

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2022.6-1.5>

УДК [536.2+536.63]:691::614.841.332

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ СТАНДАРТНОГО РЕЖИМА ПОЖАРА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОГНЕСТОЙКОСТИ

Ботян С.С., Кудряшов В.А.

Цель. На основе экспериментальных данных, полученных в камерной электропечи, и численного моделирования в системе конечно-элементного анализа определить зависимости эффективных теплофизических характеристик строительных материалов от температуры в условиях воздействия стандартного температурного режима пожара для решения задач огнестойкости.

Методы. Экспериментальные исследования, метод конечно-элементного анализа, метод параметрической оптимизации.

Результаты. Проведен анализ ранее выполненных экспериментальных исследований в камерной электропечи образцов цементных плит, армированных стеклосеткой (плотностью 1100 кг/м³) и минераловатных плит (плотностью 37 и 160 кг/м³) при стационарном и нестационарном условиях нагрева. Разработаны расчетные конечно-элементные модели нагрева образцов в системе конечно-элементного анализа. С применением метода параметрической оптимизации определены зависимости эффективного коэффициента теплопроводности и эффективной объемной теплоемкости цементных плит, армированных стеклосеткой (плотностью 1100 кг/м³) и минераловатных плит (плотностью 37 и 160 кг/м³) от температуры для решения задач огнестойкости.

Область применения исследований. Полученные зависимости эффективных теплофизических характеристик могут быть использованы при оценке огнестойкости строительных конструкций, а также при разработке огнестойких решений конструктивных элементов зданий.

Ключевые слова: огнестойкость, экспериментальные исследования, коэффициент теплопроводности, коэффициент объемной теплоемкости, метод конечно-элементного анализа, параметрическая оптимизация.

(Поступила в редакцию 5 января 2022 г.)

Введение

Развитие теории огнестойкости продиктовано постоянной необходимостью разработки новых, совершенствования существующих расчетных и экспериментальных методов оценки огнестойкости строительных конструкций [1–3]. В связи с тем что огнестойкость строительных конструкций определяется прежде всего их нагревом, установление теплофизических характеристик (далее – ТФХ) строительных материалов, входящих в уравнения аналитической теории теплопроводности, является актуальной задачей.

Современные строительные конструкции зданий предполагают широкое применение облегченных отделочных, теплоизолирующих и огнезащитных материалов (пористых, минераловатных, вспучивающихся, дегидратирующих и пр.), в которых при воздействии на них повышенных температур в условиях пожара протекают необратимые физико-химические процессы, что, в свою очередь, приводит к нелинейному изменению их ТФХ. Данный факт обуславливает необходимость разработки точных методов оценки ТФХ строительных материалов в условиях высокотемпературного воздействия стандартного температурного режима пожара для решения задач огнестойкости.

Состояние проблемы на современном этапе. В соответствии с дифференциальным уравнением теплопроводности к ТФХ относят коэффициент теплопроводности, теплоемкость (удельная или объемная) либо коэффициент температуропроводности в зависимости от формулировки тепловой задачи. Значения ТФХ материалов обусловлены прежде всего

их микро- и макроструктурой, а при повышенных температурах их изменение – в том числе сопровождающимися химическими и физическими процессами, которые, в свою очередь, зависят от условий экспериментов (диапазон температур, скорость нагрева и пр.). Ввиду того что классическое дифференциальное уравнение теплопроводности в полной мере не учитывает кинетику указанных процессов для разлагающихся при высоких температурах материалов (дегидратирующих, вспучивающихся, пористых и пр.), их учитывают в ТФХ, при этом полученные в таких условиях ТФХ называют эффективными.

ТФХ определяют преимущественно экспериментальными способами [4]. Условно все экспериментальные способы оценки ТФХ можно разделить на 2 группы: абсолютные (с непосредственным измерением температуры либо теплового потока исследуемого материала) и относительные (измерения проводятся относительно эталонного образца). Так как все способы по сути отражают решение дифференциального уравнения теплообмена относительно ТФХ при известных, в том числе измеряемых граничных условиях (так называемая коэффициентная обратная задача теплопроводности [5; 6]), то при выборе конкретного способа ориентируются прежде всего на условия нагрева (стационарный, нестационарный режим), размерность теплового потока (одномерный, двух-, трехмерный в декартовой, цилиндрической, сферической системе координат), а также форму, размеры, гомогенность образцов, иные особенности и возможности испытательных установок (например, диапазон требуемых температур).

Ввиду того что многие строительные материалы не являются огнеупорными, их нагрев до высоких температур, как правило, сопровождается многообразием химических и физических процессов, существующие установки не всегда способны корректно оценить ТФХ в условиях повышенных температур, в том числе с учетом динамики стандартного температурного режима пожара¹, а иногда и переменных граничных условий теплообмена. Для таких случаев наиболее приемлемыми становятся способы оценки ТФХ, основанные на решении коэффициентных обратных задач теплопроводности, с использованием имеющихся высокотемпературных установок – электрических и огневых печей.

