

Исследование теплотехнических характеристик и эффективности конструктивной огнезащиты на основе цементных плит типа «ПРОЗАСК Файерпанель» при воспроизведении условий высокотемпературного воздействия

Анатолий Никитович Гаращенко¹✉, Сергей Порфирьевич Антонов^{1, 2},
Александр Всеволодович Виноградов³

¹ ООО «ПРОЗАСК», г. Москва, Россия

² Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

³ АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», г. Хотьково, Московская обл., Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. На примере огнезащитных плит «ПРОЗАСК Файерпанель» продемонстрирована целесообразность и вариант проведения комплексных исследований характеристик и эффективности огнезащиты на минеральных вяжущих.

Цели и задачи. Получение результатов экспериментальных исследований теплотехнических характеристик огнезащитных плит на цементном вяжущем и их огнезащитной эффективности на стенде лучистого нагрева при воспроизведении заданных режимов высокотемпературного воздействия, анализ полученных результатов с использованием методики математического моделирования температурных полей в конструкциях с огнезащитой.

Методы. Использовались стандартизованные лабораторные методики для уточнения теплофизических характеристик плит при относительно низких температурах. Оценивалась огнезащитная эффективность плит в ходе дополнительных испытаний образцов на стенде лучистого нагрева. Для теплотехнического анализа и обобщения экспериментальных результатов использовалась надежная и относительно несложная методика и программа расчетов нестационарных температурных полей в конструкциях с огнезащитой. Обобщались результаты стандартизованных испытаний в огневой печи по определению огнезащитной эффективности плит «ПРОЗАСК Файерпанель» и огнестойкости защищаемых ими натурных конструкций.

Результаты. Уточнены значения удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности плит на лабораторных установках при относительно низких температурах. Получены результаты термометрических измерений при испытаниях образцов огнезащиты на стенде лучистого нагрева при воспроизведении стандартного и углеводородного температурных режимов воздействия. Обработка этих результатов с использованием теплотехнических расчетов позволила определить значения коэффициента теплопроводности в рабочем диапазоне температур. Проведена оценка влияния содержащейся в плитах влаги на их огнезащитную эффективность. Сопоставление результатов расчетов и испытаний конструкций в огневых печах продемонстрировало возможность практического использования полученных характеристик плит и методики теплотехнических расчетов для уточнения эффективности и проектирования огнезащиты плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» и оценки огнестойкости защищаемых ими конструкций.

Выводы. Представленные результаты комплексных исследований позволили получить значительный объем важной информации, необходимой для проектирования огнезащиты и обеспечения заданной огнестойкости конструкций, облицованных плитами «ПРОЗАСК Файерпанель». Продемонстрирована роль дополнительных испытаний образцов на стенде лучистого нагрева и эффективности теплотехнических расчетов, как инструмента для оценки параметров огнезащиты и огнестойкости конструкций.

Ключевые слова: огнезащитная эффективность; огнестойкость; лучистый нагрев; теплотехнический расчет; стандартный температурный режим воздействия; углеводородный температурный режим воздействия

Для цитирования: Гаращенко А.Н., Антонов С.П., Виноградов А.В. Исследование теплотехнических характеристик и эффективности конструктивной огнезащиты на основе цементных плит типа «ПРОЗАСК Файерпанель» при воспроизведении условий высокотемпературного воздействия // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 6. С. 13–29. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.13-29.

✉ Гаращенко Анатолий Никитович, e-mail: a.n.gar@mail.ru

Studying the thermal characteristics and effectiveness of structural fire proofing made of PROSASK Firepanel cement boards by means of reproducing the high-temperature effect

Anatoliy N. Garashchenko¹✉, Sergey P. Antonov^{1, 2}, Aleksandr V. Vinogradov³

¹ PROZASK, LLC, Moscow, Russian Federation

² The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

³ Central Research Institute for Special Machinery, JSC, Khotkovo, Moscow Region, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The application of PROZASK fire-retardant panels demonstrates an option for and the expediency of a comprehensive study of fire proofing characteristics.

Goals and objectives. The mission of this research project is to (1) obtain the results of experimental studies of fireproofing panels, containing the cement binder, (2) determine their fire proofing efficiency, using the radiant heating test bench that reproduces pre-set modes of high-temperature exposure, and (2) analyze the testing results using the method of mathematical modelling of temperature fields inside fireproof structures.

Methods. Standardized laboratory techniques were used to clarify the thermal-physical characteristics of boards at relatively low temperatures. Their fire proofing efficiency was evaluated in the course of additional testing of specimens using the radiant heating test bench. A reliable and relatively uncomplicated method and programme for calculating unsteady temperature fields in fireproof structures were used to conduct the thermal analysis and generalization of experimental results. The authors summarized the results of standardized tests, conducted in a fire furnace, to determine the flame-retardant efficiency of PROZASK Firepanel boards and the fire-resistance of the full-size structures they protect.

Results. Values of specific heat capacity and the thermal conductivity coefficient of boards, tested using laboratory benches at relatively low temperatures, were verified. The results of thermocouple measurements, taken during the testing of specimens with the help of the radiant heating bench in standard and hydrocarbon temperature modes, were obtained. The processing of these results, using thermal engineering analysis, allowed determining the values of the thermal conductivity coefficient in the range of operating temperatures. The influence of moisture, contained in the boards, on their fire protection efficiency was evaluated. Comparison between the results of calculations and tests, conducted in the fire furnaces, showed the practical usability of the obtained characteristics of boards and the thermo-engineering analysis used to (1) clarify the fire-proofing efficiency and the design developed using PROZASK Firepanels and (2) evaluate the fire-resistance of the constructions they protect.

Conclusions. The presented integrated studies generated a considerable amount of important information, required to prognosticate the fire proofing properties and the fire-resistance of constructions that contain PROZASK Firepanels. The role of additional testing of specimens using a radiant heating test bench and the effectiveness of thermal-engineering calculations as a tool for assessing the parameters of fire proofing and the fire resistance of structures are demonstrated.

Keywords: flame-retardant efficiency; fire resistance; radiant heating; thermal engineering analysis; standard temperature mode of exposure; hydrocarbon temperature mode of exposure

For citation: Garashchenko A.N., Antonov S.P., Vinogradov A.V. Studying the thermal characteristics and effectiveness of structural fire proofing made of PROSASK Firepanel cement boards by means of reproducing the high-temperature effect. *Pozharovzryvbezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(6):13-29. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.13-29 (rus).

✉ Anatoliy Nikitovich Garashchenko, e-mail: a.n.gar@mail.ru

Введение

Обеспечение высоких пределов огнестойкости, задаваемых для наиболее ответственных строительных конструкций, возможно при использовании конструктивной огнезащиты на основе плит, матов или огнезащитных штукатурок (напыляемых материалов) значительной толщины. К их числу относятся огнезащитные плиты и штукатурки, изготавливаемые на основе минеральных вяжущих (цемент, гипс, силикат кальция и др.) и различных наполнителей (например, вермикулит). Информа-

ция по исследованиям, проектированию и отработке такой огнезащиты содержится в многочисленных отечественных [1–12] и зарубежных [13–25] публикациях.

Исследования эффективности, оценка и обоснование требуемых толщин применяемых материалов должны проводиться с учетом особенностей исполнения огнезащиты и предполагают решение целого комплекса задач, включающих определение основных характеристик материалов, проектные расчеты, подтверждение работоспособности путем стандартизированных огневых экспериментов. Для

проектирования требуется информация по испытаниям типовых несущих конструкций с огнезащитой в огневых печах при эксплуатационных статических нагрузках. Они предусмотрены нормативными документами, и их проведение является завершающим и наиболее затратным этапом обеспечения огнезащиты и огнестойкости конструкций. Известно, что возможности огневых экспериментов ограничены размерами типовых конструкций и рядом других обстоятельств, что требует уделять все большее внимание теплотехническим расчетным методам, обеспечивающим качественный анализ и обобщения результатов испытаний, а также определение проектных толщин огнезащиты.

Целесообразность и эффективность использования теплотехнических расчетов по надежным методикам для анализа и обобщения результатов огневых экспериментов продемонстрирована в [11, 12] на примере конструкций из чугуна и железобетона. Для расчетов необходимы теплофизические характеристики (ТФХ) применяемых огнезащитных материалов. Имеются публикации, в которых рассматриваются методики и результаты определения ТФХ с использованием, в большинстве случаев, лабораторного оборудования для исследований при «комнатных» температурах.

В отдельных случаях для оценки эффективности и определения значений ТФХ при высоких температурах проводились дополнительные испытания при воспроизведении условий высокотемпературного воздействия на образцы [10, 18, 20, 26, 27]. В целом можно констатировать, что информация по ТФХ у большинства производителей огнезащитных материалов ограничена результатами, полученными при «комнатных» температурах, и возможность практического использования таких данных не всегда обоснована, в особенности для материалов, претерпевающих сложные превращения при высокотемпературном нагреве. К их числу относятся плиты и штукатурки на основе минеральных вяжущих (цемент, гипс, бетон).

Известно, что номенклатура огнезащитных плит на таких вяжущих по сравнению со штукатурками на отечественном рынке относительно невелика. Их ограниченная номенклатура связана с достаточно сложной технологией и дорогостоящим оборудованием для их изготовления. Все они широко используются в качестве огнезащиты различных конструкций и коммуникаций, причем как непосредственно, так и в виде облицовок в комбинации, например, с волокнистыми материалами. Исследованиям, проектированию и особенностям применения такой востребованной конструктивной огнезащиты необходимо уделять должное внимание.

