

Анализ результатов огневых испытаний под нагрузкой железобетонных колонн и плит с реализацией вариантов, исключающих взрывообразную потерю целостности бетона и обеспечивающих заданную огнестойкость конструкций

Анатолий Никитович Гаращенко¹ ✉, Сергей Порфирьевич Антонов²,
Андрей Игоревич Данилов³, Владимир Валерьевич Павлов⁴,
Николай Сергеевич Новиков⁴

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 ООО «Центр исследований опасных факторов пожаров», г. Санкт-Петербург, Россия

⁴ Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрена проблема предотвращения взрывообразной потери целостности бетона и обеспечения требуемой огнестойкости железобетонных конструкций. Ее актуальность обусловлена недостаточным объемом как огневых испытаний таких конструкций под нагрузкой, так и теплотехнических расчетов, необходимых для объективного анализа их результатов.

Цель и задачи. Обоснование выбора эффективных способов предотвращения взрывообразной потери целостности бетона и обеспечения заданной огнестойкости конструкций. Для этого организовано проведение серии огневых испытаний железобетонных колонн и плит перекрытия при наличии и отсутствии полипропиленовой микрофибры в составе бетона и при использовании конструктивной огнезащиты, а также обеспечено проведение теплотехнического анализа полученных результатов.

Методы. Оценивалась огнестойкость натуральных образцов колонн и плит по стандартизованной методике в ходе испытаний в огневой печи под нагрузкой с проведением дополнительных термометрических измерений, результаты которых использовались в ходе теплотехнического анализа. Анализ проводился с использованием методик и программ численных расчетов нестационарных температурных полей в конструкциях с огнезащитой в одномерной и двумерной постановке.

Результаты. Получены дополнительные данные огневых экспериментов при проведении испытаний под нагрузкой, подтверждающие эффективность введения в состав бетона микрофибры как средства для предотвращения взрывообразного разрушения колонн и плит из тяжелого бетона и обеспечения их высоких пределов огнестойкости (R 120 и R 150, при постоянной статической нагрузке). Продемонстрирована роль и особенности использования для этой цели конструктивной огнезащиты в виде плит «ПРОЗАСК Файерпанель» и штукатурки «ИГНИС ЛАЙТ». Приведены примеры, демонстрирующие целесообразность и эффективность проведения теплотехнических расчетов в одномерной и в двумерной постановке в качестве инструмента для анализа результатов проведенных испытаний. Показана возможность пересчета результатов измерений при экспериментах на другие условия, что необходимо для принятия обоснованных технических решений по огнестойкости железобетонных конструкций, подобных испытанным, а также по их рациональной огнезащите.

Выводы. Проведенные огневые эксперименты и результаты их тщательного теплотехнического анализа позволили получить значительный объем важной информации, необходимой для обеспечения заданной огнестойкости несущих железобетонных колонн и плит перекрытия и дальнейших путей развития данного важного направления экспериментальных и теоретических исследований. Продемонстрирована эффективность теплотехнических расчетов как инструмента для оценки параметров огнестойкости и огнезащиты железобетонных конструкций и возможность сокращения с их помощью количества дорогостоящих огневых испытаний.

Ключевые слова: полипропиленовая микрофибра; конструктивная огнезащита; теплотехнические расчеты; статическая нагрузка; теплофизические характеристики

Для цитирования: 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

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

Analyzing the fire performance of concrete columns and slabs under loading and using options, preventing explosive spalling to ensure the pre-set fire resistance

Anatoliy N. Garashchenko¹✉, Sergey P. Antonov², Andrey I. Danilov³, Vladimir V. Pavlov⁴, Nikolay S. Novikov⁴

¹ PROZASK, LLC, Moscow, Russian Federation

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

³ Research Center of Hazardous Fire Factors, LLC, Saint-Petersburg, Russian Federation

⁴ All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The authors focus on preventing the explosive spalling of concrete and the fireproofing of reinforced concrete structures. The relevance of this issue is explained by the insufficient number of fire tests of such structures under loading and thermal engineering calculations, needed for an objective analysis of testing results.

Goal and objectives. The authors analyze the results of a series of fire tests, involving concrete columns and slabs with and without polypropylene microfiber, if no fireproofing is applied, as well as the results of the same tests involving the same items fireproofed by plates or plaster.

Methods. The fire resistance of full-scale specimens of concrete was evaluated according to a standardized testing in a fire furnace under loading. It encompasses additional thermocouple measurements used to make a thermal engineering analysis. The analysis entailed both one- and two-dimensional problem formulations, methods and programmes for the numerical computation of non-stationary temperature fields in fireproof structures.

Results. New data, obtained in the course of the fire experiments, show the efficiency of the polypropylene microfiber used to prevent the explosive spalling of concrete. The fire resistance limit is R 120 and R 150 under constant static loading. The fire resistance limit of similar structures, fireproofed by PROSASK Firepanel plates or IGNIS LIGHT plaster, was demonstrated. The specimens show the efficiency of methods and programmes for the one- and two-dimensional numerical analysis of non-stationary temperature fields in fireproof structures. The calculation results are presented for various fireproofing options.

Conclusions. The testing results and their thermal analysis represent important items of information necessary to ensure the fire safety and the pre-set fire resistance of concrete structures under loading. They can also be used to outline the development pattern of this experimental and theoretical research project. The efficiency of thermal engineering calculations as a tool for evaluating fire protection parameters and the fire resistance of concrete structures is demonstrated, also as an option to reduce the number of expensive fire tests.

Keywords: polypropylene microfiber; fireproofing of structures; thermal engineering calculations; static loading; thermophysical characteristics

For citation: 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. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):45-64. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.45-64 (rus).

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

Введение

Вопросы обеспечения заданной огнестойкости несущих строительных конструкций из железобетона (колонн, плит перекрытия, тунингов обделки тоннелей и пр.), применяемых при строительстве, относятся к числу наиболее важных применительно к обеспечению пожарной безопасности объекта. Нормативными документами предписано, что для обеспечения (подтверждения) пределов огнестойкости необходимо проведение огневых экспериментов при действии проектных нагрузок на конструкции, однако до настоящего времени объем таких испытаний не соответствовал реальным потребностям.

Особенностью конструкций из железобетона является вероятность взрывообразного (хрупкого) разрушения и взрывообразной потери целостности (ВПЦ) защитного слоя бетона с последующим оголением и сверхнормативным прогревом арматурного каркаса, вплоть до образования сквозных отверстий или полного разрушения. Причины хрупкого разрушения бетона при пожаре доподлинно не известны, но предполагается, что в основе явления лежит переход существующих до нагрева или вновь образовавшихся при нагреве микротрещин в структуре бетона из равновесного состояния в неравновесное и спонтанное их развитие под действием напряжений и давления водяного пара. Также известно, что про-

цесс хрупкого разрушения зависит от состава бетона и наиболее характерен для конструкций из высокопрочных (т.н. «тяжелых») бетонов, в особенности при повышенном уровне их влажности [1–11]. Взрывообразное разрушение происходит тогда, когда напряжения, возникающие в бетоне при эксплуатационных нагрузках, усиливаются вследствие внутреннего повышения давления паров физической и химически связанной воды в бетоне и в результате превышают предел сопротивления бетона растяжению. Наибольшее количество публикаций, посвященных экспериментальным и расчетным оценкам работоспособности железобетонных конструкций из тяжелых бетонов (с фактами их ВПЦ), посвящено тубингам обделки транспортных тоннелей [4–9].

