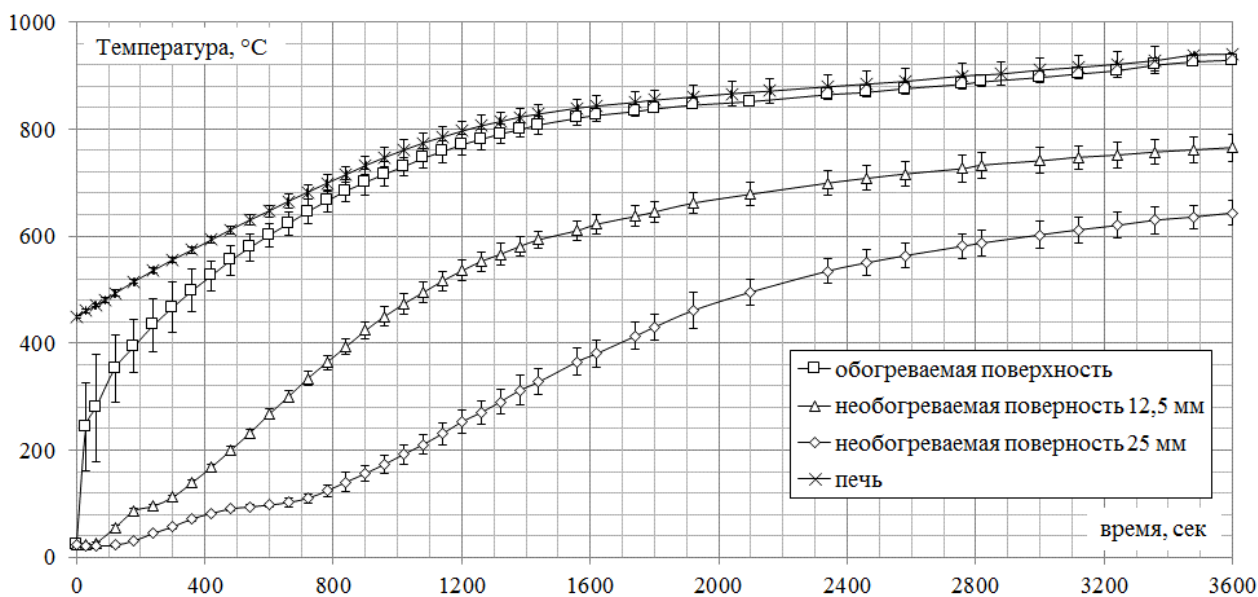


Рисунок 4. – График изменения температуры при проведении экспериментальных исследований

Как видно из графика, динамика повышения температуры необогреваемой поверхности экспериментальных образцов обусловлена его толщиной. Перегиб кривых нагрева в области 100 °С свидетельствует о процессах дегидратации. Дальнейшее повышение температуры характеризуется постепенным снижением скорости роста температуры в печи.

Решение обратной задачи теплопроводности с оценкой эффективных коэффициентов теплопроводности. Результаты проведенных экспериментальных исследований позволили решить обратную задачу теплопроводности для цементных армированных плит при нестационарном тепловом режиме стандартного пожара по ГОСТ 30247 [8]. Решение осуществлено с использованием программной системы конечно-элементного анализа.

Следует отметить, что работа программной системы конечно-элементного анализа основана на пошаговом решении системы уравнений теплового баланса, полученной на основе закона сохранения энергии. Суть метода конечных элементов состоит в том, что любую непрерывную величину возможно аппроксимировать дискретной моделью, которая состоит из множества кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей. Для такой аппроксимации необходимо знать значения искомых величин в определяющих точках – узлах. Конечно-непрерывные функции определяются с помощью значений непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемой области [12]. Для качественного учета тепловых потоков на необогреваемой стороне исследуемого образца, конечно-элементная модель была принята двухслойной, в качестве второго слоя была принята дверца электропечи, к которой примыкала необогреваемая сторона образца в ходе экспериментальных исследований. Тепловые потери от модельного образца через

дверцу электропечи учитывались с использованием эффективных теплофизических характеристик рассматриваемой дверцы, которые были определены отдельными экспериментальными исследованиями по аналогичной методике в условиях ненагруженной печи.