Особенностью обратных задач теплообмена является то, что они относятся к классу так называемых некорректно поставленных задач [6; 7]. Некорректность в данном случае объясняется вариативностью их постановки, а также неоднозначностью и неустойчивостью их решения. Для решения некорректно поставленных обратных задач разработаны многочисленные методы и алгоритмы, наиболее распространенными из которых являются метод регуляризации (итерационной или вариационной) и функциональной аппроксимации с использованием численных способов решения [6–8].

Указанный способ был успешно реализован в 80–90 гг. XX в. для наиболее простых распространенных строительных материалов [5]: бетонов, арматурной стали, некоторых видов огнезащитных материалов для стальных конструкций. Однако искомые теплофизические характеристики представлены в виде линейных зависимостей значений эффективного коэффициента теплопроводности и эффективной удельной теплоемкости от температуры и плотности в виде константы. Указанные зависимости не учитывают в полной мере процессы, происходящие при высокотемпературном нагреве, а для тонкостенных материалов, а также материалов с существенно отличными рецептурой и способом изготовления могут привести к значительным неопределенностям при оценке огнестойкости.

В настоящей статье представлены результаты научных исследований, в которых получены зависимости значений эффективных ТФХ от температуры для материалов, составляющих строительные перегородки: цементных плит, армированных стеклосеткой (плотностью 1100 кг/м³) и минераловатных плит (плотностью 37 и 160 кг/м³). Зависимо-

¹ 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: 15.12.2021.

сти получены с использованием экспериментально-расчетного метода, камерной электропечи и численного моделирования в системе конечно-элементного анализа для решения обратной задачи теплообмена.

Основная часть

В ходе экспериментальных исследований для нагрева строительных материалов [9] использовали лабораторную муфельную электропечь ЭКПС-10/1300, которая позволяет создавать тепловой режим в диапазоне температур от 20 до 1300 °С. Описание образцов, методика выполнения экспериментальных исследований, схема расположения термоэлектрических преобразователей подробно изложены в работе [9].

Для исключения вариативности решения обратной задачи теплообмена исследования были разделены на два этапа. На первом этапе проводили нагрев образцов для дискретных значений температур в стационарных условиях. Таким образом, в задаче теплообмена была исключена объемная теплоемкость, т.к. изменение температуры во времени в указанных условиях стремилось к нулю, а единственной неизвестной величиной остался эффективный коэффициент теплопроводности. С целью минимизации затрат в стационарных условиях проводили экспериментальные исследования для 4 дискретных шагов: 275, 550, 770 и 1150 °С (принимая значения при нормальных условиях известными). Результаты экспериментальных исследований по нагреву образцов в условиях стационарного теплового режима приведены в таблице 1.

На втором этапе проводили нагрев образцов по нестационарной зависимости температуры стандартного режима пожара от времени. При этом в задаче теплообмена значения эффективного коэффициента теплопроводности принимали известной величиной, а обратную задачу решали вновь для единственной неизвестной величины – эффективной объемной теплоемкости. Так как оценить изменение плотности (снижение массы и объема образцов) во время проведения эксперимента является достаточно сложной задачей, а оценка по результатам измерений до и после термического воздействия приводит к определенным неточностям и искажениям, в экспериментальных исследованиях при нестационарных условиях нагрева определяли именно объемную, а не удельную теплоемкость. Результаты экспериментальных исследований по нагреву образцов в условиях стационарного теплового режима приведены на рисунке 1.

Таблица 1. – Результаты экспериментальных исследований по нагреву образцов в условиях стационарного теплового режима

Температура в печи в условиях стационарного теплового режима, °С	Температура на необогреваемой поверхности образца, °С		
	цементная плита плотностью 1100 кг/м ³ и толщиной 12,5 мм	минераловатная плита плотностью 160 кг/м ³ и толщиной 25 мм	минераловатная плита плотностью 37 кг/м ³ и толщиной 25 мм
275 ± 7	234 ± 13	212 ± 11	219 ± 13
550 ± 6	503 ± 19	468 ± 13	481 ± 13
770 ± 8	699 ± 20	682 ± 15	701 ± 14
1150 ± 11	1105 ± 21	1150 ± 20	1150 ± 15

Примечание. Указан доверительный интервал в °С для прямых измерений температуры².

Исходя из представленных в таблице данных минераловатные плиты плотностью 37 кг/м³ прогреваются интенсивнее в сравнении с минераловатными плитами плотностью 160 кг/м³. Данный факт обусловлен различной кажущейся плотностью плит, расстоянием между составными волокнами ваты и содержанием воздуха в них, что в итоге ведет к более интенсивному нагреву.

² ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов измерений. – Введ. 01.01.77. – М.: Издательство стандартов, 2001. – 7 с.