Из трудов научного сообщества известно, что одним из действенных способов предотвращения (или снижения вероятности) ВПЦ и, следовательно, обеспечения фактического предела огнестойкости железобетонных конструкций до требуемого значения является использование полипропиленовой микрофибры (ППМФ) [4, 5, 8–18]. Это нашло отражение в руководящих нормативных документах как в европейских (EN 1992-1-2:2009 (02250) Еврокод 2. «Проектирование железобетонных конструкций»). Часть 1–2. «Общие правила определения огнестойкости»), так и российских (СП 468.1325800.2019. «Бетонные и железобетонные конструкции. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности»).

Имеются следующие представления о механизме ее влияния на работоспособность конструкций [13]. При нагреве происходит плавление полипропилена, и в бетоне образуются микроканалы, обеспечивающие снижение уровня напряжений, возникающих из-за роста давления паров влаги в порах бетона. Известно также, что вероятность такого крайне нежелательного явления, как ВЦП, выше при действии сжимающих нагрузок, т.е. это более характерно, например, для железобетонных колонн по сравнению с железобетонными плитами. При этом большинство исследований показывают [4, 5, 11, 13], что простое добавление в состав бетона такой неармирующей добавки, как полипропиленовая микрофибра определенных размеров, может немного понизить прочностные свойства бетона на сжатие. Но это незначительное понижение прочности несложно компенсировать за счет соответствующего уточнения рецептуры бетонной смеси [12], что позволяет сохранить соответствие полученного класса бетона с ППМФ заданному в проекте на данный объект требуемому классу бетона.

Другим способом предотвращения (или снижения вероятности) ВЦП и даже повышения огнестойкости железобетонных конструкций до требуемых пределов является использование

конструктивной огнезащиты, например, плитными материалами или штукатуркой [7, 8, 19]. Рассматривалась также возможность использования для этой цели вспучивающихся покрытий [20]. Однако нужно учитывать, что применение огнезащитных вспучивающих составов может быть ограничено проектными решениями или потребовать дополнительных испытаний на определение класса пожарной опасности строительных конструкций с нанесенным покрытием. Еще одной проблемой является относительно низкая стойкость и стабильность пенококса и, соответственно, эффективность таких покрытий при длительном огневом воздействии, характерном для железобетонных конструкций.

Следующим способом предотвращения взрывообразного разрушения бетона может являться использование стальной противоточной сетки для армирования поверхностного слоя бетонных конструкций, однако эффективность применения такого варианта для конкретных конструкций требует экспериментального подтверждения, а целесообразность, в том числе удобство монтажа, нуждается в технико-экономических обоснованиях.

В нашей стране в 90-х годах прошлого века и 00-х годах настоящего огневые испытания несущих конструкций из железобетона при воздействии нагрузок проводились в недостаточном количестве. Это связано со сложностью их подготовки и проведения и со значительной стоимостью. Еще нельзя не отметить несовершенство существующих нормативных документов [21, 22]. В частности, даже имеющиеся в ч. 9 и 10 ст. 87 Федерального Закона положения «Технического регламента о требованиях пожарной безопасности» № 123-ФЗ, предусматривающие обязательное проведение таких экспериментов, далеко не всегда выполняются, а заменяются инженерными расчетами только на основании предлагаемых табличных и графических данных (СП 468.1325800.2019). Все это диктует необходимость проведения и тщательного анализа результатов огневых экспериментов для нагруженных железобетонных конструкций. И такой анализ должен проводиться с применением теплотехнических и статических расчетов. Однако в отличие от статических расчетов, теплотехническим до настоящего времени уделялось значительно меньшее внимание, что отражено, в частности, в СП 468.1325800.2019. В данном Своде правил в п. 6.5 указывается, что для упрощенного решения задач теплотехнического расчета даются приложения А и Б, а в них уже приведены рекомендованные кривые прогрева типовых сечений железобетонных конструкций в зависимости от различной длительности воздействия при стандартном температурном режиме пожара.

Все это свидетельствует о необходимости обоснованного выбора конкретных и эффективных способов предотвращения взрывообразной потери целостности бетона и обеспечения огнестойкости конструкций. Для решения этой задачи требуется проведение дополнительных огневых испытаний железобетонных конструкций как при наличии полипропиленовой микрофибры в составе бетона, так и при использовании конструктивной огнезащиты. Требуется также обеспечить проведение тщательного теплотехнического анализа результатов таких огневых экспериментов.

Материалы и методы

Статья посвящена анализу результатов уникальной серии огневых испытаний на огнестойкость, состоящей из семи огневых экспериментов образцов железобетонных колонн и плит перекрытия под нагрузкой. Испытания проводились по специальной программе в Испытательной лаборатории НИЦ ФГБУ ВНИИПО МЧС РФ. Описание применяемой методики проведения испытаний и используемого оборудования содержится в ГОСТ 30247.0–94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования» и, применительно к особенностям испытания различных конструкций, — в ГОСТ 30247.1–94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции». Однако данные стандарты не предусматривают тщательного теплотехнического анализа результатов огневых испытаний, поэтому при проведении серии испытаний было запланировано и обеспечено проведение дополнительных термометрических измерений с последующим обобщением и использованием их результатов, что не предусматривается указаниями в стандартизированной методике.

Целью исследований являлась оценка эффективности технических решений, принимаемых для исключения или снижения вероятности взрывообразного разрушения бетона и повышения огнестойкости конструкций. Это необходимо для обоснованного выбора наиболее рациональных из таких решений. Логика организации этих экспериментов предусматривала анализ эффективности использования полипропиленовой микрофибры «PROZASK IGS» при сопоставлении результатов испытаний при ее наличии и отсутствии в матрице бетона. Кроме того, был предусмотрен анализ эффективности пассивной конструктивной огнезащиты, выполненной из плит «ПРОЗАСК Файерпанель», а также использование для целей огнезащиты штукатурки «ИГНИС ЛАЙТ».

Различные огнезащитные штукатурки — это традиционное средство огнезащиты, и «ИГНИС ЛАЙТ» является ее типичным, хотя и модернизиро-

ванным представителем. В его состав, кроме цемента и вермикулита, входят не только дегидратирующие добавки на основе гидроксидов алюминия, но и целый набор химических компонентов и добавок для придания материалу прочности и пластичности (например, редиспергируемые полимерные порошки, различные эфиры и армирующая фибра).

Однако наибольший интерес представляет конструктивная огнезащита с применением плитных материалов «ПРОЗАСК Файерпанель». Как показала практика их применения для конструкций из различных материалов на многочисленных строительных объектах, они обладают достаточно высокой огнезащитной эффективностью, эксплуатационной стойкостью, технологичностью монтажа, эстетической привлекательностью и прочими положительными качествами. С учетом нормативных требований, предписывающих проведение огневых испытаний для конструкций из различных материалов под нагрузкой (как с огнезащитой, так и без нее), в случае применения плит «ПРОЗАСК Файерпанель» такие испытания проводились и продолжают проводиться. Для основных видов защищаемых конструкций разработаны и используются специальные элементы или каркасы для крепления плит, например, из легких стальных холодногнутых оцинкованных и/или окрашенных профилей. Именно с таким штатным крепежом должна подтверждаться работоспособность и эффективность подобной конструктивной огнезащиты.

Теоретические основы

Особенностью рассматриваемой серии огневых экспериментов является тщательный теплотехнический анализ их результатов. Теплотехнические расчеты в любом возможном объеме крайне желательны и востребованы. Они необходимы для правильной интерпретации результатов огневых испытаний, учитывая значительные затраты времени и средств на проведение даже ограниченного их количества и невозможность проведения таких испытаний для множества различных вариантов исполнения как самих конструкций, так и их огнезащиты. В то же время известные трудности с проведением такого анализа связаны со сложным поведением бетона и огнезащиты при высокотемпературном нагреве, отсутствием общепринятых методик и программ расчетов, а также с явно недостаточным объемом данных по теплофизическим и прочим характеристикам указанных материалов, в значительной степени зависящим от температуры.