Важность конструктивной огнезащиты плитами подтверждается использованием на практике отраслевого нормативного документа — стандарта СТО АРСС 11251254.001-018-03, подготовленного Ассоциацией развития стального строительства (АРСС) [28]. Он содержит статическую и теплотехническую части в методике оценки огнестойкости конструкций из стали и предназначен для применения при проектировании огнезащиты из плит (облицовок). Следует также отметить, что, по нашему мнению, недостатком стандарта АРСС 11251254.001-018-03, а также ряда публикаций [3, 4], подготовленных на его основе, является то, что в них предполагается использование хоть и приемлемой, но устаревшей методики теплотехнических расчетов для определения проектных толщин огнезащиты. В [3, 4, 28] приводятся данные по рекомендуемым проектным толщинам огнезащиты, но не приводятся данные о теплофизических характеристиках материалов, необходимых для проведения расчетов как по имеющимся, так и по вновь создаваемым (более совершенным) методикам.

Анализ зарубежного опыта свидетельствует, что расчеты проектных толщин огнезащитных плит, предусматривающие составление таблиц и построение номограмм, регламентируются нормативными документами, в частности европейским стандартом EN 13381-4:2013¹. Применяемый подход предусматривает обработку результатов измерений температуры в ходе огневых испытаний значительного количества стальных конструкций, защищенных плитами, в ходе серии из десятка испытаний при, как правило, стандартном режиме воздействия. При их обработке определяются и впоследствии используются при определении толщин огнезащиты, так называемые, эффективные (или модифицированные) коэффициенты теплопроводности и удельной теплоемкости.

Используется одномерная математическая модель, с помощью которой устанавливаются зависимости между минимальной толщиной огнезащиты, теплофизическими характеристиками материалов, температурой стали, а также приведенной толщиной металла и промежутком времени, в течение которого сохраняется огнестойкость конструкций. Показательно, что при таком подходе, предусмотренном в EN 13381-4:2013, получается своеобразный характер изменения от температуры эффективного коэффициента теплопроводности и эффективной удельной теплоемкости. Здесь эти важнейшие параметры принимаются в качестве параметров согласования

¹ EN 13381-4:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 4: Applied passive protection to steel members. European Committee For Standardization. Management Centre: Brussels. 2013 CEN. 83 p.

«эксперимент–расчет». При этом указанный стандарт распространяется на все виды конструктивной (пассивной) огнезащиты (в том числе из влагосодержащих материалов, при нагреве которых происходит целый комплекс сложных процессов). Подход, регламентируемый упомянутым европейский стандартом, имеет, безусловно, право на жизнь, однако целесообразность его адаптации к нашим реалиям дискуссионна. Это обусловлено значительными затратами на подготовку и проведение большой серии огневых испытаний, а также необходимостью адаптации у нас предусмотренного стандартом программного обеспечения для обработки их результатов и проведения расчетов толщин огнезащиты.

Нами предлагается проводить теплотехнические расчеты по относительно несложным отечественными методикам и программным комплексам, и это позволяет, как показано, например, в [11, 12], существенно повысить качество анализа и обобщения результатов дорогостоящих огневых испытаний. Отмеченные выше обстоятельства свидетельствуют об актуальности проведения комплексных исследований эффективности и характеристик конкретных материалов конструктивной огнезащиты с использованием хорошо зарекомендовавших себя доступных методов экспериментальных исследований теплотехнических характеристик огнезащиты, с уточнением ее ТФХ, а также использованием доступных и надежных методов теплотехнических расчетов.

Практика исследований показала, что решению задачи по выбору и обеспечению рациональной огнезащиты, прогнозированию заданной огнестойкости конструкций способствуют организация и проведение серии дополнительных испытаний образцов огнезащиты относительно небольших размеров на лабораторно-стендовом оборудовании. Это в данной статье демонстрируется на примере варианта конструктивной огнезащиты, применение которого представляется перспективным.

Материалы и методы

Одним из таких вариантов огнезащиты являются плиты на цементном вяжущем «ПРОЗАСК Файерпанель», которые в настоящее время успешно используются и по которым проводились и продолжают проводиться исследования различных свойств с подтверждением их работоспособности и эффективности в ходе огневых экспериментов. Они изготавливаются на основе портландцемента с легким наполнителем.

Разработаны схемы крепления плит на типовые конструкции из стали и железобетона. Для оценки (подтверждения) работоспособности и эффективности конструктивной огнезащиты такими плитами,

а также огнестойкости защищаемых ими конструкций проводились многочисленные огневые испытания конструкций колонн, балок, перекрытий и стеновых панелей под нагрузкой. Они проводились со штатными элементами крепления плит, работоспособность которых также подтверждалась при таких испытаниях. Можно отметить, что удачная конструкция элементов крепления позволяет уменьшить (за счет эффекта демпфирования) нагрузки на плиты при деформациях нагруженных конструкций и тем самым способствует обеспечению их заданной огнестойкости.

Естественно, основное внимание должно уделяться оценке огнезащитной эффективности плит и оценкам фактической огнестойкости защищаемых ими конструкций. Кроме того, важное значение имеет исследование всего комплекса характеристик, необходимых для обоснованного выбора и использования наиболее приемлемого варианта и толщин огнезащиты.

Именно такой комплексный подход применяется для плит «ПРОЗАСК Файерпанель». Он предусматривает определение теплофизических характеристик при относительно низких температурах по стандартизованным лабораторным методикам, а также показателей эксплуатационной стойкости при климатических воздействиях. Наряду с этим, а также в дополнение к огневым экспериментам на натурных образцах конструкций с огнезащитой, проведены испытания образцов плит относительно небольших размеров при воспроизведении реальных условий высокотемпературного воздействия. Они являются источником дополнительной информации по теплотехнической эффективности плит, а обработка полученных данных позволяет уточнить их ТФХ в рабочем диапазоне температур, что не обеспечивается доступными стандартизованными лабораторными методиками.

Анализ публикаций по методам и результатам испытаний образцов на лабораторно-стендовом оборудовании при воспроизведении условий огневого воздействия, проведенный в [26], показал, что наиболее приемлемым для исследований теплотехнических характеристик различных средств огнезащиты является использование стенда лучистого нагрева с источником нагрева в виде пакета мощных галогенных ламп накаливания. В указанной статье, а также в [27] представлена информация о данном стенде и описана методика проведения испытаний, а также результаты, полученные для образцов конструктивной огнезащиты на основе рулонного базальтосилового материала. При этом результаты исследований, представленные в [26, 27], продемонстрировали возможность исследований огнезащитной эффективности подобных материалов, при воспроизведении

как стандартного, так и углеводородного режимов пожара.

Было показано [26, 27], что проведение и обработка результатов термодинамических измерений при испытаниях позволила оценить значения его высокотемпературных ТФХ, необходимых для проведения теплотехнических расчетов, и, в частности, наиболее важного показателя — эффективного коэффициента теплопроводности. Продемонстрированы [27] возможности таких расчетов для анализа конструктивной огнезащиты на основе рулонного базальтосилового материала. Экспериментальные исследования включали определение ТФХ данного материала стандартизованными лабораторными методами при относительно низких температурах, а также оценку его эффективности и теплотехнических свойств на стенде лучистого нагрева с дальнейшим уточнением ТФХ, но уже в рабочем диапазоне температур. Подобные исследования, включающие лабораторно-стендовые испытания и теплотехнические расчеты, были проведены и для варианта конструктивной огнезащиты плитами «ПРОЗАСК Файерпанель».

Объектом испытаний на стенде лучистого нагрева являлись образцы, состоящие из 1, 2 и 3 слоев таких плит толщиной 12,5 мм каждого слоя. Плиты ориентировались лицевой поверхностью в сторону нагрева. Выбран размер образцов 300×200 мм, что существенно меньше, чем зона нагрева пакетом ламп. Защищаемым элементом являлась пластина из стали толщиной 3 мм такого же размера. Огнезащитные плиты скрепляются со стальной пластиной, а также между собой (для двух- и трехслойных образцов) с помощью саморезов.

Теплотехнические характеристики и огнезащитная эффективность оценивались по результатам измерения температур, что обеспечивалось установкой хромель-копелевых или хромель-алюмелевых термопар на нагреваемой поверхности образцов огнезащиты в центральной их части, между слоями плит, а также на границе стальная подложка — огнезащита и стальная подложка — теплоизоляция (по две термопары в каждой из указанных зон). Образец вместе с термопарами размещался в проеме плоской вертикальной панели из плиты толщиной 60 мм, обладающей высокой термостойкостью и относительно низкой теплопроводностью, что минимизирует теплопередачу по периметру образца. Предусмотрена теплоизоляция на его необогреваемой стороне базальтосиловым матом толщиной 30 мм. Воспроизведение требуемого температурного режима нагрева (по аналогии с [26, 27]) производилось за счет изменения мощности нагревателя. Обеспечивалось соответствующее

изменение температуры нагреваемой поверхности образцов на уровне температуры газовой среды при стандартном или углеводородном режимах пожара.