В качестве начальных условий в расчетной модели было принято, что температура во всех точках образца одинакова и равна температуре окружающей среды (22 °С).

Граничные условия позволяют определить закономерности теплообмена между нагревающей и окружающей средами и поверхностями образца. В качестве граничных условий теплообмена была принята комбинация граничных условий 1 и 3 рода. Так, радиационно-конвективный теплообмен, создаваемый в рабочей камере электропечи, принимали в качестве известной температуры на обогреваемой поверхности образца материала в ходе проведения экспериментальных исследований, что соответствует граничным условиям 1 рода. С необогреваемой стороны дверцы электропечи был принят радиационно-конвективный теплообмен с вертикальной стенки в окружающую среду (воздух), что соответствует граничным условиям 3 рода. Поскольку со стороны необогреваемой поверхности величина теплоотдачи за счет конвекции существенно влияет на результаты расчета, для ее определения использовали решение, 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 вынужденной конвекции (во всех случаях в качестве теплоносителя принят воздух). Значения коэффициента теплоотдачи конвекцией для рассматриваемой расчетной модели образца и крышки печи представлены на рисунке 5. Степень черноты наружной поверхности дверцы электропечи принята равной 0,7.

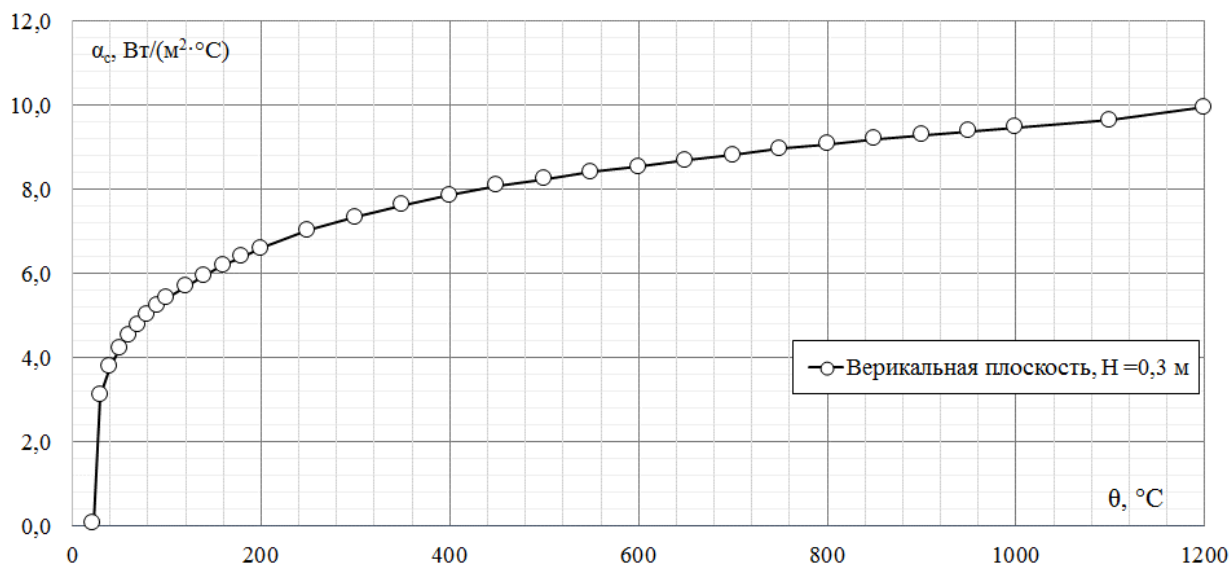


Рисунок 5. – Расчетные значения коэффициента теплоотдачи конвекцией для вертикальной стенки при теплообмене с воздухом (22 °С)