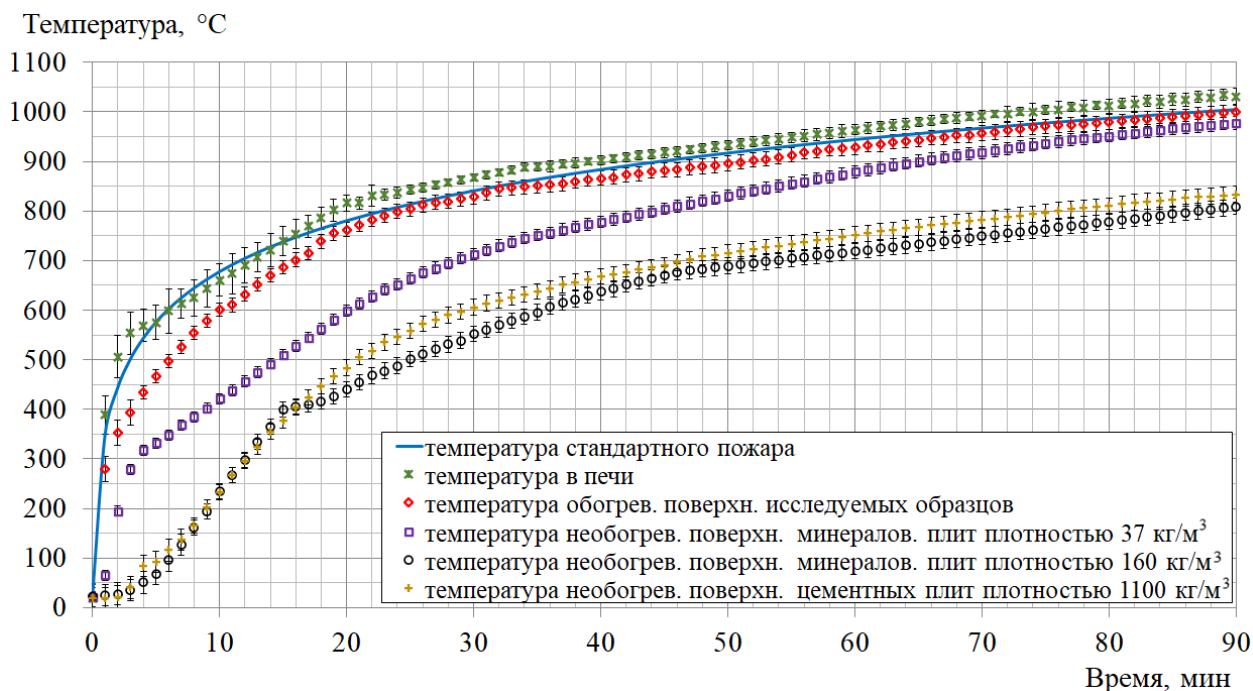


Рисунок 1. – Зависимости температуры от времени для исследуемых образцов при проведении экспериментальных исследований в нестационарных условиях нагрева

Из графика (рис. 1) следует, что динамика температуры в камерной печи соответствовала температурной зависимости стандартного пожара от времени. Зависимости температуры со стороны необогреваемой поверхности образцов характеризуются точками излома в области 300 °С для минераловатных плит плотностью 37 кг/м³ и 400 °С – для плит плотностью 160 кг/м³, что объясняется физико-химическими превращениями (выгоранием органических связующих). Отличия в зависимостях для минераловатных плит обусловлены прежде всего их плотностью, что приводит на 90-й мин к разнице в температуре на необогреваемой поверхности, равной 160 °С. Для образцов цементных плит изменение скорости роста температуры в области 100 °С свидетельствует об испарении структурно-связанной воды в материале. Дальнейшее изменение температуры цементных плит свидетельствует об отсутствии значимых превращений при повышении температуры.

Полученные экспериментальные данные по нагреву материалов в стационарных и нестационарных условиях нагрева использовались при определении эффективных ТФХ.

Для определения зависимостей эффективного коэффициента теплопроводности и эффективной объемной теплоемкости от температуры разработаны компьютерные расчетные конечно-элементные модели в программной системе ANSYS/Thermal^{3,4}, с применением метода параметрической оптимизации⁵, относительно искомых эффективных ТФХ. Описание расчетной конечно-элементной модели с указанием начальных и граничных условий, допущений подробно описаны в работе [8].

Программная система ANSYS основана на методе конечно-элементного анализа, позволяющем получить приближенное численное решение дифференциальных уравнений. 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 решения дифференциального уравнения теплопроводности методом конечных элементов используется следующий алгоритм:

³ ANSYS Mechanical APDL Theory Reference: User's Guide. – Release 2020 R1. – January 2020. – 988 p.

⁴ Thermal Analysis Guide: User's Guide. – Release 2020 R1. – January 2020. – 98 p.

⁵ ANSYS ACT Customization Guide for DesignXplorer: User's Guide. – Release 2020 R1. – January 2020. – 28 p.

1. Дискретизация рассматриваемой области (замена непрерывной среды (области) совокупностью конечных элементов заданной формы, которые соединены в узлах). Значение температуры в точках считается неизвестным и подлежит определению.