Имеющиеся зарубежные программные комплексы (например, ANSYS) предполагают проведение как статических, так и теплотехнических расчетов, но мы предполагаем, что они доступны не каждому

конструктору из-за их высокой стоимости. Российский программный продукт «ЛИРА-САПР 2019» находится в стадии совершенствования для целей решения стационарных и нестационарных задач теплопроводности.

Однако оптимальным вариантом в нашей ситуации является использование одной из относительно несложных и производительных отечественных методик и программ теплотехнических расчетов. Для анализа результатов рассматриваемой серии испытаний привлекались апробированные методики и программы, которые ранее использовались при расчетах различных средств огнезащиты и огнестойкости строительных конструкций на многочисленных объектах. Преимущества и особенности такого подхода продемонстрированы, в частности, в статье [23] на примере теплотехнических расчетов чугунных тубингов обделки тоннелей метрополитена. Использованы компьютерные программы («Огнезащита. Версия ВУ.2» и «Огнезащита. Версия 2Т») [24] для расчетов в одномерной и двумерной постановке соответственно. Они разработаны в результате численного решения систем уравнений, включающих элементарное, т.е. без усложнений, уравнение теплопроводности с граничными условиями для описания нестационарного процесса теплопередачи для многослойной конструкции [23].

Результаты огневых испытаний железобетонных колонн и их обсуждение

Представлены и анализируются результаты серии огневых испытаний под нагрузкой, проведенных в ИЦ ПБ ФГБУ ВНИИПО МЧС РФ, образцов железобетонных колонн, изготовленных из тяжелого бетона класса В30 без фибры, а также из тяжелого бетона класса В30 с добавлением полипропиленовой микрофибры «PROZASK IGS». Колонны, изготовленные из бетона без добавления фибры, испытывались как без огнезащиты, так и с пассивной огнезащитой: или плитами «ПРОЗАСК Файерпанель», или огнезащитной штукатуркой «ИГНИС ЛАЙТ». Испытания проводились с целью определения предела огнестойкости образцов при воздействии по стандартному температурному режиму. Были изготовлены образцы колонн марки CL-40T4, имеющие размеры 400 × 400 × 3000 мм с продольным армированием профилем класса А-II Ø16 мм. Величина защитного слоя до продольной арматуры составляла 40 мм. Влажность бетона составила от 3 до 3,9 %.

Испытания проводились под воздействием постоянной статической вертикальной нагрузки, равной 981 кН (100 тс) при расчетной критической нагрузке в 150 тнс. Измеряли величину вертикальной деформации опытных образцов. Предельным состоянием при испытании на огнестойкость

является потеря несущей способности вследствие обрушения конструкции или возникновения предельной вертикальной деформации (составляет для данной конструкции 30 мм) либо скорости нарастания вертикальной деформации (более 10 мм/мин). Проведено пять огневых экспериментов, в каждом из которых испытывались по два опытных образца.

Три эксперимента проводились с колоннами без пассивной огнезащиты, «незащищенными»:

- в первом из них испытывались образцы из бетона без добавления ППМФ;
- в двух других испытывались образцы колонн с добавлением в бетон микрофибры «PROZASK IGS» в количестве 1 кг/м³.

После изготовления образцов в них устанавливались термопары на глубине 20, 30 и 40 мм от поверхности путем засверливания бетона в центральной части граней колонны.

За время проведения эксперимента с колонной без ППМФ были зафиксированы следующие характерные особенности поведения образцов:

- практически с самого начала (с 3–4-й мин) начали фиксироваться многочисленные хлопки (звуки), свидетельствующие о ВПЦ бетона;
- после 15-й мин прервались показания термопар, размещенных по толщине бетона, предположительно, вследствие нарушения их целостности из-за отрыва фрагментов бетона, после чего нагрузка с опытных образцов была снята и эксперимент прекращен.

Интенсивность хрупкого разрушения бетона колонны с каждой минутой эксперимента возрастала, что характеризовалось усиливающимся звуками (хлопками), после чего нагрузка с опытных образцов была уменьшена на 80 %, при сохранении стандартного температурного режима в печи. При дальнейшем испытании колонны с незначительной нагрузкой в течение 10 мин взрывообразное разрушение бетона прекратило проявляться и эксперимент был прекращен.

При осмотре состояния образцов после испытаний (внешний вид показан на рис. 1) установлено разрушение защитного слоя бетона на глубину от 5 до 50 мм по всей поверхности образцов на всех гранях колонны. В отдельных местах защитный слой отсутствовал полностью с оголением арматуры.

За время проведения второго эксперимента для образцов с ППМФ зафиксировано только два хлопка, которые могли бы свидетельствовать о его хрупком разрушении. После 15-й мин эксперимент прекращен, чтобы обеспечить возможность сопоставления состояния образцов колонн при наличии и отсутствии в составе бетона ППМФ после одинакового времени огневого воздействия. При осмотре состояния образцов с добавлением ППМФ на одном из них зафиксиро-



Рис. 1. Опытный образец после первого огневого эксперимента (без ППФ в составе бетона)

Fig. 1. The test specimen after the 1st fire experiment (the concrete has no polypropylene microfiber)

вано два локальных участка частичного разрушения защитного слоя бетона на глубину не более 5 мм. Отмечено, что это локализовано в зонах нахождения печных форсунок и воздействия на образцы их пламени. Собственно, даже этот результат предполагает необходимость дальнейших исследований по поведению бетонов с добавлением ППМФ в случае воздействия на них не только стандартных, но и углеводородных пожаров и воздействия пламени реактивных форсунок.

Третий огневой эксперимент проведен также для образцов с ППМФ. В образцах были установлены термомпары на глубине 20, 30, 50 и 70 мм от нагреваемой поверхности. Кроме того, признано целесообразным изменение ориентации образцов для исключения лобового натекания пламени от форсунок на их поверхность (осуществлен их разворот на 45°). Первоначально планировалась продолжительность огневого воздействия 120 мин, но ввиду отсутствия признаков ВПЦ и наступления предельного состояния образцов, продолжительность эксперимента была увеличена до 151 мин. За это время не были зафиксированы характерные хлопки, предполагающие наличие взрывообразного (хрупкого) разрушения бетона. В ходе этого эксперимента постепенно росли вертикальные деформации



Рис. 2. Внешний вид опытного образца (с ППМФ в бетоне) после третьего огневого эксперимента

Fig. 2. The appearance of the test specimen (the concrete has polypropylene microfiber) after the 3rd fire experiment

ции со стабилизацией на уровне около 4 мм в период с 45 по 60-ю мин и постепенным уменьшением до 2,3 мм при окончании эксперимента. Зафиксировано появление влаги в виде водяных капель, поступающих в нижнюю часть огневой печи с опытного образца, начиная с 40–55-й мин. Подтверждено соответствие классификации R 150. При осмотре образцов после эксперимента (внешний вид показан на рис. 2) следов взрывообразного разрушения защитного слоя колонн не обнаружено. Продемонстрирована возможность обеспечения (со значительным запасом) предела огнестойкости колонн R 150 при добавлении в состав тяжелого бетона микрофибры «PROZASK IGS» в количестве 1 кг/м³. Как показали результаты огневого эксперимента, не вызывает сомнений возможность обеспечения указанной огнестойкости и при больших нагрузках, превышающих задаваемый при испытаниях уровень в 981 кН (100 тс).