Кроме того, в граничных условиях были приняты следующие упрощения:

– ввиду того, что контактные и иные тепловые потери в принятой экспериментальной методике невозможно оценить, их влияние было отнесено к неопределенности расчетной модели, а полученные коэффициенты теплопроводности следует считать эффективными;

– ввиду того, что линейные размеры исследуемого образца и дверцы электропечи были много больше их толщины, направление теплового потока через исследуемые тела было принято перпендикулярным, а сам поток – одномерным, т. е. боковые поверхности расчетной модели были приняты с идеальной теплоизоляцией.

В ходе моделирования осуществляли аналитическую оценку теплофизических характеристик материала. В качестве искомой теплофизической характеристики в программной системе конечно-элементного анализа был принят эффективный коэффициент теплопроводности. Плотность материала и ее изменение в зависимости от температуры были приняты в ходе проведенных измерений и расчетов до и после проведения экспериментальных исследований.

Теплоемкость тела единичной массы представляет собой объем поглощенной энергии, данным телом которая расходуется на нагревание его на единицу температуры. Материал в ходе высокотемпературного воздействия характеризуется пиками по выделению или поглощению тепловой энергии. Данный факт объясняется фазовыми переходами материала путем его физико-химических превращений. При этом как правило данное явление в расчетных моделях учитывается в качестве удельной теплоемкости. Поскольку рассматриваемый материал является пористым влагосодержащим материалом, необходимо отметить, что в условиях высокотемпературного прогрева тепловая энергия расходуется не только на нагрев материала, но и на испарение влаги. Так как более 70 % заполнителя в цементной армированной плите составляет портландцемент и известняк в первом приближении в качестве расчетной удельной теплоемкости были приняты значения для влажного бетона с карбонатным заполнителем в соответствии с ТКП EN 1992-1-2 [11] (рисунок 6).

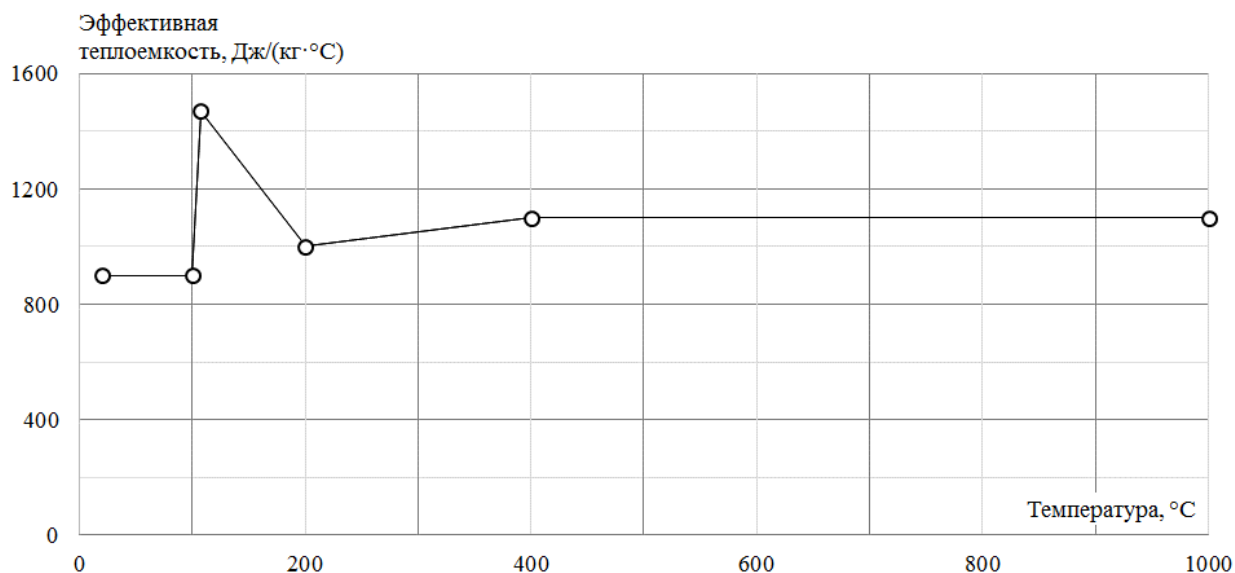


Рисунок 6. – Значения удельной теплоемкости для влажного бетона в диапазоне температур от 20 до 1000 °C в соответствии с ТКП EN 1992-1-2 [11]