Ранее полученные результаты исследований образцов конструктивной огнезащиты на основе рулонного базальтосилового материала, представленные в [26, 27], продемонстрировали, что на характер изменения температуры в образцах влияет влага, содержащаяся в относительно тонких слоях клеевого состава, используемого для скрепления слоев огнезащиты между собой и защищаемым элементом. С учетом этого явления, характерного для всех влагосодержащих материалов, методика испытаний плит «ПРОЗАСК Файерпанель» была дополнена проведением повторных испытаний, проводимых после охлаждения стенда без демонтажа образца (т.е. проводились испытания того же образца после удаления из него влаги в ходе предыдущего эксперимента). Предполагалось, что сопоставление температурных кривых при этих двух испытаниях может дать информацию о том, каково влияние физически и химически связанной воды, находящейся в плите, на ее теплотехнические характеристики.

Результаты исследований и их обсуждение

Проведена серия из трех испытаний образцов, состоящих из одного, двух и трех слоев плит «ПРОЗАСК Файерпанель» при воспроизведении высокотемпературного воздействия по стандартному температурному режиму, а также серия из трех испытаний при воспроизведении углеводородного температурного режима. Их продолжительность задавалась с учетом режима воздействия и количества плит в образце.

Результаты испытаний представлены в табл. 1 и на рис. 1–3. На графиках имеются показания всех термопар, установленных как на поверхности образцов (для регулирования режима нагрева), так и термопар, установленных в самих образцах. В каждом эксперименте после окончания интенсивного воздействия запись продолжалась, и регистрировалось перераспределение температуры по толщине образца при его охлаждении. Фиксация показаний термопар производилась с помощью компьютера, вид экрана которого в ходе одного из испытаний показан на рис. 1.

Анализ результатов измерений температуры показал следующее. Вид кривых на рис. 2 характерен для прогрева влагосодержащих материалов и обусловлен комплексом сложных процессов теплопереноса в процессе нагрева цемента, входящего в состав исследуемых плит. Они включают испарение влаги, дегидратацию компонентов, диффузию образовавшегося пара, его конденсацию в «холодной» зоне, последующее кипение вторич-

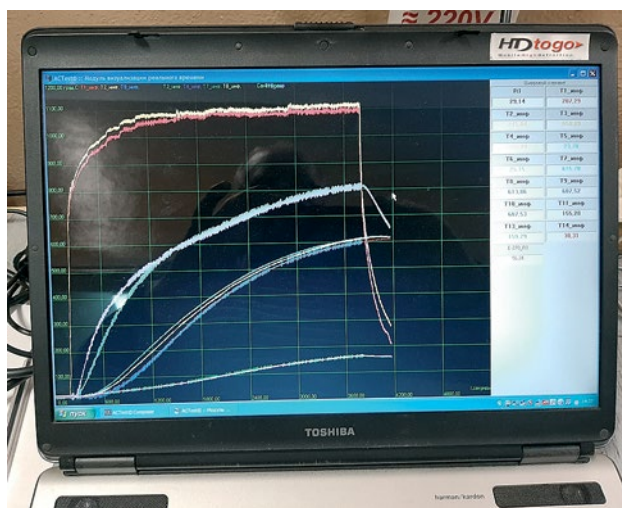


Рис. 1. Экран компьютера с графиками для текущего контроля за динамикой изменения температуры образца в ходе одного из экспериментов

Fig. 1. Current monitoring of the dynamics of the sample temperature change during one of the experiments

ной влаги и диффузию пара [26, 29, 30]. При этом фиксируется так называемая «полка» или «плато», что показали также полученные ранее результаты

испытаний конструкций с рассматриваемым вариантом огнезащиты в огневых печах.

Для оценки влияния влаги на теплотехнические характеристики исследуемых плит проведено три повторных испытания образцов, состоящих из двух и трех слоев плит (см. табл. 1), после охлаждения стенда без демонтажа этих образцов (т.е. после удаления из них влаги). На рис. 3 представлены результаты термодатных измерений в ходе повторного испытания образцов из двух и трех слоев плит при воздействии на них по стандартному температурному режиму. Представлены кривые, полученные в результате осреднения показаний термопар, установленных в каждой зоне образцов, в том числе показаний четырех термопар по обеим сторонам стальной пластины.

Можно отметить, что были обеспечены практически одинаковые условия воздействия и это облегчает проведение объективного анализа влияния влаги на прогрев огнезащиты из плит «ПРОЗАСК Файерпанель». Такое влияние удобно рассматривать, сравнивая осредненные показания термопар в ходе основного и повторного испытания (рис. 3). Сопоставление кривых показало, что после удале-

Таблица 1. Информация об испытаниях образцов плит «ПРОЗАСК Файерпанель» на стенде лучистого нагрева

Table 1. Information about the tests of PROSASK Firepanel board specimens at the radiant heating bench

Режим воздействия Exposure mode	Количество плит в образце Number of plates in a specimen	Время интенсивного воздействия, мин Time of intensive exposure, min	Максимальная температура пластины в конце воздействия, °C Maximum plate temperature at the end of exposure, °C	Время прогрева пластины до 500 °C, мин Plate warming time (up to 500 °C), min		Температурные кривые Temperature curves
				Эксперимент Experiment	Расчет Analysis	
Стандартный Standard	1	41	582	29,2	29,4	Рис. 2, а Fig. 2, a
	2	65	510	63,1	61,5	Рис. 2, b Fig. 2, b
		66,2*	490*	67,4	—	Рис. 3, а Fig. 3, a
	3	90	455	> 90	> 90	Рис. 2, c Fig. 2, c
		90*	432*	> 90*	—	Рис. 3, b Fig. 3, b
Углеводородный Hydrocarbon	1	43,9	774	16,4	15,5	Рис. 2, d Fig. 2, d
	2	44	538	39,3	39,6	Рис. 2, e Fig. 2, e
		60*	602*	39,6	—	Рис. 4 Fig. 4
	3	40	223	>> 40	>> 40	Рис. 2, f Fig. 2, f

* Повторное испытание после охлаждения стенда с образцом.

* Repeated testing after the specimen is cooled down.

ния влаги из образца, естественно, отсутствует полка (плато) на уровне 100 °С. При этом в случае длительного воздействия температура стальной пластины остается на том же уровне, что и при

основных испытаниях, т.е. огнезащитные свойства образцов сохраняются.

Кроме прочего, результаты измерений демонстрируют, на сколько повышается температура

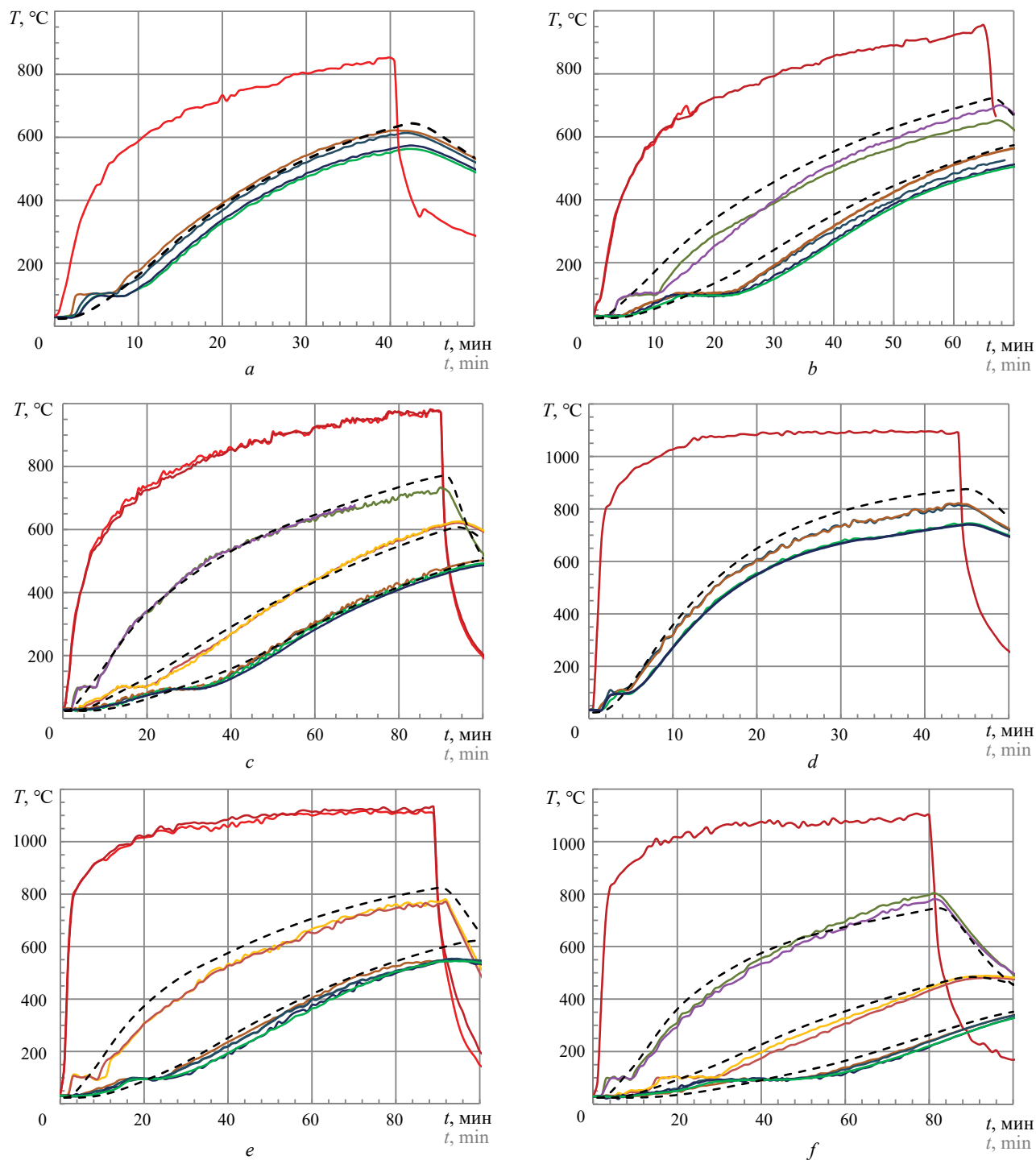


Рис. 2. Изменение со временем температуры на нагреваемой поверхности огнезащиты, состоящей из одного (a, d), двух (b, e) и трех (c, f) слоев плит (—, —), на границе между стальной пластиной и огнезащитой (—, —), пластиной и теплоизоляцией (—, —), а также между первым и вторым (—, —), вторым и третьим (—, —) слоями плит при воздействии по стандартному (a, b, c) и углеводородному (d, e, f) температурному режиму; - - - - - расчет