После этого проведено также два огневых эксперимента под нагрузкой для колонн из бетона класса В30 без ППФ, но с пассивной огнезащитой:

- в четвертом эксперименте испытывались образцы колонн с огнезащитными плитами «ПРОЗАСК Файерпанель»;

- в пятом эксперименте — образцы колонн с нанесенной огнезащитной штукатуркой «ИГНИС ЛАЙТ».

На опытные образцы для первого эксперимента производился монтаж однослойной конструктивной огнезащиты из плит «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 12,5 мм. Монтаж проводился с использованием гвоздевых анкеров по бетону FISHER FNA II 6 × 30/30. Были дополнительно установлены термомпары на глубине 20, 30 и 40 мм от поверхности колонны в ее центральной части. Длительность испытаний составила 241 мин без достижения образцами предельного состояния (максимальная вертикальная деформация 4,7 мм). Подтверждено соответствие огнестойкости такой защищенной колонны классификации R 240. К моменту окончания испытаний максимальная температура, зафиксированная термомпарами, составила 627 °С (глубина 20 мм), 471 °С (30 мм), 243 °С (40 мм).

Осмотр опытных образцов после испытаний не зафиксировал существенных изменений их состояния, в частности, обрушений или отслоений огнезащитной облицовки и нарушения целостности защитного слоя бетона. Внешний вид образцов после испытаний показан на рис. 3а. Можно отметить только появление небольших трещин в огнезащитных плитах и образование щелей незначительного размера по торцам плит. Таким образом, продемонстрировано, что использование однослойной огнезащиты плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 12,5 мм исключает ВПЦ защитного слоя колонн из тяжелого бетона и позволяет обеспечить высокий уровень предела огнестойкости (не менее 240 мин).

На опытные образцы для второго эксперимента наносилась огнезащитная штукатурка «ИГНИС ЛАЙТ», средняя толщина сухого слоя составила 26 мм. Были установлены термомпары на поверхности колонны в ее центральной части и на глубине 25 мм от поверхности. Длительность испытаний составила 241 мин без достижения образцами предельного состояния (вертикальная деформация составила не более 2 мм). Подтверждено соответствие классификации R 240. К моменту окончания испытаний максимальная температура, зафиксированная термомпарами, составила 400 °С на поверхности колонны и 276 °С на глубине 25 мм. Осмотр образцов после испытаний не зафиксировал существенных изменений их состояния, в частности, обрушений или отслоений огнезащитного покрытия и нарушений целостности защитного слоя бетона. Таким образом продемонстрировано, что использование огнезащиты «ИГНИС ЛАЙТ» толщиной 26 мм исключает ВПЦ для колонн из бетона класса В30 и обеспечивает высокий уровень предела огнестойкости (не менее 240 мин).



Рис. 3. Внешний вид образцов с огнезащитой плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» (а) и штукатурка «ИГНИС ЛАЙТ» (б) после испытаний

Fig. 3. The post-testing appearance of the fireproof specimens protected with PROZASK FIREPANEL plates (a) and IGNIS LIGHT plaster (b)

Анализ результатов серии из упомянутых пяти огневых экспериментов показал, что при испытаниях образцов из тяжелого бетона класса В30 без добавления ППМФ при заданной нагрузке происходило взрывообразное разрушение бетона с разрушением его поверхностного слоя на глубину от 5 до 50 мм всего за 15 мин огневого воздействия. Несмотря на то, что влажность испытываемой конструкции была более 3 %, после снятия нагрузки с колонны в ходе эксперимента прекратилось хрупкое разрушение бетона. Это объясняется первостепенным влиянием интенсивности напряжений в конструкции из тяжелого бетона на возможность и развитие хрупкого разрушения, и в меньшей степени — влиянием высокой естественной влажности бетона. Следующими экспериментами наглядно показано, что добавление в бетон класса В30 специально подобранной ППМФ «PROZASK IGS» в количестве 1 кг/м³ (вместо рекомендованных в Еврокодах 2 кг/м³) позволило исключить это явление. Сопоставление показаний термомпар, установленных на глубине 20, 30 и 40 мм от поверхности, показало, что уровень прогрева образцов при наличии микрофибры и без ВПЦ был приблизительно в полтора раза ниже, чем у образцов без микрофибры.

В нормативных документах указано, что огневые испытания при воздействии проектных нагрузок могут являться основанием для подготовки заключений по огнестойкости аналогичных железобетонных колонн, подобных испытанным. То есть допускается

обоснованный перенос результатов таких испытаний на другие конструкции и условия, однако для этого должны привлекаться апробированные методики расчетов, в частности, теплотехнических.

Применительно к железобетонным колоннам в качестве таковой может применяться методика и программа численных расчетов температурных полей в двумерной постановке «Огнезащита. Версия 2Т», используемая в [24]. На рис. 4, 5 представлены результаты расчетов для колонны размером 400×400 мм при стандартном режиме огневого воздействия продолжительностью 150 мин при использовании эффективных теплофизических характеристик для тяжелого бетона, заимствованных из авторитетного источника [25]. Кривые на рис. 4 и 5 демонстрируют уровень неравномерности прогрева рассматриваемой несущей конструкции, и это необходимо учитывать в ходе анализа результатов огневых испытаний и при оценке огнестойкости железобетонных колонн.

Такая неравномерность (особенно в начальный период огневого воздействия) обусловлена влиянием влаги на процессы теплопереноса в бетоне, и это упрощенно учитывается использованием эффективных теплофизических характеристик (ТФХ)

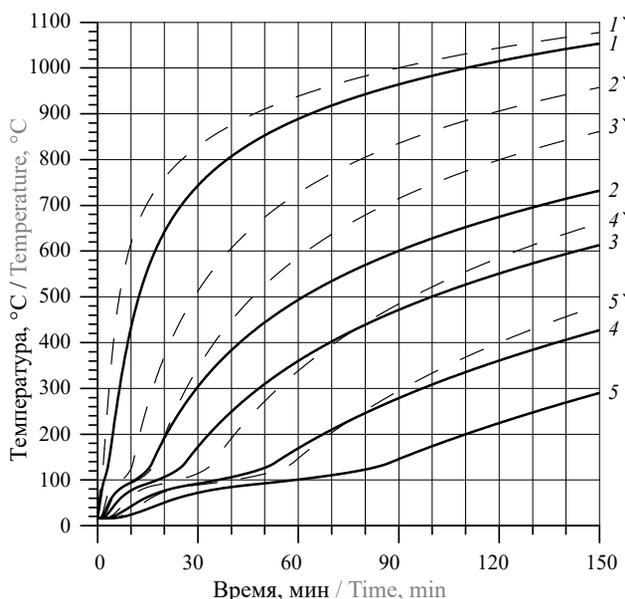


Рис. 4. Зависимости от времени температуры в контрольных точках железобетонной колонны, расположенных на расстоянии от ее поверхности: 0 мм (1, 1'); 20 мм (2, 2'); 30 мм (3, 3'); 50 мм (4, 4'); 70 мм (5, 5') по сечению, перпендикулярному грани колонны (—, 1–5), и по сечению, расположенному к нему под углом 45° (-----, 1'–5')

Fig. 4. The time dependence of temperature at the control points of a reinforced concrete column, located at a distance from the surface: 0 mm (1, 1'); 20 mm (2, 2'); 30 mm (3, 3'); 50 mm (4, 4'); 70 mm (5, 5'), along the section perpendicular to the column facet (—, 1–5) and along the section, located at the angle of 45° (-----, 1'–5')