2. Аппроксимация искомой величины температуры в каждом элементе полиномом, который определяется с помощью узловых значений температуры. Для каждого конечного элемента определяется свой полином, с сохранением непрерывного температурного поля вдоль границ элемента, с последующим формированием множества кусочно-непрерывных функций формы расчетной области.

3. Построение матриц теплопроводности, теплоемкости, градиентов температур элементов и векторов узловых тепловых потоков.

4. Решение систем уравнений для конечно-элементной модели, с учетом заданных граничных условий, с последующим анализом и определением неизвестных температур.

Параметрическая оптимизация ТФХ. Суть метода параметрической оптимизации заключается в проведении серии расчетов дифференциального уравнения теплопроводности с переменным значением искомого теплофизического параметра с последующим анализом и поиском значения, удовлетворяющего заданному отклонению от известной экспериментальной температуры.

В качестве переменных состояний в модели параметризации использованы результаты экспериментальных исследований – значения температуры (в контрольных точках) 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 от расчетных значений. При параметрической оптимизации выполняется поиск искомого теплофизического параметра (для стационарного теплообмена – коэффициент теплопроводности, для нестационарного – объемная теплоемкость) из массива расчетных данных, при котором выполняется условие заданной точности поверхности отклика для расчетной и экспериментальной температуры:

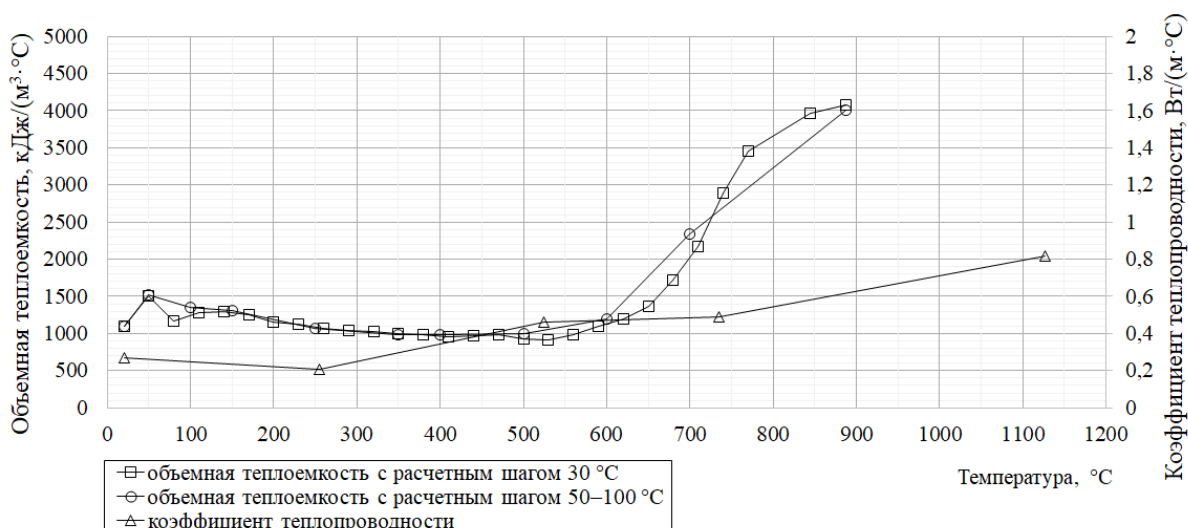
$$f_1(\tau) - f_2(\tau) \leq \varepsilon, \quad (1)$$

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;

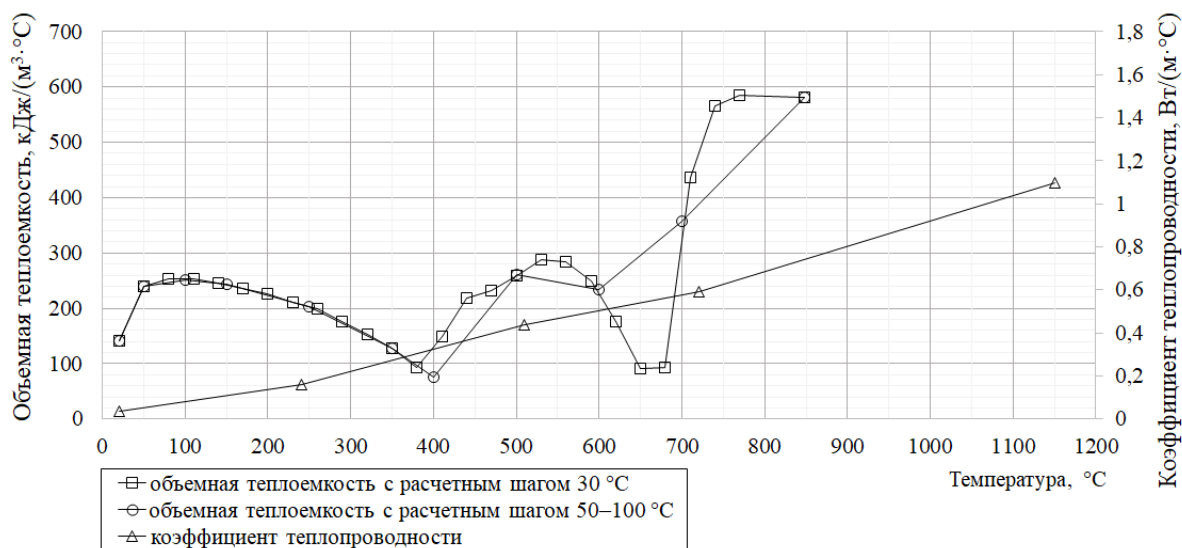
ε – значение допустимых отклонений поверхности отклика (принимали не более 3 % от расчетной температуры в заданный момент времени).