Fig. 2. Temperature changes on the heated surface of the fire proofing that has one (a, d), two (b, e) and three (c, f) layers of plates (—, —), at the interface between the steel plate and the fire proofing (—, —), the plate and the thermal insulation (—, —), as well as between the first and second (—, —), second and third layers of plates (—, —) exposed to standard (a, b, c) and hydrocarbon (g, d, e) temperature modes; - - - - - analysis

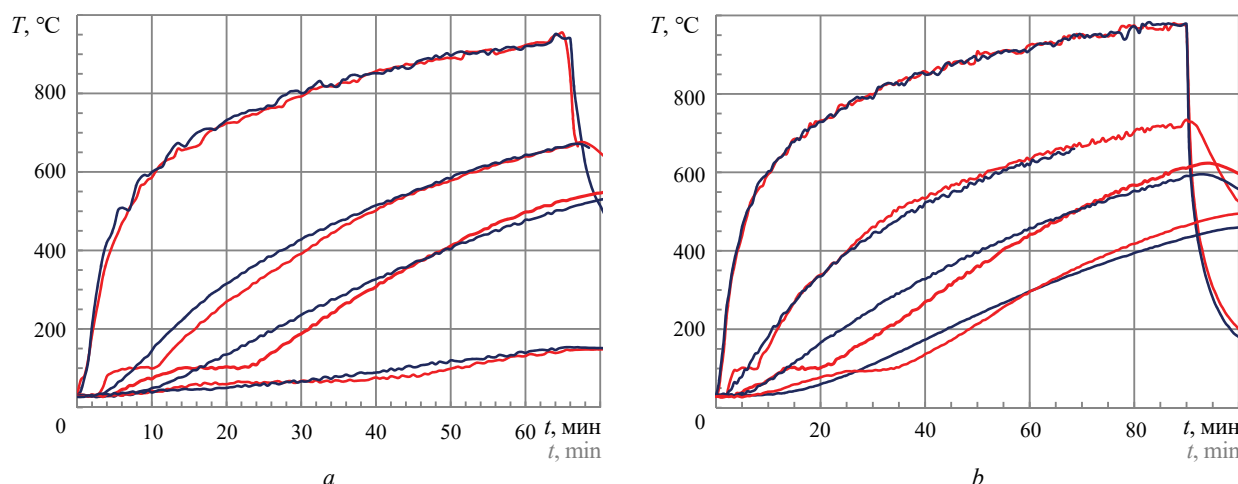


Рис. 3. Сопоставление осредненных результатов термопарных измерений в ходе испытаний образцов, состоящих из двух (а) и трех (б) плит при воздействии по стандартному режиму (—) (см. рис. 2, б, с), а также в ходе повторных испытаний этих же образцов после охлаждения (—)

Fig. 3. Comparison between the averaged results of thermocouple measurements during the testing of specimens consisting of two (a) and three (b) plates in the standard mode (—) (see Fig. 2, b, c), as well as during repeated tests after cooling (—)

защищаемой конструкции (стальной пластины) после окончания теплового воздействия. В максимальной степени это характерно для образцов большей толщины (см. рис. 2, с, f) ввиду большего количества тепла, аккумулированного им при нагреве. Это подтверждает необходимость оценки не только огнестойкости конструкций, но и влияния такого перераспределения тепла на огнесохранность конструкций.

Визуальный осмотр образцов после испытаний показал, что их целостность после первоначального воздействия сохраняется. Наблюдается только появление небольшой сетки трещин на поверхности. В ходе повторного эксперимента наружный слой образцов растрескался и частично разрушился, что показано на рис. 4.

На рис. 5 по аналогии с вариантом воздействия по стандартному режиму показано сопоставление осредненных результатов термопарных измерений,



Рис. 4. Внешний вид образца после повторного испытания

Fig. 4. The appearance of the specimen after repeated testing

полученных для образца, состоящего из двух слоев плит при воздействии по углеводородному режиму. Время повторного (после удаления влаги) испытания было больше, чем основного (44 мин), и составило 60 мин.

Вид кривых, как и на рис. 3, соответствующим образом изменился, однако уровень нагрева стальной пластины при наличии и отсутствии влаги в образце после длительного воздействия (не менее 44 мин) почти не изменился. И в данном случае огнезащитные свойства образца практически не изменились, даже несмотря на появление трещин в поверхностном слое плит.

Следует отметить, что удалось получить результаты при углеводородном, т.е. наиболее жестком режиме воздействия. Их, как и результаты, полученные при стандартном режиме, можно использовать при анализе теплотехнических характеристик и огнезащитной эффективности плит «ПРОЗАСК Файерпанель». В частности, представленные температурные кривые могут использоваться для уточнения ТФХ плит в широком температурном диапазоне, а также для уточнения методики теплотехнических расчетов для данного варианта огнезащиты. Кроме важных экспериментальных результатов, полученных на стенде, в данной статье представлен вариант обработки результатов испытаний образцов с оценкой ТФХ плит в рабочем диапазоне температур.

Важной частью комплексных исследований являлся теплотехнический анализ, который проводился по аналогии с обработкой результатов испытаний образцов базальтосоволокнистого материала на стенде лучистого нагрева [27]. Ранее подобным образом проводилась обработка результатов огневых экспериментов образцов натуральных строитель-

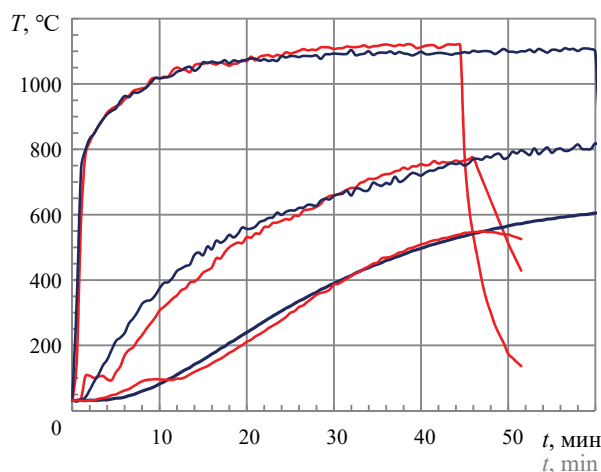


Рис. 5. Сопоставление осредненных результатов термодинамических измерений в ходе испытаний образцов, состоящих из двух плит при воздействии по углеводородному режиму (—) (см. рис. 2, е), а также в ходе повторного испытания этого же образца после охлаждения (—)

Fig. 5. Comparison between the averaged results of thermocouple measurements made during the testing of specimens consisting of two plates in the hydrocarbon mode (—) (see Fig. 2, e), as well as during the repeated testing of the same specimen after cooling (—)

ных конструкций: чугунных тубингов обделки тоннелей метрополитена [11] и железобетонных несущих конструкций [12]. В ходе анализа применялась надежная и относительно несложная методика и компьютерная программа теплотехнических расчетов нестационарного процесса теплопередачи в многослойной конструкции «Огнезащита. Версия ВУ.2». Описание используемой математической модели и программы представлено в [11, 29]. Используемая программа разработана в результате численного решения системы уравнений, включающих элементарное (без усложнений) уравнение теплопроводности с соответствующими граничными условиями, для описания высокотемпературного воздействия на огнезащиту. Подобными программами пользуются большинство исследователей в нашей стране и за рубежом (см. [9–12, 19, 25], EN 13381-4:2013 и др.).

Проведенные нами экспериментальные исследования включали уточнение ТФХ плит. Первым шагом являлось определение коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости при относительно низких температурах стандартизованными лабораторными методами. Были предусмотрены также повторные испытания образцов после удаления из них влаги. Уточнена исходная плотность исследуемых плит, она составила 1124 кг/м³.

Коэффициент теплопроводности определялся при температурах порядка 25 °С на приборе ИТП-МГ4, используемом для испытаний строительных материалов, на образцах размером 100×100 мм при стационарном тепловом режиме (ГОСТ 7076–99). На первом образце получено зна-

чение 0,287 Вт/(м·К), на втором — 0,269 Вт/(м·К) (осредненное значение — 0,278 Вт/(м·К)). Для учета влияния влаги, содержащейся в плитах, определены значения коэффициента теплопроводности, полученные на этих же образцах после их сушки. После нагрева первого образца в муфельной печи со скоростью 25 °С/мин до температуры 500 °С и выдержки в течение 10 мин получено приблизительно 25-процентное уменьшение коэффициента теплопроводности (0,215 Вт/(м·К)). Потеря массы образца составила 8%. После выдержки второго образца в муфельной печи при температуре 80 °С в течение 30 мин отмечено снижение коэффициента теплопроводности до 0,257 Вт/(м·К).