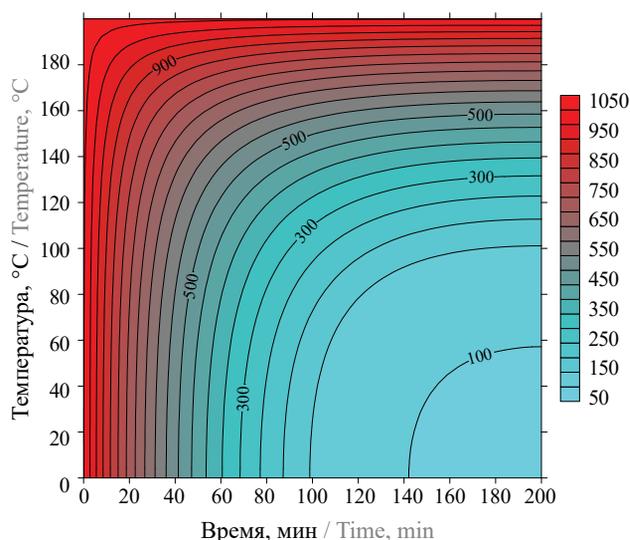


Рис. 5. Температурное поле в железобетонной колонне размером 400×400 мм в момент времени 150 мин

Fig. 5. The temperature in a reinforced concrete column, 400×400 mm at time 150 min

[25]. Проявляется это влияние в виде более низкого уровня температуры (см. рис. 4) по сравнению с вариантами, когда влага должным образом не учитывается, что характерно, например, для температурных кривых, приведенных в СП 468.1325800.2019.

В ходе третьего эксперимента фиксировалось изменение температуры с помощью термопар, установленных на глубине 20, 30, 50 и 70 мм от поверхности колонны в ее центральной части. Получены следующие значения максимальной температуры к моменту окончания огневого воздействия: 300°C (на глубине 20 мм), 165°C (30 мм), 150°C (50 мм), 131°C (70 мм). Сопоставление этих данных с расчетными, представленными на рис. 4, показали значительно меньший уровень экспериментальных температур. Но это не свидетельствует о нецелесообразности использования подобных расчетных данных, поскольку они не противоречат результатам, представленным, например, в СП 468.1325800.2019 и полученным при указанных там значениях ТФХ железобетона (в особенности, при значительной длительности огневого воздействия). Более того, результаты, приведенные на рис. 4, получены при использовании эффективных ТФХ тяжелого бетона [25], учитывающих влияние на них влаги. Предложенный там способ учета такого влияния сказался на характере изменения расчетных кривых (см. рис. 4). Анализ полученной экспериментальной информации подтверждает сложность механизма теплопереноса в железобетонных конструкциях. Результаты измерения температуры с помощью термопар свидетельствуют, что даже использование таких эффективных ТФХ бетона не позволяет учитывать в полной мере все реали-

зуемые процессы, в частности массоперенос влаги в бетоне.

В целом результаты проведенных испытаний при нагрузке колонн из тяжелого бетона с добавлением в него ППФ демонстрируют принципиальную возможность обеспечения высоких пределов огнестойкости (не менее R 120 и R 150) даже без наличия огнезащиты. Это подтверждает и дополняет результаты, полученные ранее, когда аналогичные огневые испытания во ВНИИПО МЧС России подтвердили возможность достижения огнестойкости REI 180 железобетонными плитами с добавлением в них этой же фибры, при этом взрывообразное разрушение бетона не выявлено. Кроме того, полученные в ходе испытаний данные свидетельствуют, что физическая влага внутри бетона приводит к снижению уровня нагрева конструкции.

Анализ результатов огневых экспериментов при использовании конструктивной огнезащиты показал, что исключить взрывообразное разрушение защитного слоя колонн из тяжелого бетона без ППМФ и обеспечить высокий уровень их предела огнестойкости удалось при использовании и однослойной конструктивной огнезащиты плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 12,5 мм (не менее 180 мин), и при использовании огнезащитной штукатурки «ИГНИС ЛАЙТ» толщиной 26 мм (не менее 240 мин).

Результаты, полученные при испытаниях в огневых печах нагруженных колонн, могут являться основой для анализа и последующей подготовки заключений по огнестойкости для других подобных конструкций и при другой продолжительности огневого воздействия на них. Для этого в качестве примера воспользуемся представленными на рис. 6 результатами измерений температуры в эксперименте. Они получены с помощью термопар, установленных дополнительно требованию ГОСТ 30247.1–94 на поверхности колонн (в данном случае под огнезащитной штукатуркой), а также на глубине 25 мм от ее поверхности (кривые 2 и 3 на рис. 6).

В ходе анализа использовалась методика и программа численных расчетов температурных полей в одномерной постановке «Огнезащита. Версия ВУ.2», используемая в [23]. Моделируется одномерная теплопередача в многослойной конструкции из «якобы неразлагающихся» материалов с эффективными ТФХ. «Обнуляется» целый ряд параметров, предусмотренных в программе и позволяющих учитывать физико-химические процессы и процессы массопереноса в материалах при нагреве. Учитывается только изменение от температуры эффективных теплофизических характеристик материалов каждого слоя конструкции.

Проведено прогнозирование изменения температуры в железобетонной колонне на различной глубине от ее поверхности. При расчетах задавалось граничное условие 1-го рода в виде изменения от времени температуры на границе «огнезащита — образец», т.е. под огнезащитной штукатуркой толщиной 26 мм (кривая 2 на рис. 6). Как и ранее, использовались ТФХ тяжелого бетона, заимствованные в [25].

Можно отметить, что влага содержится не только в бетоне, но и в огнезащите, основой которой является цемент и вспученный вермикулит с другими дегидратирующими добавками. В данном случае это штукатурка «ИГНИС ЛАЙТ»; и вид кривой 2 свидетельствует о влиянии влаги на характер нагрева защищаемой конструкции. Наличие результатов термодинамических измерений на границе «огнезащита-конструкция» в подобных случаях освобождает от необходимости непосредственного учета такого влияния и позволяет использовать при расчетах граничное условие 1-го рода.

Предварительно была определена расчетная зависимость изменения от времени температуры для глубины 25 мм, т.е. для глубины установки термопары в образцах. Сопоставление показало хорошее совпадение расчетной и экспериментальной кривых, что подтвердило возможность прогнозирования уровня прогрева колонны с подобной огне-

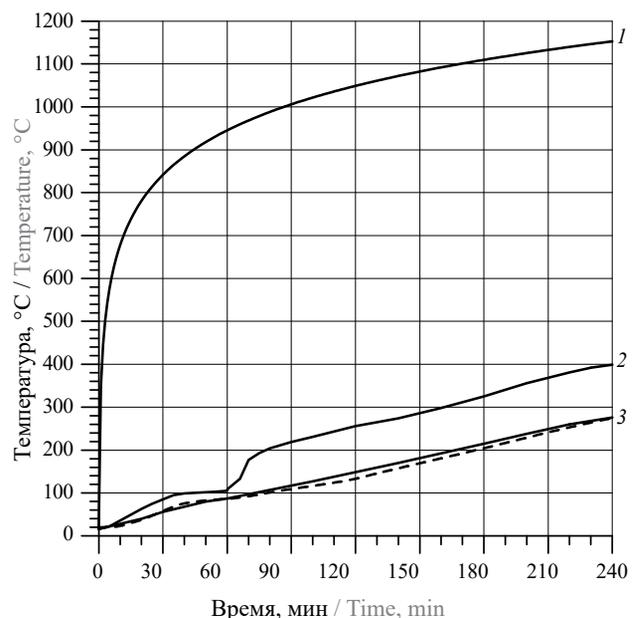


Рис. 6. Режим стандартного пожара (1) и результаты измерения температуры термопарами, расположенными на поверхности колонны под огнезащитной штукатуркой толщиной 26 мм (2) и на глубине 25 мм от поверхности (3); — — — — — расчет для глубины 25 мм