Методика аналитической оценки заключалась в поэтапном подборе эффективного коэффициента теплопроводности до полного соответствия прогрева конечно-элементной модели в соответствии с данными экспериментальных исследований. Поэтапный подбор эффективного коэффициента теплопроводности осуществляли методом последовательных приближений. Для корректного описания нестационарного процесса теплопередачи при стандартном пожаре удовлетворительно подходит кусочно-линейная зависимость коэффициента теплопроводности, состоящая из пяти сегментов с узловыми точками при температуре 100, 200, 400, 700 и 1000 °C. При подборе коэффициента теплопроводности изначально предполагается постоянное значение коэффициента теплопроводности, т.е. не зависящее от температуры. С принятым значением коэффициента теплопроводности проводится расчет первой итерации, в результате которой оценивается отклонение расчетного времени достижения значения температуры на обогреваемой стороне, равной первой узловой точке (100 °C) от экспериментального значения. Если расчетное время менее экспериментального, значение коэффициента теплопроводности в рассматриваемой узловой точке

следует повысить на 10 %, если более – соответственно, понизить на 10 %. Итерации следует продолжать до тех пор, пока отклонение расчетного времени достижения температуры рассматриваемой узловой точки не достигнет 10 %. После достигнутого схождения в первой узловой точке, следует перейти ко второй узловой точке (200 °С) и провести аналогичные итерации, а затем те же действия провести для третьей, четвертой и пятой узловой точки соответственно (400, 700 и 1000 °С). Результат подбора эффективного коэффициента теплопроводности для цементной плиты представлен на рисунке 7.