Проведено также определение удельной теплоемкости на приборе ИТ-Ср-400 по ГОСТ 23630.1–79 в диапазоне температур от 25 до 300 °С (сравнительный метод динамического калориметра). Использовались образцы диаметром 15 мм и высотой 10 мм. Получена зависимость удельной теплоемкости от температуры, представленная в табл. 1. Обращает на себя внимание значительно больший уровень удельной теплоемкости при температурах выше 100 °С, что характерно для влагосодержащих материалов (см., например, EN 13381-4:2013, [19, 24, 25, 31]). В этой же таблице представлена зави-

Таблица 2. Результаты определения удельной теплоемкости плит на приборе ИТ-Ср-400

Table 2. Specific heat capacity identified using IT-Sr-400

Температура, °С Temperature, °C	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) Specific heat capacity, J/(kg·K)		
	Исходный материал Source material	Нагрев и выдержка 30 мин в муфельной печи при 300 °С Heating and curing in a muffle furnace at 300 °C for 30 min	Выдержка в течение суток при комнатной температуре One-day exposure at room temperature
25	818	656	732
50	853	626	760
75	978	674	893
100	1103	1024	1068
125	1720	1162	1452
150	2485	1250	1485
175	2253	1259	1430
200	1982	1218	1219
225	1752	970	1224
250	1535	1041	1270
275	1354	1246	1306
300	1216	1268	1164

симость, полученная после нагрева и выдержки этого же образца в муфельной печи при температуре 300 °С. После удаления указанным способом влаги из образца зафиксирован значительно меньший уровень удельной теплоемкости при температурах выше 100 °С. Представлена также зависимость после последующей выдержки этого образца в течение суток при «комнатной» температуре. Можно предположить, что за это время произошло некоторое увеличение влажности, что отразилось в виде незначительного роста уровня рассматриваемого показателя.

Для проведения последующего теплотехнического анализа принята зависимость удельной теплоемкости от температуры для исходного материала в диапазоне температур от 25 до 300 °С (см. табл. 2) и значение коэффициента теплопроводности при 25 °С, равное 0,278 Вт/(м·К).

Наличие экспериментальной информации, представленной на рис. 2, позволяет уточнить значения эффективных ТФХ плит «ПРОЗАСК Файерпанель» во всем рабочем диапазоне температур, решая некое подобие обратной задачи теплопроводности. При этом по аналогии с [27] использовалась упомянутая ранее методика и компьютерная программа «Огнезащита. Версия ВУ.2» [11, 29], предназначенная для расчетов температурных полей в многослойной пластине. Проводимые ранее параметрические исследования с использованием этой программы показали, что значительно меньшее влияние на прогрев конструкций оказывает удельная теплоемкость материала, чем коэффициент теплопроводности. Аналогичная информация содержится, например, в [24, 25]. Это также принималось во внимание в [27], где решалась подобная обратная задача теплопроводности, но только по оценке коэффициента теплопроводности материала при высоких температурах, а величина удельной теплоемкости задавалась постоянной.

Для исследуемых плит использовались результаты определения этого параметра на приборе в диапазоне температур от 20 до 300 °С (см. табл. 1), а при более высоких температурах принималось его значение, как при температуре 300 °С (1216 Дж/(кг·К)). Для уточнения значений эффективного коэффициента теплопроводности принималось его линейное изменение от значения 0,278 Вт/(м·К), определенного на приборе при 25 °С, до его искомого значения при условной температуре 1200 °С. Оно находится в ходе решения обратной задачи методом перебора при варьировании значений искомого параметра при этой температуре.

В ходе решения такой обратной задачи как и в [27] использовалось граничное условие 1-го рода, и в этом качестве брали временные зависимости

температуры на нагреваемой поверхности образцов, зафиксированные в ходе испытаний на стенде лучистого нагрева (красные кривые на рис. 2). Далее проводились расчеты с использованием полученных таким образом ТФХ плит. В результате серии расчетов установлено, что удовлетворительное соответствие «расчет–эксперимент» достигается при значении искомого коэффициента эффективной теплопроводности при температуре 1200 °С, равном 0,31 Вт/(м·К). Зависимость для его определения во всем диапазоне температур имеет вид: $\lambda_{\text{эф}} = 0,278 + 0,0000267 \cdot (T - 25)$, где T — температура, °С.

Степень соответствия «расчет–эксперимент» при указанных выше значениях ТФХ демонстрируется в табл. 1 и на рис. 2, где, наряду с экспериментальными, нанесены расчетные зависимости (пунктирные кривые), демонстрирующие изменение от времени температуры стальной пластины и температуры на границах между слоями плит. Следует отметить их хорошее соответствие, практически для всех экспериментов, несмотря на существенные отличия по толщинам огнезащиты, а также по режимам высокотемпературного воздействия на нее в ходе испытаний.

Таким образом, данный случай явно отличается от ситуации исследований базальтоволоконного материала в [26, 27]. Там «потребовалось» значительное увеличение коэффициента теплопроводности при температуре 1200 °С по сравнению с его величиной при относительно низких температурах. Но это было связано с тем, что при высоких температурах для высокопористых материалов возрастает роль лучистой составляющей эффективного коэффициента теплопроводности, но, главное, происходит «деградация» базальтоволоконного материала (оплавление волокон, появление пустот и пр.). Это не характерно для исследуемых плит, которые имеют относительно низкую пористость и сохраняют целостность при нагреве.

Как и ожидалось, наибольшее отличие между расчетными и экспериментальными кривыми отмечается в начальный период нагрева, когда в наибольшей степени сказывается влияние влаги на прогрев образцов (см. рис. 3, 5), поскольку применяемая достаточно простая расчетная методика не учитывает всю совокупность происходящих при нагреве материала сложных процессов. Но это не столь важно для практики, поскольку основной задачей было получение соответствия при относительно продолжительном воздействии, т.е. тогда, когда влияние таких процессов нивелируется. В некоторых случаях расчетные значения температуры превышают экспериментальные и дают «оценку

сверху», что вполне допустимо при проектировании огнезащиты.

Для подтверждения правомерности использования в подобных случаях граничного условия 1-го рода была проведена дополнительная серия расчетов. Задавалось изменение температуры газовой среды по стандартному и углеводородному режимам и задавались общепринятые параметры теплообмена ее с огнезащитой (условие 3-го рода с учетом лучистой и конвективной составляющей). Для образцов фиксированной толщины были получены кривые изменения температуры, в том числе для поверхности огнезащиты и для стальной пластины. Можно отметить, что расчетные кривые для поверхности незначительно отличались от задаваемых и фиксируемых при испытаниях образцов. Далее проводились расчеты при использовании граничного условия 1-го рода, в качестве которого использовались именно эти расчетные зависимости для температуры поверхности. Сравнивались температуры стальной пластины, рассчитанные для этих двух вариантов граничных условий. Получено их близкое соответствие (отличие менее 1%), что подтверждает правомерность используемого подхода.

Следует отметить, что подобным образом удается определять более реальные значения и характер изменения от температуры ТФХ конструктивной огнезащиты, чем при определении таких «эффективных» характеристик, например, в соответствии с EN 13381-4:2013. Они являются параметрами согласования «расчет–эксперимент», и на «своеобразный» характер их изменения влияют многочисленные факторы, на имеющие отношения к ТФХ материалов. В их числе: наличие полостей под огнезащитой в виде короба для конструкций из двутавров, швеллеров и т.д. и особенности теплопередачи в них, влияние влаги, содержащейся в плитах, возможность растрескивания, разрушения и уменьшения толщины огнезащиты и пр.

Вышеизложенное свидетельствует, что полученные предложенным нами способом значения ТФХ вполне допустимо использовать при проведении теплотехнических расчетов конструкций с огнезащитой из плит «ПРОЗАСК Файерпанель». Причем имеется возможность последующего уточнения этих характеристик в ходе подобных исследований. Возможна также обработка представленных результатов измерений другими исследователями и другим способом. В любом случае испытания на стенде лучистого нагрева являются важным дополнением к огневым экспериментам и способствуют проведению более качественного анализа и обобщения их результатов.

Следует упомянуть также о проведении целого ряда других испытаний плит «ПРОЗАСК Файер-

панель» в специализированных лабораториях. В их числе климатические исследования в МГСУ и испытания на морозостойкость в испытательном центре ВНИИЖЕЛЕЗОБЕТОН. Кроме того, в профильной лаборатории Российского университета транспорта (МИИТ) определялись физико-механические свойства и, в частности, прочность на изгиб. На их основе выдано заключение о достаточной прочности и возможности использования плит в железнодорожных тоннелях и тоннелях метрополитена в жестких условиях аэродинамических воздействий от проходящих в них поездов. Высокую деформационную стойкость рассматриваемых плит (способность к изгибу) следует отметить особо. Именно недостаточный уровень этого показателя может приводить к нарушению целостности (разрушению) огнезащитных плит (облицовок) при огневом воздействии и деформации защищаемых конструкций при действии на них эксплуатационных нагрузок. Поэтому испытания в огневых печах при таких нагрузках обязательны не только для оценки огнестойкости самих конструкций, но и для подтверждения эффективности использования конкретных огнезащитных плит.