Fig. 6. A standard fire curve (1) and temperature measurements taken by the thermal couples on the surface of the column below the 26-mm layer of the fireproofing plaster (2) and 25 mm below the surface (3); — — — — — the calculation made for 25 mm below the surface

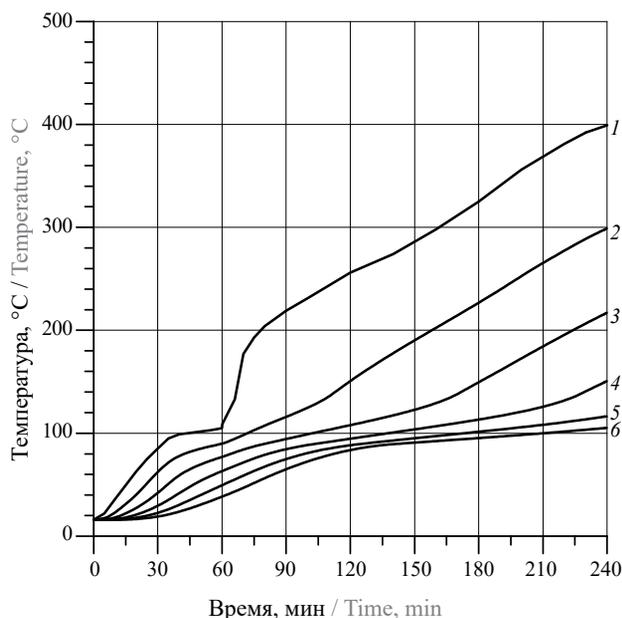


Рис. 7. Зависимости от времени температуры в контрольных точках в центральной зоне железобетонной колонны, расположенных на ее поверхности (1) и на расстоянии от нее, равном: 20 мм (2); 40 мм (3); 60 мм (4); 80 мм (5); 100 мм (6) при толщине огнезащитной штукатурки 26 мм

Fig. 7. The time dependence of temperature at the control points in the central zone of a reinforced concrete column, located on its surface (1), and at a distance from the heated surface: 20 mm (2); 40 mm (3); 60 mm (4); 80 mm (5); 100 mm (6) under 26 mm of plaster

защитой, т.е. возможность переноса (пересчета) полученных результатов на другие подобные конструкции. В ходе такого моделирования были получены зависимости, представленные на рис. 7, для участков железобетонной колонны, расположенных на различном расстоянии от обогреваемой поверхности. Расчеты в одномерной постановке в данном случае позволили более оперативно и в большем объеме (по сравнению с двумерными расчетами) проводить такое моделирование. Однако вполне реально проводить расчеты и в двумерной постановке при использовании граничного условия 1-го рода по всей поверхности колонны. Также следует отметить, что такое хорошее совпадение расчетной и экспериментальной кривых явилось результатом того, что огнезащитное покрытие в ходе испытаний не разрушалось под воздействием деформируемой защищаемой конструкции и не растрескивалось. Возможно предположить, что расчетные теплотехнические данные, полученные с другим огнезащитным составом при испытаниях на колоннах без нагрузки, не дали бы такой сходимости, если бы другой огнезащитный состав при малейшей деформации защищаемой конструкции начал бы разрушаться и оголять железобетонную колонну. Данный тезис подтверждает ранее высказанную необходимость в проведении огневых испытаний любых конструк-

ций (как с огнезащитой, так и без) именно при проектных нагрузках.

Подобным образом проводился теплотехнический анализ теплового состояния железобетонных колонн со смонтированными огнезащитными плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 12,5 мм. В данном случае не проводились измерения температуры на поверхности колонны (дополнительные термопары устанавливались только по ее глубине). Расчет был проведен в двумерной постановке при использовании следующих ТФХ плит «ПРОЗАСК Файерпанель»: коэффициент теплопроводности — 0,391 Вт/(м·К), удельная теплоемкость — 1444 Дж/(м³·К), плотность — 1100 кг/м³. Его результаты представлены на рис. 8.

Сравнение кривых, приведенных на рис. 4 и 8, демонстрирует, насколько снижается уровень нагрева колонны при использовании плит в качестве огнезащиты. Сопоставление результатов расчетов с данными измерения температур термопарами, установленными на различном расстоянии от поверхности, показало, что, наряду с аналогичным характером изменения во времени температур в ходе огневых испытаний колонны с огнезащитой, их уро-

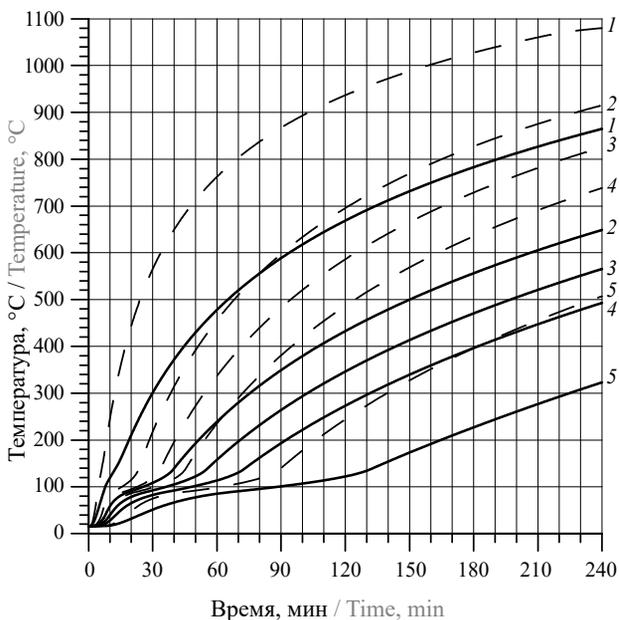


Рис. 8. Зависимости от времени температуры в железобетонной колонне с огнезащитными плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 12,5 мм в контрольных точках, расположенных на расстоянии от ее поверхности: 0 мм (1, 1'); 20 мм (2, 2'); 30 мм (3, 3'); 40 мм (4, 4'); 70 мм (5, 5') по сечению, перпендикулярному грани колонны (—, 1–5), и по сечению, расположенному к нему под углом 45° (-----, 1'–5')

Fig. 8. The time dependence of temperature in a reinforced concrete column, having PROZASK Firepanel plates that are 12.5 mm thick, checked at the control points, located at the following distance from its surface: 0 mm (1, 1'); 20 mm (2, 2'); 30 mm (3, 3'); 40 mm (4, 4'); 70 mm (5, 5') along the section perpendicular to the column facet (—, 1–5) and along the section located at the angle of 45° (-----, 1'–5')

вень оказался ниже, чем представленный на рис. 8. Это является дополнительным свидетельством более значимого влияния влаги на теплопередачу в железобетонной колонне при огневом воздействии, чем то, что прогнозируется при расчетах с эффективными ТФХ бетона, упрощенно учитывающими такое влияние. Таким образом, можно отметить, что подобные расчеты дают результаты с определенным запасом, что вполне допустимо для практики.

Результаты огневых испытаний железобетонных плит перекрытий и их обсуждение

Наряду с огневыми испытаниями колонн, организована и проведена серия огневых экспериментов в ИЦ ПБ ФГБУ ВНИИПО МЧС РФ опытных образцов железобетонных плит перекрытий под действием постоянной статической вертикальной нагрузки 40 кН. Плиты типа 2П30.18–30 размерами 3000 × 1750 × 170 мм, изготовленные по чертежам ИЖ 920 из тяжелого бетона класса В25, в состав которого полипропиленовая фибра не входила. Опытные образцы подвергались одностороннему тепловому воздействию по стандартному температурному режиму. Регистрировалась величина прогиба и температура необогреваемой поверхности плит. В качестве предельного состояния рассматривалась потеря несущей способности конструкции вследствие ее обрушения или возникновения предельных деформаций (предельный прогиб в середине пролета 140 мм, скорость нарастания деформации более 0,51 см/мин).