В результате применения метода параметрической оптимизации определены зависимости эффективных ТФХ от температуры цементной плиты плотностью 1100 кг/м³ и минераловатных плит плотностью 37 и 160 кг/м³ (рис. 2).

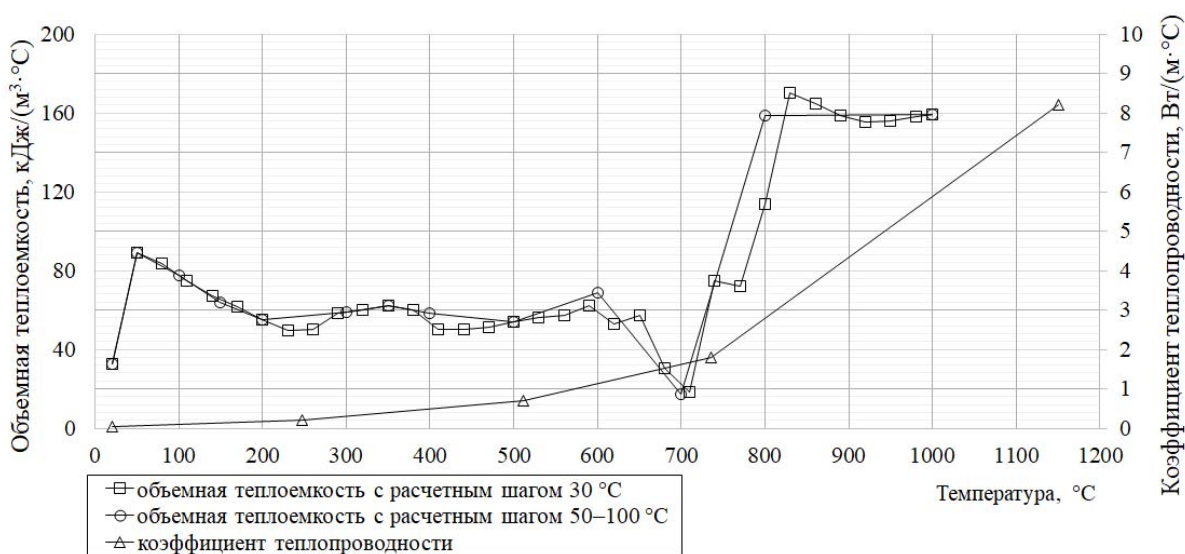
Как следует из графиков, динамика роста эффективного коэффициента теплопроводности для образца цементной плиты (рис. 2а) характеризуется участком снижения до 250 °С с последующим практически линейным ростом значения. Изменение теплопроводности для минераловатных плит плотностью 160 кг/м³ (рис. 2б) имеет практически линейный характер, для минераловатных плит плотностью 37 кг/м³ (рис. 2в) – близкий к экспоненциальному рост.



а – образец цементной плиты плотностью 1100 кг/м³ и толщиной 12,5 мм



б – образец минераловатной плиты плотностью 160 кг/м³ и толщиной 25 мм



в – образец минераловатной плиты плотностью 37 кг/м³ и толщиной 25 мм

Рисунок 2. – Зависимости эффективных ТФХ от температуры для исследуемых образцов

Разница в изменении эффективного коэффициента теплопроводности для минераловатных плит плотностью 160 кг/м^3 (от $0,037$ до $1,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$) и минераловатных плит плотностью 37 кг/м^3 (от $0,036$ до $8,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$) для принятого диапазона температур обусловлена кажущейся плотностью материала, расстоянием между составными волокнами ваты и содержанием воздуха. При воздействии повышенных температур в плитах с меньшей плотностью передача теплоты осуществляется преимущественно излучением, в то время как в более плотных минераловатных плитах этот эффект менее выражен, что в итоге влияет на величину эффективного коэффициента теплопроводности.

Для зависимостей эффективной объемной теплоемкости характерны скачкообразные изменения, что свидетельствует о физико-химических превращениях в материалах, некоторые видны на перегибах кривых нагрева материалов (рис. 1), а также дифференциально-термического анализа [10]. Для уточнения тепловых пиков в модели параметрической оптимизации эффективную объемную теплоемкость определяли для целевых функций с постоянным шагом величиной в 30 °C и переменным – от 50 до 100 °C в зависимости от тепловых пиков. Из графиков следует, что при уменьшении расчетного шага увеличивается количество пиков, но в целом графики характеризуются схожей интегральной кривой.