Такие испытания конструкций с огнезащитой плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» проводятся в должном объеме. В статье рассмотрены некоторые из огневых экспериментов, а также результаты теплотехнического анализа их результатов с проведением расчетов и использованием указанных выше значений ТФХ плит.

Прежде всего можно отметить, что была проведена серия из трех испытаний на огнестойкость в ИЦ ФГБУ ВНИИПО МЧС РФ образцов колонн из двутавра № 40Ш1 (СТО АСЧМ 20-93) с огнезащитой плитами при воздействии постоянной статической нагрузки 195,22 кН (19,9 тс). Приведенная толщина металла (отношение площади поперечного сечения профиля к обогреваемому периметру) составляла 5,93 мм. Монтаж плит проводился на каркас из оцинкованного профиля с дополнительными металлическими уголками при помощи самонарезающих винтов DIN № 7982 48×25 мм.

Два эксперимента проведены с огнезащитой из трех слоев плит толщиной $3 \times 12,5 = 37,5$ мм. В первом случае при воспроизведении стандартного режима огневого воздействия на момент окончания испытаний (185 мин) вертикальная деформация образца не превысила 12,1 мм при ее предельно допустимом уровне в 27 мм. Средняя температура по термопарам, установленным на поверхности стальных колонн, составляла 675 и 659 °С. Предел огнестойкости по потере несущей способности конструкции составил не менее 185 мин (соответствует классу R180).

Во втором эксперименте в условиях углеводородного режима на момент окончания испытаний (153 мин) вертикальная деформация образцов не превысила 12 мм, а их температура составляла 646 и 630 °С. Предел огнестойкости по потери несущей способности конструкции составил не менее 153 мин (соответствует классу R150). В этих двух случаях зафиксировано образование и раскрытие трещин на наружном и среднем слоях плит с частичным отслоением наружного слоя.

Третий эксперимент проведен с однослойной огнезащитой толщиной 12,5 мм при стандартном режиме. Предел огнестойкости первого образца был достигнут на 78-й мин вследствие потери несущей способности (вертикальная деформация превысила предельную — 27 мм). Температура образца составляла 665 °С. На момент окончания испытаний второго образца (63 мин) его вертикальная деформация не превысила 8 мм, а температура составляла 510 °С. Предел огнестойкости составил не менее 63 мин (соответствует классу R60). Зафиксировано растрескивание и частичное отслоение огнезащитной плиты.

Кроме того, проводились огневые эксперименты ненагруженных колонн № 20Б1 СТО АСЧМ 20-93 по оценке огнезащитной эффективности плит «ПРОЗАСК Файерпанель» при различной толщине огнезащиты (от 20,5 до 37,5 мм). Фиксировалось время достижения конструкциями температуры

500 °С при воздействии на нее по стандартному режиму.

Этот показатель наиболее удобен для проведения сопоставления «расчет–эксперимент». Такое сопоставление проведено для этих, а также для упомянутых выше огневых экспериментов при воздействии нагрузки. Теплотехнические расчеты проводились с учетом реального температурного режима в огневой печи, толщины огнезащиты, приведенной толщины стальной конструкции и ее начальной температуры. Использовались уточненные в статье значения ТФХ исследуемых плит. Информация об огневых испытаниях по оценке огнезащитной эффективности плит, а также об испытаниях на огнестойкость нагруженных колонн представлена в табл. 3. Здесь же приведены результаты расчетов времени достижения конструкциями температуры 500 °С.

Кроме того, в этой таблице представлена информация по испытаниям на огнестойкость опытных образцов балки из двутавра № 30Б1 СТО АСЧМ 20-93 с трехслойной огнезащитой толщиной 37,5 мм (3×12,5 мм) при стандартном режиме огневого воздействия. Верхняя (необогреваемая) поверхность образцов изолировалась минераловатной плитой. Приведенная толщина металла составляла 3,95 мм. Для монтажа плит вокруг балки выполнялся стальной каркас из тонколистовых оцинкованных профилей.

Таблица 3. Информация об огневых испытаниях колонн и балки с огнезащитой плитами «ПРОЗАСК Файерпанель»

Table 3. Information about the fire tests of columns and beams that have PROSASK Firepanel fireproofing

Колонна Column	Испытательный центр Testing centre	Приведенная толщина, мм PTM, mm	Толщина огнезащиты, мм Thickness of fire proofing, mm	Нагрузка, кН Loading, kN	Время достижения температуры 500 °С, мин Time to reach a temperature of 500 °C, min		Предел огнестойкости Fire resistance limit
					эксперимент experiment	расчет calculation	
40SH1 STO ASCHM 20-93	ИЦ ВНИИПО Testing center VNIIPPO	5,93	12,5	195,22	62	40	R60
		5,93	37,5	195,22	150	129	R180
		5,93*	37,5*	195,22*	115*	106*	R150*
20B1 STO ASCHM 20-93	ИЦ ВНИИПО Testing center VNIIPPO	3,4	20,5	—	52	45,2	—
		3,4	25	—	61	56,7	—
		3,4	37,5	—	94	94,3	—
20B1 STO ASCHM 20-93	ИЦ «Огнестойкость» IC “Ogne-stoycost”	3,4	12,5	—	33	27,1	—
30B1 STO ASCHM 20-93**	ИЦ ВНИИПО Testing center VNIIPPO	3,95**	37,5**	81,63**	более 150** more than 150**	порядка 100** order 100**	R150**

* Воздействие по углеводородному режиму для несущей колонны.

** Испытания несущей балки.

* Effect on a loaded column in the hydrocarbon mode.

** Loaded beam testing.

Действовала постоянная статическая нагрузка, сосредоточенная в середине пролета балки 81,63 кН (8321 кг). При испытаниях прогиб образцов не превысил 19,2 мм, что значительно ниже предельного для данной балки уровня (200 мм). Выявлены следующие особенности поведения огнезащитных плит: зафиксировано появление трещин на внешнем слое плит на 55–60-й минуте, а на 115–125-й минуте — раскрытие образовавшихся трещин без разрушения плит. На момент окончания огневого воздействия (155 мин) средняя температура по термопарам, установленным на нижней полке двутавра, составила 446 °С, а на стенке двутавра — 393 °С. Установлено соответствие классу R150.

Сопоставление «расчет–эксперимент» показало следующее. Как правило, расчетное время достижения конструкциями температуры 500 °С меньше, чем зафиксированное при огневых испытаниях. Это свидетельствует о том, что они дают «оценку сверху» и такие расчеты при таких ТФХ плит могут использоваться в ходе проектирования огнезащиты и оценки огнестойкости защищаемых конструкций. Только в одном случае (колонна 20Б1 с огнезащитой толщиной 37,5 мм) получены практически одинаковые величины сравниваемого показателя. Больший уровень расчетных температур конструкций по сравнению с экспериментальными можно объяснить влиянием полостей при варианте исполнения огнезащиты в виде короба. Влияние термического сопротивления таких полостей может, в принципе, учитываться при расчетах по двумерной схеме (в отличие от одномерной с использованием понятия «приведенная толщина металла»). Для балки, кроме того, имеет место теплопередача через слой теплоизоляции у верхней полки, что демонстрирует, в частности, меньший уровень температуры стенки двутавра, по сравнению с нижней его полкой.

Результаты проведенного теплотехнического анализа с сопоставлением «расчет–эксперимент» показали, что может ставиться и обоснованно решаться задача по пересчету результатов огневых экспериментов на другие конструкции и условия

с увязкой таких параметров, как: нормативный предел огнестойкости, приведенная толщина и критическая температура стали, минимальная толщина огнезащиты. Как следует из нормативных документов, такой пересчет правомерен для конструкций, аналогичных тем, для которых проводились испытания на огнестойкость под нагрузкой. Несомненно, полезным дополнением к ним являются огневые испытания по оценке эффективности средств огнезащиты. При этом, как показано в статье, необходимо уделять должное внимание теплотехническим расчетам, оценке эффективности огнезащиты, а также уточнению ее теплофизических характеристик с использованием результатов дополнительных испытаний образцов относительно небольших размеров при лучистом нагреве.