В ходе испытаний образцов плит фиксировались отдельные характерные хлопки, свидетельствующие о взрывообразном разрушении бетона (с 17-й минуты от начала огневого воздействия с наибольшей интенсивностью приблизительно на 25-й минуте и прекращением хлопков после 35-й минуты). Зафиксировано также увеличение скорости нарастания деформации (достигла 0,5 см/мин) и обрушение опытных образцов плиты на 52–54-й минуте. Осмотр образцов после эксперимента показал, что в центральной зоне плиты имеется обширный участок, на котором отсутствует поверхностный слой бетона (утонение плиты приблизительно на 7 мм). Предел огнестойкости опытных образцов железобетонной плиты был достигнут на 52 и 54-й мин испытания вследствие потери несущей способности конструкции. Таким образом, предел огнестойкости плит, испытанных под воздействием статической нагрузки, равной 40 кН, составляет 53 мин, что соответствует классификации REI 45. Перед началом испытаний внутри плиты монтировались термодатчики на глубине 30 мм от плоскости обогреваемой поверхности, что соответствовало глубине залегания нижнего ряда арматурного

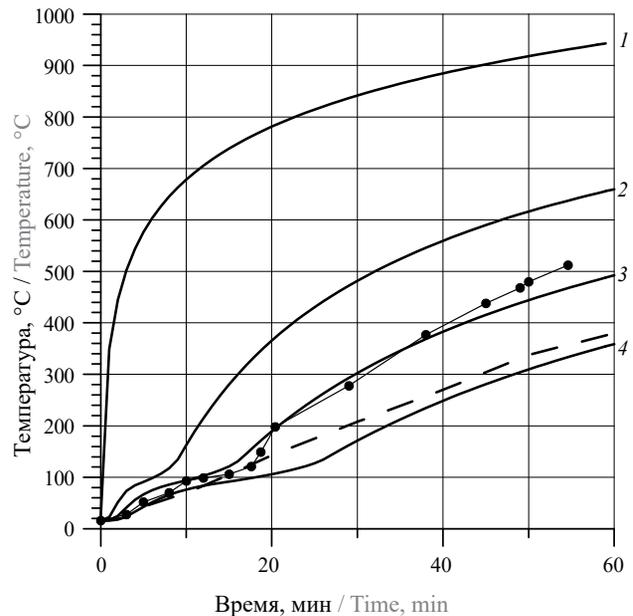


Рис. 9. Режим стандартного пожара (1) и результаты расчетов изменения от времени температуры на глубине от нагреваемой поверхности 10 мм (2), 20 мм (3), 30 мм (4) для испытываемой под нагрузкой железобетонной плиты толщиной 140 мм (без фибры и без огнезащиты); — — — — — рекомендации СП468 для глубины 30 мм от нагреваемой поверхности плиты; —●—●— результаты регистрации температуры при испытании плиты на глубине 30 мм от ее поверхности

Fig. 9. A standard fire curve (1) and calculation results for a temperature change depending on how deep it is from the heated surface: 10 mm (2), 20 mm (3), 30 mm (4) for a 140 mm-thick reinforced concrete slab (that has neither polypropylene microfiber nor fire proofing); — — — — — SP468 recommendations for the 30 mm depth; —●—●— temperature measurements taken in the course of the plate testing at the depth of 30 mm from the surface

каркаса. Результаты регистрации изменения от времени температуры на этой глубине представлены на рис. 9.

В ходе анализа проведена серия теплотехнических расчетов при использовании ТФХ тяжелого бетона [25]. Сравнение характера изменения экспериментальной и расчетных кривых однозначно свидетельствует, что зафиксированный рост градиента и уровня температуры (начиная с 17-й мин) может быть объяснен уменьшением толщины защитного слоя вследствие зафиксированного в эксперименте взрывообразного разрушения бетона. Для подтверждения этого на графике приведены расчетные кривые не только для глубины 30 мм от поверхности, но и для глубины 20 и 10 мм (кривая 3 и 2 на рис. 9). Видно, что экспериментальная кривая, которая вначале практически совпадает с расчетной кривой для глубины 30 мм, в дальнейшем резко приближается и на 20-й мин достигает уровня кривой 3 для глубины 20 мм, а после этого превышает и ее уровень. Но именно с 17-й мин в эксперименте зафиксировано начало взрывообразного разрушения

бетона. Кривая 3, по существу, демонстрирует, какой была бы температура в зоне расположения термодпары в случае уменьшения слоя бетона над ней на 10 мм, т.е. с 30 до 20 мм.

На рис. 9 приведена также расчетная кривая, заимствованная из графиков, рекомендованных в СП 468.1325800.2019 для оценки уровня прогрева конструкций из тяжелого бетона на силикатном заполнителе (для глубины 30 мм от поверхности). Наши расчеты прогрева плиты на указанной глубине показали несколько иной характер изменения температурной кривой по сравнению с рекомендованной СП 468, но значения температуры в обоих случаях достаточно близки. Все это косвенно подтверждает, что при зафиксированном в эксперименте уровне уменьшения толщины образца вследствие ВПЦ должно произойти существенное увеличение уровня прогрева железобетонной плиты, что и было зафиксировано в ходе эксперимента. Как отмечалось, предотвратить это нежелательное явление или значительно снизить вероятность его наступления (проявления) возможно за счет введения в бетонную смесь полипропиленовой фибры, а также использования огнезащиты.

В рамках рассматриваемой серии огневых экспериментов проведено также два огневых эксперимента с образцами плит перекрытий из тяжелого бетона класса В25 без ППФ, имеющих размеры $3000 \times 1750 \times 170$ мм и изготовленных по чертежам ИЖ 920. В первом из них использовалась огнезащитная штукатурка «ИГНИС ЛАЙТ», а во втором — огнезащита плитами «ПРОЗАСК Файерпанель».

На опытные образцы для первого эксперимента наносилась огнезащитная штукатурка «ИГНИС ЛАЙТ» толщиной 25 мм. За время проведения испытаний образцов уровень деформаций был значительно меньше предельных. Отмечено медленное нарастание прогиба от 9,15 на 121-й мин, после которой испытания были остановлены. Максимальная температура, зафиксированная термомпарами на 121-й минуте на поверхности образцов плиты (под огнезащитой), составила 355°C , на глубине 20 мм от поверхности плиты — 330°C , а на необогреваемой поверхности плиты — 78°C . Признаки взрывообразного разрушения защитного слоя бетона (в виде хлопков) не фиксировались. Таким образом, предел огнестойкости плит с огнезащитной штукатуркой «ИГНИС ЛАЙТ» толщиной 25 мм, испытанных под воздействием постоянной статической нагрузки, равной 600 кгс, составил не менее 121 мин, что соответствует классификации REI 120.

Были проведены теплотехнические расчеты, которые показали, что температура на необогреваемой поверхности к моменту окончания огневого воздействия составила 76°C , что совпадает с результатами

термопарных измерений. Расчетное значение температуры на глубине 20 мм от поверхности плиты в данном случае оказались ниже указанного уровня (330°C), что может быть объяснено погрешностями при измерениях. В ходе расчетов использовалось значение коэффициента теплопроводности огнезащитной штукатурки, равное $0,137 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ (определено по ГОСТ 7076–99), а также значения плотности $500 \text{ кг}/\text{м}^3$ и удельной теплоемкости $840 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Но особенно перспективным, как и в случае с колоннами, представляется использование конструктивной огнезащиты плитами «ПРОЗАСК Файерпанель». На опытные образцы для второго эксперимента производился монтаж однослойной конструктивной огнезащиты из плит «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 12,5 мм. Монтаж проводился с использованием гвоздевых анкеров по бетону FISHER FNA II $6 \times 30/30$.