На рисунке 3 представлены результаты сравнения экспериментальных и расчетных температур цементных и минераловатных плит с учетом полученных эффективных ТФХ (с постоянным шагом величиной в 30 °C).

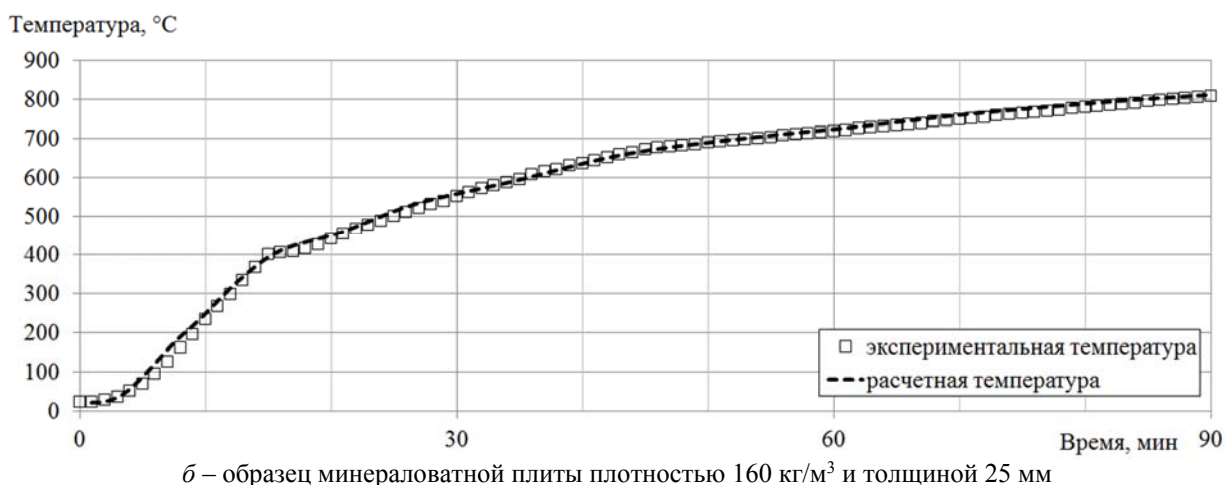
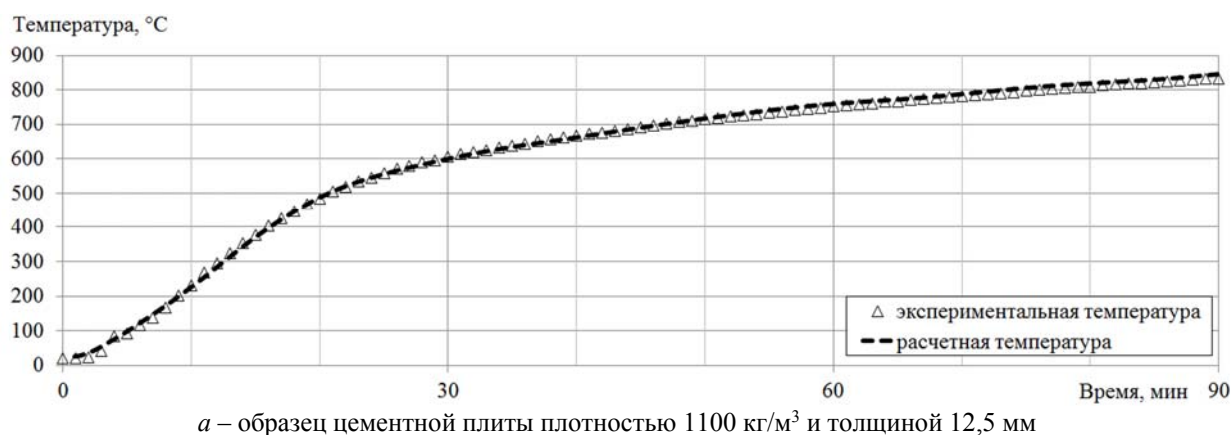
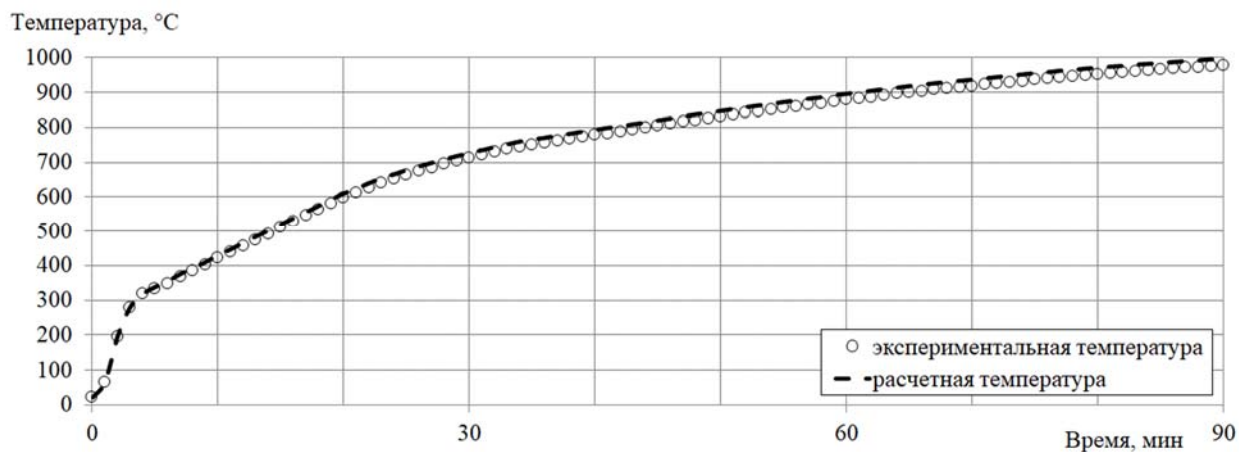