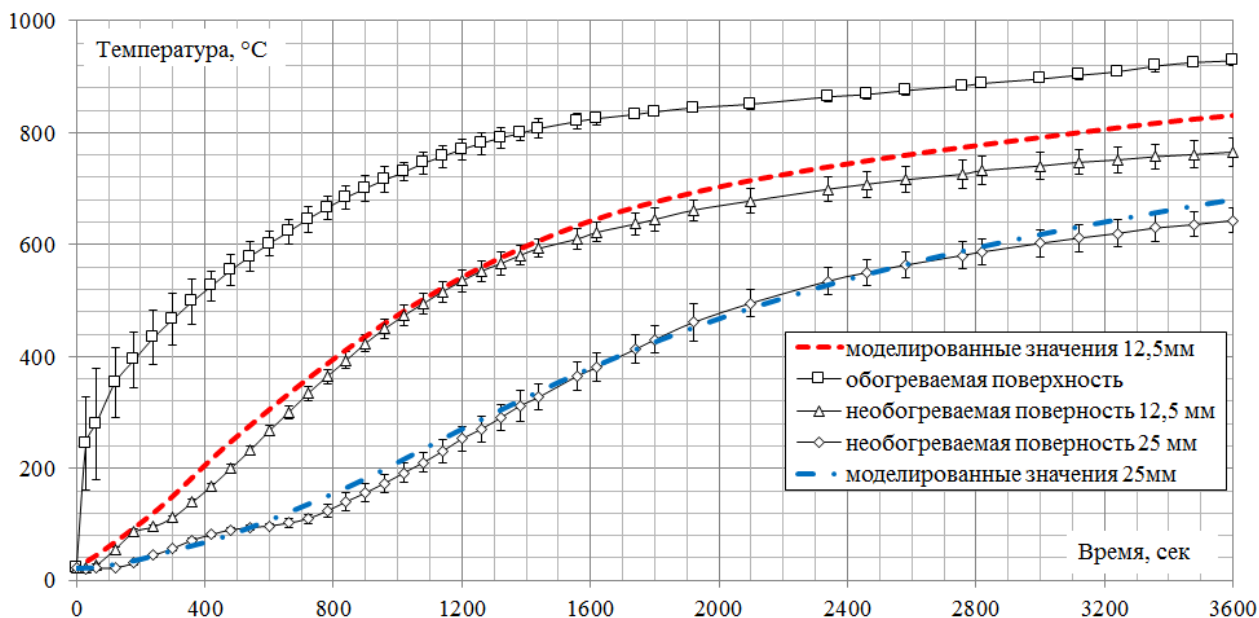


Рисунок 7. – Сопоставление экспериментальных данных изменения температуры на необогреваемой поверхности образцов со значениями, полученными по результатам численного моделирования

Следует отметить удовлетворительную сходимость расчетных с экспериментальными данными, при этом отклонение принято в сторону запаса безопасности, т.е. аналитическое решение показывает более интенсивный прогрев по сравнению с результатами экспериментальных исследований. Основные результаты определения эффективного коэффициента теплопроводности от температуры для принятых значений плотности и теплоемкости цементной армированной плиты толщиной 12,5 и 25 мм при использовании расчетной модели и решении обратных задач теплопереноса представлены на рисунке 8.

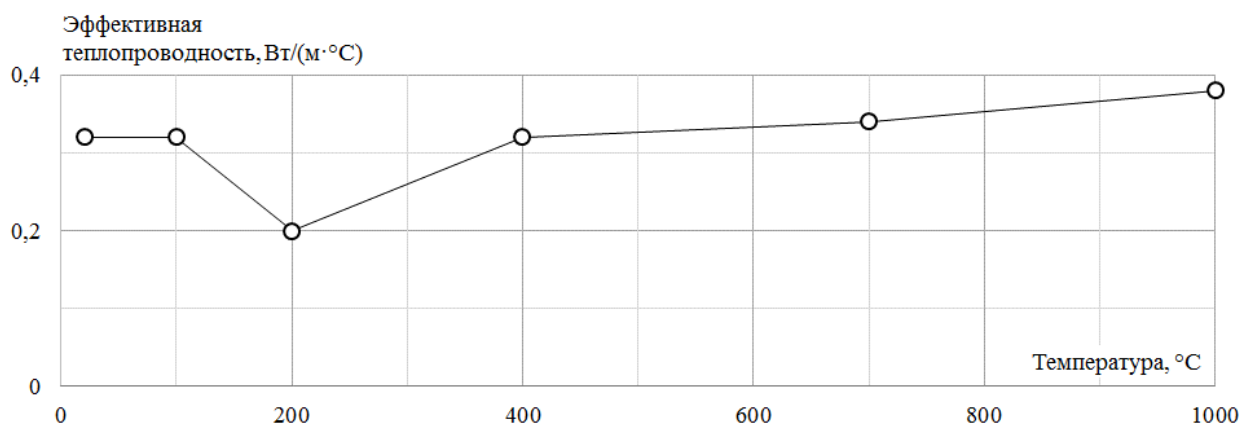


Рисунок 8. – График изменения эффективного коэффициента теплопроводности от температуры

Заключение. В результате анализа существующих методов оценки теплофизических характеристик для строительных материалов установлено, что они не могут быть

применены для решения задач огнестойкости ввиду ограничений по параметрам исследуемых образцов, диапазону и видам теплового режима, другими особенностями специализированных лабораторных установок.

Для решения задач огнестойкости теплофизические характеристики целесообразно определять в условиях температурного режима, близкого к стандартному пожару по ГОСТ 30247 [8] путем решения обратной задачи теплопроводности с применением программных систем конечно-элементного анализа.