Выводы

На примере плит «ПРОЗАСК Файерпанель» продемонстрирована целесообразность оценки эффективности конструктивной огнезащиты при испытаниях образцов на стенде лучистого нагрева, на котором с достаточной точностью воспроизводились и фиксировались условия воздействия на огнезащиту и температурные поля в работающей огнезащите. Показана роль теплотехнических расчетов по надежной методике, а также возможность определения эффективных ТФХ плит в рабочем диапазоне температур с использованием результатов термодинамических измерений при испытаниях образцов. Получены данные о влиянии влаги, содержащейся в плитах, на особенности их прогрева. Продемонстрирована целесообразность и представлены результаты теплотехнического анализа результатов серии испытаний в огневых печах по оценке эффективности огнезащиты плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» и огнестойкости защищаемых ими конструкций. Предложен подход и представлены результаты, способствующие повышению качества проектирования огнезащиты и решению задачи по обоснованному переносу результатов, полученных при огневых испытаниях, на другие условия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пехотиков А.В., Павлов В.В. Средства огнезащиты для стальных конструкций, актуальные вопросы при их применении, оценка технико-эксплуатационных характеристик // Промышленные покрытия. 2015. № 5–6. С. 30–34.
2. Сосков А.А., Пронин Д.Г. Огнезащита стальных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 7. С. 57–59. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23851087>
3. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В. Инженерный метод расчета огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой плитами КНАУФ-Файрборд // Пожарная безопасность/Fire Safety. 2016. № 3. С. 171–179. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26731725>
4. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В. Огнезащита стальных конструкций плитным материалом PYRO-SAFE AESTUVER T // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 11. С. 8–17. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.8-16
5. Gravit M., Antonov S., Nedryshkin O. Research features of tunnel lining with innovation fireproof

- panels // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 165. Pp. 1651–1657. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.906
6. *Пронин Д.С., Конин Д.В.* Проблемы применения стальных и железобетонных несущих конструкций высотных зданий с точки зрения их огнестойкости // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2018. Т. 27. № 1. С 50–57. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.01.50-57
 7. *Коротков Р.В.* Пожарная безопасность: огнезащита несущих металлических конструкций зданий // *Вестник государственной экспертизы*. 2018. № 1. С. 46–47.
 8. *Голованов В.И., Пехотикив А.В., Павлов В.В.* Оценка огнезащитной эффективности покрытий для стальных конструкций // *Пожарная безопасность*. 2020. № 4. С. 43–54. DOI: 10.37657/vniipr.pb.2020.101.4.004
 9. *Гравит М.В., Шабунина Д.Е.* Штукатурные составы как огнезащита стальных конструкций объектов нефтегазового комплекса // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация*. 2022. № 3. С. 46–55. DOI: 10.25257/FE.2022.3.46-55
 10. *Полевода И.И., Жамойдик С.М., Нехань Д.С.* Огнестойкость железобетонных колонн с конструктивной огнезащитой // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация*. 2022. № 2. С. 67–81. DOI: 10.25257/FE.2022.2.67-81
 11. *Гаращенко А.Н., Данилов А.И., Антонов С.П., Марченкова С.В., Павлов В.В.* Теплотехнический анализ результатов огневых испытаний под нагрузкой чугунных тубингов обделок тоннелей метрополитена, обеспечение их рациональной огнезащиты и заданной огнестойкости // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2022. Т. 31. № 1. С. 21–39. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.21-39
 12. *Гаращенко А.Н., Антонов С.П., Данилов А.И., Павлов В.В., Новиков Н.С.* Анализ результатов огневых испытаний под нагрузкой железобетонных колонн и плит с реализацией вариантов, исключающих взрывообразную потерю целостности и обеспечивающих заданную огнестойкость конструкций // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2022. Т. 31. № 3. С. 45–64. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.45-64
 13. *Kwon In-Kyu, Kwon Young-Bong.* Experimental study on the fire resistance of steel columns protected with fire boards // *International Journal of Steel Structures*. 2012. Vol. 12. Pp. 25–35. DOI: 10.1007/s13296-012-1003-4 URL: 13296-012-1003-4
 14. *Maraveas C., Vrakas A.A.* Design of concrete tunnel linings for fire safety // *Structural Engineering International*. 2014. Vol. 24. Issue 3. Pp. 319–329. DOI: 10.2749/101686614X13830790993041
 15. *Annerel E., Boch K., Lemaire T.* Passive fire protection end life safety // *Topic Safety of Tunnel and Underground Structure*. “SEE Tunnel: Promot-
 - ing in SEE Region” ITA WTS 2015 Congress and 41st General Assambly. Dubrovnik, Croatia, 2015. Pp. 1–10.
 16. *SFPE Handbook of Fire Protection*. Fifth edition. Hurley J. (Ed.). 2016. Morgan. Springer. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
 17. *The passive fire protection handbook*. Chapter 3. Structural steel. Etex building performance. 2017. 71 p. URL: iteassets/construction/ page-assets/global/tools--services/fire-protection-handbook/promat-pfph-chapter-3-structural-steel.pdf?v=49880e
 18. *Kowalski R.* The use of Eurocode model of reinforcing steel behavior at high temperature for calculation of bars elongation in RC elements subjected to fire // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 193. Pp. 27–34. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.182
 19. *Новак С.В., Круковский П.Г., Григорьян Н.Б.* Оценка огнезащитной способности вермикулитоцементной плиты «Эндотерм 210104» стандартизированными методами // *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2017. № 1 (3). С. 11–19.
 20. *Mahmud H.M.I., Mandal A., Nag S., Moinuddin K.A.M.* Performance of fire protective coatings on structural steel member exposed to high temperature // *Journal of Structural Fire Engineering*. 2021. Vol. 12. Pp. 193–211. DOI: 10.1108/JSFE-07-2020-0025
 21. *蒋首超, 吴弘宸.* 钢结构围护-防火一体化材料耐火性能试验研究 // *建筑钢结构进展*. 2021. Vol. 23(01). Pp. 77–84. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.01.010 (*Цзян Шоу Чао, У Хун Чэнь.* Экспериментальные исследования показателей огнестойкости огнезащитного интегрированного материала ограждения стальной конструкции // *Прогресс строительства металлоконструкций*. 2021. Т. 23. № 01. С. 77–84. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.01.010).
 22. *Hua N., Khorasani N., Tessari A., Ranade R.* Experimental study of fire damage to reinforced concrete tunnel slabs // *Fire Safety Journal*. 2022. Vol. 127. P. 103504. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103504
 23. *Zehfuß J., Sander L.* Gypsum plasterboards under natural fire — Experimental investigations of thermal properties // *Civil Engineering Design*. 2021. Vol. 3. Issue 8. Pp. 1–11. DOI: 10.1002/cend.202100002
 24. *Zhang C., Pintar A., Weigand J.M., Main J.A., Sadek F.* Impact of variability in thermal properties of SFRM on steel temperatures in fire // *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 123. P. 103361. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103361
 25. *Новак С.В., Дріжд В.Л., Добростан О.В., Новак М.С.* Вплив теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів на тепловий стан сталевих колон за стандартного температурного режиму // *Науковий вісник: Цивільний захист*

- та пожарна безпека. 2022. № 1 (13). С. 88–110. DOI: 10.33269/nvcs.2022.1.88-110
26. Гаращенко А.Н., Виноградов А.В., Даутиев И.З., Кобылков Н.В., Терехов С.А. Исследования вариантов конструктивной огнезащиты на основе рулонного базальтового материала МБОР на стенде лучистого нагрева // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 6. С. 28–39. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.06.28-39
 27. Гаращенко А.Н., Виноградов А.В., Кобылков Н.В., Никольчинкин А.А., Антипов Е.А. Экспериментальное и расчетное моделирование огне- и теплозащиты композиционных материалов в условиях высокотемпературного воздействия // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). С. 84–96. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-84-96
 28. Пронин Д.Г., Тимонин С.А., Голованов В.И. СТО АРСС 11251254.001-018-03. Проектирование огнезащиты несущих стальных конструкций с применением различных облицовок. М. : АРСС, 2018. 70 с.
 29. Страхов В.Л., Гаращенко А.Н., Рудзинский В.П. Программные комплексы для расчетов тепломассопереноса в строительных конструкциях с огнезащитой с учетом термического разложения, вспучивания–усадки и испарения–конденсации // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2001. Т. 10. № 4. С. 9–11.
 30. Strakhov V.L., Garashchenko A.N., Kuznetsov G.V., Rudzinskii V.P. High-temperature heat and mass transfer in a layer of moisture-containing fireproof material // High Temperature. 2000. Vol. 38. Issue 6. Pp. 921–925. DOI: 10.1023/a:1004149625276
 31. Волков А.А., Ройтман В.М., Приступок Д.Н., Федоров В.Ю. Влияние влажности строительных материалов на точность расчетов прогрева конструкций при оценках их огнестойкости // Системотехника строительства. Киберфизические строительные системы : сб. мат. семинара, в рамках VI Межд. науч. конф. Москва, 14–16 ноября 2018 г. М. : МГСУ, 2018. С. 207–212.