Рисунок 3. – Зависимости экспериментальной и расчетной температуры на необогреваемой стороне исследуемых образцов



6 – образец минераловатной плиты плотностью 37 кг/м³ и толщиной 25 мм

Рисунок 3. – Зависимости экспериментальной и расчетной температуры на необогреваемой стороне исследуемых образцов

Как видно из графиков (рис. 3), зависимости экспериментальных и расчетных температур для образцов цементных и минераловатных плит, полученные с использованием эффективных ТФХ, удовлетворительно согласуются между собой.

Заключение

В ходе проведенного анализа экспериментальных способов оценки ТФХ установлено, что ТФХ материалов, используемые для оценки огнестойкости строительных конструкций, должны определяться при аналогичных повышенных температурах, в условиях высокотемпературного воздействия стандартного температурного режима пожара.

Проведен анализ ранее выполненных экспериментальных исследований в камерной электропечи при стационарном и нестационарном условиях нагрева образцов цементных плит, армированных стеклосеткой (плотностью 1100 кг/м³) и минераловатных плит (плотностью 37 и 160 кг/м³), с оценкой изменения температуры в контрольных точках на обогреваемой и необогреваемой поверхностях исследуемых образцов.

Разработаны расчетные конечно-элементные модели нагрева образцов в системе конечно-элементного анализа и с применением метода параметрической оптимизации и экспериментальных данных, полученных в камерной электропечи, определены зависимости эффективного коэффициента теплопроводности и эффективной объемной теплоемкости от температуры образцов цементных плит, армированных стеклосеткой (плотностью 1100 кг/м³) и минераловатных плит (плотностью 37 и 160 кг/м³) для решения задач огнестойкости. Определенные указанным способом эффективные ТФХ позволяют более точно оценить температурные поля в заданном диапазоне температур при оценке огнестойкости строительных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Еналеев, Р.Ш. Инженерные методы прогнозирования огнестойкости / Р.Ш. Еналеев [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15, № 21. – С. 38–41.
2. Мкртычев, О.В. Современные подходы к определению предела огнестойкости зданий и сооружений / О.В. Мкртычев, Д.С. Сидоров // Вестник НИЦ «Строительство». – 2011. – № 3-4. – С. 96–111.
3. Крутских, А.В. Решение задачи огнестойкости строительных конструкций с применением средств автоматизированного проектирования / А.В. Крутских [и др.] // Инновации и моделирование в строительном материаловедении: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. – Тверь: Тверской гос. техн. ун-т, 2019. – С. 55–59.
4. Ботьян, С.С. Теплопроводность цементных армированных плит при нестационарном тепловом режиме на основе данных экспериментальных исследований и численного моделирования /

- С.С. Ботян, В.А. Кудряшов // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2017. – Т. 1, № 2. – С. 139–152. DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-2.139.
5. Яковлев, А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций / А.И. Яковлев. – М.: Стройиздат, 1988. – 143 с.
 6. Алифанов, О.М. Обратные задачи теплообмена / О.М. Алифанов. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
 7. Бек, Д. Некорректные обратные задачи теплопроводности: пер. с англ. / Д. Бек, Б. Блакуэлл, Ч. Сент-Клэр. – М.: Мир, 1989. – 312 с.
 8. Коздоба, Л.А. Методы решения обратных задач теплопереноса / Л.А. Коздоба, П.Г. Круковский. – Киев: Наукова думка, 1982. – 358 с.
 9. Ботян, С.С. Экспериментально-расчетная методика оценки теплофизических характеристик строительных материалов с использованием камерной электропечи для решения задач огнестойкости / С.С. Ботян [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 1. – С. 5–19. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-1.5.
 10. Кудряшов, В.А. Теплофизические характеристики цементных армированных плит для решения задач нестационарного высокотемпературного нагрева / В.А. Кудряшов [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 3. – С. 327–334. DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-3.327.