Для оценки эффективного коэффициента теплопроводности строительных материалов предложена расчетно-экспериментальная методика включающая:

1. Экспериментальные исследования модельных образцов материалов в условиях нестационарного режима стандартного пожара в камерной электропечи с фиксацией динамики температуры от времени на обогреваемой и необогреваемой поверхности образца.

2. Аналитическое решение задачи теплопроводности для неограниченных пластин в системе конечно-элементного анализа, с оценкой эффективного коэффициента теплопроводности методом конечных приближений.

На основе расчетно-экспериментальной методики определен эффективный коэффициент теплопроводности цементных армированных плит для нестационарных режимов нагрева в условиях пожара. Результаты решения задачи теплопроводности в системе конечно-элементного анализа показывают удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 30290-94 Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности поверхностным преобразователем // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск, НПП РУП «Стройтехнорм», 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
2. ГОСТ 30256-94 Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности поверхностным цилиндрическим зондом // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск, НПП РУП «Стройтехнорм», 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
3. СТБ 1618-2006 Материалы и изделия строительные. Методы определения теплопроводности при стационарном тепловом режиме // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск, НПП РУП «Стройтехнорм», 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
4. СТБ ЕН 12667-2007 Теплотехнические свойства. Строительных материалов и изделий. Определение теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме с использованием прибора, включающего плиты, горячую охранную зону или тепломер. Материалы с высоким и средним коэффициентом теплопроводности // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск, НПП РУП «Стройтехнорм», 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
5. СТБ ЕН 12939-2007 Теплотехнические свойства. Строительных материалов и изделий. Определение теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме с использованием прибора, включающего плиты, горячую охранную зону или тепломер. Материалы утолщенные с высоким и средним коэффициентом теплопроводности // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск, НПП РУП «Стройтехнорм», 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
6. ГОСТ 23619-79. Материалы и изделия огнеупорные теплоизоляционные муллитокремнеземистые стекловолоконистые. Технические условия. – Введ 08.05.79. – М.: Издательство стандартов, 1979. – 15 с.
7. ГОСТ 23250-78 Материалы строительные. Метод определения удельной теплоемкости // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск, НПП РУП «Стройтехнорм», 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM)

8. ГОСТ 30247.0-94 Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск, НПП РУП «Стройтехнорм», 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM)
9. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов измерений. – Введ. 01.01.77. – М.: Издательство стандартов, 2001. – 7 с.
10. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1988: – 143 с.
11. ТКП EN 1992-1-2-2009 (02250) Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск, НПП РУП «Стройтехнорм», 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
12. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference, Release 15.0 ANSYS, Inc. November 2013.
13. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967: – 600 с.

CEMENT BOARDS THERMAL CONDUCTIVITY BASED ON EXPERIMENTAL RESEARCH AND NUMERICAL SIMULATION DATA IN RELATION TO NONSTATIONARY HEAT FLOWS

Vadim Kudryashov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Siarhei Batyan

The state educational establishment «University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus», Minsk, Belarus

Purpose. The paper is devoted to cement boards thermal properties based on experimental research and numerical simulation data in relation to nonstationary heat flows.

Methods. Thermal properties were estimated with experimental research and numerical simulation with both were preliminarily formulated on the base of analogous methods analysis.

Findings. Experimental temperature-time dependencies at both surfaces of flat cement boards samples for different thicknesses in relation to nonstationary heat flows were found. The inverse heat conduction problem was solved and the effective thermal conductivity coefficients were estimated.

Application field of research. The obtained thermal properties can be used in thermal problem evaluating during fire resistance assessment procedures.

Conclusions. (As a result, effective thermal conductivity coefficients for flat cement boards samples were found based on experimental research and numerical simulation data in relation to nonstationary heat flows. Obtained thermal properties give satisfactory convergence used in finite element analysis system simulation compared with the experimental data.