REFERENCES

1. Pekhotikov A.V., Pavlov V.V. Fire protection for steel structures, topical issues in their application, assessment of technical and operational characteristics. *Promishlennye pokritia/Industrial coatings*. 2015; 5-6:30-34. (rus).
2. Soskov A.A., Pronin D.G. Fire protection of steel structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 7:57-59. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23851087> (rus).
3. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Engineering method for designing fire resistance of steel constructions protected by KNAUF-fireboard plates. *Pozharnaya Bezopasnost'/Fire Safety*. 2016; 3:171-179. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26731725> (rus).
4. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Fire protection of steel structures with slab material PYRO-SAFE AESTUVER T. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25:60-70. (rus).
5. Gravit M., Antonov S., Nedryshkin O. Reserch features of tunnel lining with innovation fireproof panels. *Procedia Engineering*. 2016; 165:1651-1657. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.906
6. Pronin D.G., Konin D.V. Problems of application of steel and reinforced concrete bearing structures for tall buildings with respect to their fire resistance. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(1):50-57. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.01.50-57 (rus).
7. Korotkov R.V. Fire safety: fire protection of load-bearing metal structures of buildings. *Bulletin of State Expertise*. 2018; 1:46-47.
8. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V. Evaluation of fire-retardant effectiveness of coatings for steel structures. *Pozharnaya Bezopasnost'/Fire Safety*. 2020; 4:43-54. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2020.101.4.004
9. Gravit M.V., Shabunina D.E. Plaster compositions as fire protection of steel structures at oil and gas facilities. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2022; 3:46-55. DOI: 10.25257/FE.2022.3.46-55
10. Polevoda I.I., Zhamoidik S.M., Nekhan D.S. Fire resistance of reinforced concrete columns with structural fire retardance. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya/Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2022; 2:67-81. DOI: 10.25257/FE.2022.2.67-81
11. Garashchenko A.N., Danilov A.I., Antonov S.P., Marchenkova S.V., Pavlov V.V. The thermal analysis of fire test results obtained for loaded cast iron tubing used to line subway tunnels, their rational fire protection and pre-set fire resistance. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(1):21-39. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.21-39 (rus).
12. Garashchenko A.N., Antonov S.P., Danilov A.I., Pavlov V.V., Novikov N.S. Analyzing the fire performance of concrete columns and slabs under loading and using options, preventing explosive spalling to ensure the pre-set fire resistance. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):45-64. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.45-64 (rus).
13. Kwon In-Kyu, Kwon Young-Bong. Experimental study on the fire resistance of steel columns protected with fire boards. *International Journal of Steel Structures*. 2012; 12:25-35. DOI: 10.1007/s13296-012-1003-4 URL: 13296-012-1003-4
14. Maraveas Ch., Vrakas A.A. Design of concrete tunnel linings for fire safety. *Structural Engineering Interna-*

- tional. 2014; 24(3):319-329. DOI: 10.2749/101686614X13830790993041
15. Annerel E., Boch K., Lemaire T. Passive fire protection end life safety. *Topic Safety of Tunnel and Underground Structure. "SEE Tunnel: Promoting in SEE Region" ITA WTS 2015 Congress and 41st General Assembly*. Dubrovnik, Croatia, 2015. 2015; 1-10.
 16. *SFPE Handbook of Fire Protection. Fifth edition*. Hurley J. (Ed.). Morgan. Springer. 2016. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
 17. *The passive fire protection handbook*. Chapter 3. Structural steel. Etex building performance. 2017; 71. URL: [iteassets/construction/page-assets/.global/tools-services/fire-protection-handbook/promat-pfph-chapter-3-structural-steel.pdf?v=49880e](https://www.etex.com/~/media/Assets/Construction/page-assets/global/tools-services/fire-protection-handbook/promat-pfph-chapter-3-structural-steel.pdf?v=49880e)
 18. Kowalski R. The use of Eurocode model of reinforcing steel behavior at high temperature for calculation of bars elongation in RC elements subjected to fire. *Procedia Engineering*. 2017. 193:27-34. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.182
 19. Novak S.V., Krukovsky P.G., Grigoryan N.B. Evaluation of the flame-retardant ability of the vermiculite-cement plate "Endotherm 210104" by standardized methods. *Naukovij visnik: Civilnij zahist ta pozhezhna bezpeka/Scientific bulletin — Civil Protection and fire safety*. 2017; 1(3):11-19. (rus).
 20. Mahmud H.M.I., Mandal A., Nag S., Moinuddin K.A.M. Performance of fire protective coatings on structural steel member exposed to high temperature. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2021; 12:193-211. DOI: 10.1108/JSFE-07-2020-0025
 21. 蒋首超, 吴弘宸. 钢结构围护-防火一体化材料耐火性能试验研究. *建筑钢结构进展*. 2021; 23(01):77-84. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.01.010 (Jiang S., Wu H. An experimental investigation on the fire resistance of the integrated envelope-fire protection material for steel buildings. *Progress of Building Steel Structure*. 2021; 23:77-84. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.01.010). (chn).
 22. Hua N., Khorasani N., Tessari A., Ranade R. Experimental study of fire damage to reinforced concrete tunnel slabs. *Fire Safety Journal*. 2022; 127:103504. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103504
 23. Zehfuß J., Sander L. Gypsum plasterboards under natural fire — Experimental investigations of thermal properties. *Civil Engineering Design*. 2021; 3(8):1-11. DOI: 10.1002/cend.202100002
 24. Zhang C., Pintar A., Weigand J.M., Main J.A., Sadek F. Impact of variability in thermal properties of SFRM on steel temperatures in fire. *Fire Safety Journal*. 2021; 123:103361. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103361
 25. Novak S., Drizhdg V., Dobrostan O., Novak M. Influence of thermophysical characteristics of fire-retardant materials on the thermal state of steel columns under standard temperature regime *Naukovij visnik: Civilnij zahist ta pozhezhna bezpeka — Scientific bulletin/ Civil Protection and fire safety*. 2022; 1(13):88-110. DOI: 10.33269/nvcz.2022.1.88-110 (ukr).
 26. Garashchenko A.N., Vinogradov A.V., Dashtiev I.Z., Kobylkov N.V., Terekhov S.A. Using a radiant heat test facility to study the options for the fire protection of structures involving coiled MBOR basalt fiber material. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(6):28-39. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.28-39 (rus).
 27. Garashchenko A.N., Vinogradov A.V., Kobylkov N.V., Nikolchenkin A.A., Antipov E.A. Experimental and computational modeling of fire and thermal protection composite materials under high-temperature exposure. *Aviation Materials and Technologies*. 2022; 3(68): 84-96. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-84-96
 28. Pronin D.G., Timonin S.A., Golovanov V.I. *STO ARSS 11251254.001-018-03. Design of fire protecting loaded steel constructions using different facings*. Moscow, ARSS, 2018; 70. (rus).
 29. Strakhov V.L., Garashchenko A.N., Kuznetsov G.V., Rudzinskii V.P. Software for simulation of temperature fields in fire resistant building constructions with taking into account the processes of thermal decomposition, intumescence – shrinkage and evaporation – condensation. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2001; 10(4):9-11. (rus).
 30. Strakhov V.L., Garashchenko A.N., Kuznetsov G.V., Rudzinskii V.P. High-temperature heat and mass transfer in a layer of moisture-containing fireproof material. *High Temperature*. 2000; 38(6):921-925. DOI: 10.1023/a:1004149625276
 31. Volkov A.F., Roytman V.M., Pristupyuk D.N., Fedorov V.U. Influence of building materials humidity on heating calculation accuracy at fire protecting grade. *Systemotechnique of building. Cyberphysique building systems : Collection of materials of the seminar held within the framework of the VI International Scientific Conference*. Moscow, MGSU, 2018; 207-212. (rus).

Поступила 24.10.2022, после доработки 21.11.2022;
принята к публикации 28.11.2022

Received October 24, 2022; Received in revised form November 21, 2022;

Accepted November 28, 2022

Информация об авторах

ГАРАЩЕНКО Анатолий Никитович, д-р техн. наук, доцент, директор по науке, ПРОЗАСК, Россия, 107564, г. Москва, ул. Краснобогатырская, 42, стр. 1; ORCID: 0000-0002-8143-944X; e-mail: a.n.gar@mail.ru

АНТОНОВ Сергей Порфирьевич, директор, ПРОЗАСК, Россия, 107564, г. Москва, ул. Краснобогатырская, 42, стр. 1; соискатель на ученую степень кандидата наук, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ORCID: 0000-0002-2664-1397; e-mail: asp@prozask.ru

ВИНОГРАДОВ Александр Всеволодович, начальник лаборатории, канд. техн. наук, Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения, Россия, 141371, г. Хотьково, ул. Заводская; РИНЦ ID: 597524; ORCID: 0000-0002-6115-1633; e-mail: win11@yandex.ru

Вклад авторов:

Гарашенко А.Н. — научное руководство, участие в проведении испытаний на стенде лучистого нагрева и анализе экспериментальной информации, проведение и анализ результатов расчетов, написание исходного текста, итоговые выводы.

Антонов С.П. — концепция исследования, организация и участие в проведении огневых экспериментов, анализ экспериментальной информации, участие в анализе результатов расчетов, доработка текста, итоговые выводы.

Виноградов А.В. — руководство, обеспечение и участие в проведении испытаний образцов на стенде лучистого нагрева и анализе экспериментальной информации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Anatoliy N. GARASHCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Science Director, PROZASK, LLC, Krasnobogatyrskaya St., 42, bld. 1, Moscow, 107564, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8143-944X; e-mail: a.n.gar@mail.ru

Sergey P. ANTONOV, Director, PROZASK, LLC, Krasnobogatyrskaya St., 42, bld. 1, Moscow, 107564, Russian Federation; Applicant for the Degree of Candidate of Sciences, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2664-1397; e-mail: asp@prozask.ru

Aleksandr V. VINOGRADOV, Cand. Sci. (Eng.), Laboratory Chief, Central Research Institute for Special Machinery, Zavodskaya St., Khotkovo, 141371, Russian Federation; ID RISC: 597524; ORCID: 0000-0002-6115-1633; e-mail: win11@yandex.ru

Contribution of the authors:

Anatoliy N. Garashchenko — scientific guidance, participation in conducting tests at the radiant heating stand and analyzing experimental information, conducting and analyzing calculation results, writing the source text, final conclusions.

Sergey P. Antonov — conceptual research, organization and participation in various firing experiments, analysis of experimental information, participation in the analysis of text calculations, final conclusions.

Aleksandr V. Vinogradov — leadership, support and participation in conducting fire experiments and analyzing of experimental information.

The authors declare no conflicts of interests.