**Оценка эффективных теплофизических характеристик строительных материалов
в условиях воздействия стандартного режима пожара для решения
задач огнестойкости**

**Evaluation of the effective thermal properties of building materials under the influence
of a standard fire mode for solving fire resistance tasks**

Ботян Сергей Сергеевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты МЧС
Беларуси», кафедра пожарной безопасности,
начальник кафедры

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, Беларусь, г. Минск

Email: aseckis@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8593-4413

Sergey S. Batyan

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

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Belarus, Minsk

Email: aseckis@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8593-4413

Кудряшов Вадим Александрович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты МЧС
Беларуси», отдел научной и инновационной
деятельности, начальник отдела

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, Беларусь, г. Минск

Email: 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 Department

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Belarus, Minsk

Email: vadkud@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4889-1060

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2022.6-1.5>

EVALUATION OF THE EFFECTIVE THERMAL PROPERTIES OF BUILDING MATERIALS UNDER THE INFLUENCE OF A STANDARD FIRE MODE FOR SOLVING FIRE RESISTANCE TASKS

Batyan S.S., Kudryashov V.A.

Purpose. On the basis of experimental data obtained in a chamber electric furnace and numerical modeling in the system of finite element analysis, to determine the dependence of thermal properties on the temperature of building materials under the influence of a standard fire mode to solve fire resistance tasks.

Methods. Experimental studies, finite element analysis method, parametric optimization method.

Findings. An analysis was made of earlier experimental studies in a chamber electric furnace of samples of cement boards reinforced with fiberglass (density 1100 kg/m³) and mineral wool boards (density 37 and 160 kg/m³) under stationary and non-stationary heating conditions. Calculated finite element models of heating samples in the system of finite element analysis have been developed. Using the parametric optimization method, the dependences of the effective thermal conductivity coefficient and the effective volumetric heat capacity of cement boards reinforced with glass mesh (density 1100 kg/m³) and mineral wool boards (density 37 and 160 kg/m³) on temperature were determined to solve fire resistance problems.

Application field of research. The obtained dependences of effective thermophysical characteristics can be used in assessing the fire resistance of building structures, as well as in developing fire-resistant solutions for structural elements of buildings.

Keywords: fire resistance; experimental studies; coefficient of thermal conductivity; volumetric heat capacity coefficient; finite element analysis method; parametric optimization.

(The date of submitting: January 5, 2022)

REFERENCES

1. Enaleev R.Sh., Tuchkova O.A., Gasilov V.S., Ananikov S.V. Inzhenernye metody prognozirovaniya ognestoykosti [Engineering methods for predicting fire resistance]. *Bulletin of the technological university*. 2012. Vol. 15, No. 21. Pp. 38–41. (rus)
2. Mkrychev O.V., Sidorov D.S. Sovremennye podkhody k opredeleniyu predela ognestoykosti zdaniy i sooruzheniy [Modern approaches to determining the fire resistance of buildings and structures]. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2011. No. 3-4. Pp. 96–111. (rus)
3. Krutskikh A.V., Brovkin A.V., Sokolov S.A., Cheremnykh S.V. Reshenie zadachi ognestoykosti stroitel'nykh konstruktsiy s primeneniem sredstv avtomatizirovannogo proektirovaniya [Solution of the problem of fire resistance of building structures using computer-aided design tools]. *Proc. IV Intern. scientific and technical conf. «Innovations and modeling in building materials science»*. Tver: Tver state technical university, 2019. Pp. 55–59. (rus)
4. Kudryashov V.A., Batyan 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.
5. Jakovlev A.I. *Raschet ognestoykosti stroitel'nykh konstruktsiy* [Calculation of fire resistance of building structures]. Moscow: Stroiizdat, 1988. 143 p. (rus)
6. Alifanov O.M. *Obratnye zadachi teploobmena* [Inverse problems of heat transfer]. Moscow: Mashinostroenie, 1988. 280 p. (rus)
7. Beck D., Blackwell B., St. Clair C. *Nekorrektnye obratnye zadachi teploprovodnosti*: transl. from English [Ill-posed inverse problems of heat conduction: trans. from English]. Moscow: Mir, 1989. 312 p. (rus)
8. Kozdoba L.A., Krukovskiy P.G. *Metody resheniya obratnykh zadach teploperenosa* [Methods for solving inverse problems of heat transfer]. Kiev: Naukova Dumka, 1982. 358 p. (rus)
9. Batyan S.S., Zhamoydik S.M., Kudryashov V.A., Nguyen T.K. Eksperimental'no-raschetnaya metodika otsenki teplofizicheskikh kharakteristik stroitel'nykh materialov s ispol'zovaniem kamernoy elektropechi dlya resheniya zadach ognestoykosti [Experimental-computing technique of evaluating

thermophysical properties of building materials with a muffle electric furnace for solving fire resistance problems]. *Journal of Civil Protection*, 2020. Vol. 1, No. 4. Pp. 5–19. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-1.5.

10. Batyan S.S. Teplofizicheskie kharakteristiki tsementnykh armirovannykh plit dlya resheniya zadach nestatsionarnogo vysokotemperaturnogo nagreva [Cement boards thermophysical characteristics for solving the tasks to 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.