Keywords: fire resistance; thermal properties; thermal conductivity coefficient; experimental data; inverse heat conduction problem; standard temperature-time curve.

(The date of submitting: April 5, 2017)

REFERENCES

1. Interstate Standard 30290-94 *Materials and products for construction. Method for determining the thermal conductivity of a surface converter.* The full-text information retrieval system «StroyDOKUMENT». Electronic text data and programs (700 Mb). Minsk, RUE «Stroytechnorm», 2016. 1 electronic optical disc (CD-ROM). (rus).
2. Interstate Standard 30256-94 *Materials and products for construction. Method for determining the thermal conductivity of a surface cylindrical probe.* The full-text information retrieval system «StroyDOKUMENT». Electronic text data and programs (700 Mb). Minsk, RUE «Stroytechnorm», 2016. 1 electronic optical disc (CD-ROM). (rus).
3. State standard of the Republic of Belarus 1618-2006 *Materials and products for construction. Methods for determining the thermal conductivity under steady-state thermal conditions.* The full-text information retrieval system «StroyDOKUMENT». Electronic text data and programs (700 Mb). Minsk, RUE «Stroytechnorm», 2016. 1 electronic optical disc (CD-ROM). (rus).
4. State standard of the Republic of Belarus EN 12667-2007 *Thermotechnical properties. Building materials and products. Determination of thermal conductivity and thermal resistance in a stationary thermal mode using a device that includes slabs, a hot guard zone or a heat meter. Materials with high and average thermal conductivity.* The full-text information retrieval system «StroyDOKUMENT». Electronic text data and programs (700 Mb). Minsk, RUE «Stroytechnorm», 2016. 1 electronic optical disc (CD-ROM). (rus).
5. State standard of the Republic of Belarus EN 12939-2007 *Thermotechnical properties. Building materials and products. Determination of thermal conductivity and thermal resistance in a stationary thermal mode using a device that includes slabs, a hot guard zone or a heat meter. Materials thickened with high and average thermal conductivity.* The full-text information retrieval system «StroyDOKUMENT». Electronic text data and programs (700 Mb). Minsk, RUE «Stroytechnorm», 2016. 1 electronic optical disc (CD-ROM). (rus).
6. Interstate Standard 23619-79. *Materials and products refractory heat-insulating mullite-siliceous fiberglass. Technical conditions.* Enter 08.05.79. Moscow: Publishing House of Standards, 1979. 15 p.
7. Interstate Standard 23250-78 *Building materials. Method for determination of specific heat.* The full-

- text information retrieval system «StroyDOKUMENT». Electronic text data and programs (700 Mb). Minsk, RUE «Stroytechnorm», 2016. 1 electronic optical disc (CD-ROM). (rus).
8. Interstate Standard 30247.0-94 *Construction constructions. Test methods for fire resistance. General requirements*. The full-text information retrieval system «StroyDOKUMENT». Electronic text data and programs (700 Mb). Minsk, RUE «Stroytechnorm», 2016. 1 electronic optical disc (CD-ROM). (rus).
 9. Interstate Standard 8.207-76. *Direct measurements with multiple observations. Methods for processing the results of measurements*. Enter 01.01.77. Moscow: Publishing House of Standards, 2001. 7 p.
 10. Jakovlev A.I. *Calculation of fire resistance of building structures*. М.: Stroiizdat, 1988. 143 p.
 11. Technical Code of Good Practice EN 1992-1-2-2009 (02250) *Design of reinforced concrete structures. Part 1-2. General rules for determining fire resistance*. The full-text information retrieval system «StroyDOKUMENT». Electronic text data and programs (700 Mb). Minsk, RUE «Stroytechnorm», 2016. 1 electronic optical disc (CD-ROM). (rus).
 12. *ANSYS Mechanical APDL Theory Reference*, Release 15.0 ANSYS, Inc. November 2013.
 13. Lykov A.V. *Theory of heat conduction*. М.: Higher School, 1967. 600 p.