За время проведения испытаний зафиксировано медленное нарастание прогиба до 91-й мин с увеличением скорости нарастания деформации до 0,6 мм/мин с 92 до 121-й мин, после которой испытания были остановлены. Температуры, зафиксированные термомпарами на глубине 25 мм от поверхности плит, составили 240 и 292°C на 121-й мин, а максимальная температура на необогреваемой поверхности плиты — 68°C . Признаки взрывообразного разрушения защитного слоя бетона не фиксировались. Таким образом, предел огнестойкости исследуемых плит с огнезащитой плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 12,5 мм, испытанных под воздействием постоянной статической нагрузки, равной 600 кгс, составил не менее 121 мин, что соответствует классификации REI 120. Доказано, что применение такой огнезащиты (как и рассмотренное ранее применение огнезащитной штукатурки) исключает взрывообразное разрушение бетона и обеспечивает указанный предел огнестойкости со значительным запасом.

Были проведены теплотехнические расчеты, которые показали, что температура на необогреваемой поверхности к моменту окончания огневого воздействия составила 74°C , а на глубине 25 мм — 291°C , что согласуется с результатами термопарных измерений.

Один из огневых экспериментов в рассматриваемой уникальной серии проводился без огнезащиты и без нагрузки, но при огневом воздействии по углеводородному режиму согласно ГОСТ Р ЕН 1363.2–2014. Испытывались образцы железобетонных плит перекрытия типа 2П30.18–30, изготовленные по чертежам серии ИЖ 920 из тяжелого бетона класса В25 с добавлением в бетонную смесь полипропиленовой микрофибры «PROZASK IGS». В опытных образцах устанавливались термомпары на глубине 30 и 50 мм.

На момент окончания огневого воздействия средняя температура на глубине 30 мм от обогреваемой поверхности опытного образца составила 312 и 108 °С на глубине 50 мм. За время проведения испытаний хрупкого (взрывообразного) разрушения бетона зафиксировано не было. Этот эксперимент подтвердил эффективность использования ППФ, позволившего исключить взрывообразное разрушение бетона в условиях большего уровня и более динамичного нагрева железобетонной конструкции, что отличает огневое воздействие по углеводородному режиму по сравнению со стандартным.

Проведенный теплотехнический анализ не ограничился рассмотрением результатов перечисленных огневых экспериментов. В ходе его проведения анализировались также другие заслуживающие внимания результаты, полученные авторами ранее. В частности, был проведен детальный анализ двух огневых испытаний нагруженных железобетонных плит с огнезащитой плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» при стандартном температурном режиме. Испытывались образцы плит типа ПАТ-14А800.1-1 с габаритными размерами 6000 × 2000 × 140 мм. Плиты изготовлены из бетона марки В30 при толщине защитного слоя бетона 30 мм. Использовалась огнезащитная облицовка двумя слоями плит «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной по 12,5 мм.

В ходе первого эксперимента, продолжительность которого составила 91 мин, а статическая нагрузка — 24,53 кН (2500 кгс), регистрировалась температура на необогреваемой поверхности образцов и на границе железобетонная плита — огнезащита, т.е. под двумя слоями плит «ПРОЗАСК Файерпанель». Из-за столь раннего завершения первого испытания указано, что предел огнестойкости исследуемого образца составляет не менее 91 мин, что соответствует классификации REI 90, хотя на этот момент температура на необогреваемой поверхности конструкции и величина прогиба были очень низкими, далекими до критических.

В ходе второго эксперимента при действии такой же статической нагрузки на момент его окончания (185 мин) температура на необогреваемой поверхности железобетонной плиты составляла всего около 60 °С. Более важными оказались данные по ее прогибу, который составил 259 мм при значении предельно допустимого прогиба — 285 мм. Это свидетельствует о том, что рассматриваемая конструктивная огнезащита испытывалась в максимально жестких условиях (при деформациях, близких к предельным). Предел огнестойкости исследуемого образца составил не менее 185 мин, что соответствует классификации REI 180.

В ходе этого эксперимента проводились дополнительные измерения температуры на границе

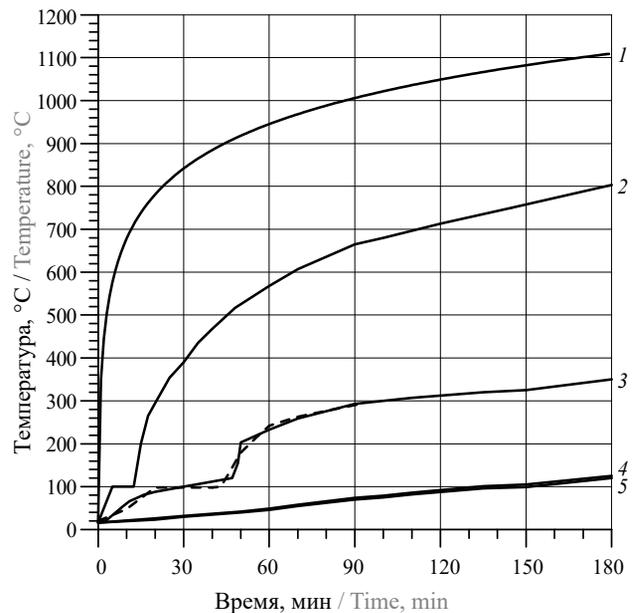


Рис. 10. Режим стандартного пожара (1) и результаты измерения температуры во втором эксперименте: между первой и второй огнезащитной плитой (2); между огнезащитой и железобетонной плитой (3); в железобетонной плите на глубине 50 мм (4) и 80 мм (5); — — — — — между огнезащитой и плитой в первом эксперименте

Fig. 10. A standard fire curve (1) and temperature measurements taken during the 2nd test between the first and second fireproofing plate (2), between the fireproofing and the reinforced concrete slab (3), in a reinforced concrete slab at the depth of 50 mm (4) and 80 mm (5), — — — — — between the fire proofing and the plate during the 1st test

«железобетонная плита — огнезащита», а также между слоями плит «ПРОЗАСК Файерпанель». Регистрировалась также температура в контрольных точках железобетонной плиты, расположенных на расстоянии 50 и 80 мм от ее поверхности. Результаты измерений представлены на рис. 10. На этом рисунке показаны также результаты измерений температуры на границе «железобетонная плита — огнезащита» в первом эксперименте, прекращенном на 91-й минуте. Как видно до этого момента времени результаты измерений в обоих случаях близко совпадают. Измерения отразили влияние влаги, содержащейся в огнезащитных плитах, поскольку их основой является легкий цемент и специальные наполнители.

Анализ результатов таких достаточно дорогих экспериментов позволил получить важную для практики информацию, которая может использоваться для прогнозирования ситуации для других случаев работы конструкций, отличающихся от реализованных при испытаниях, в частности, продолжительностью огневого воздействия, а также другими важными параметрами (прежде всего толщинами огнезащиты).

Не вызывает сомнений возможность использования данных по измерению температуры на границе «огнезащита — образец» под двумя слоями

огнезащитных плит общей толщиной 25 мм. С их помощью проведено прогнозирование изменения температуры в железобетонной плите на различной глубине от ее поверхности. Использовалась упоминаемая ранее методика и программа расчетов температурных полей в конструкциях в одномерной постановке. В ходе теплотехнических расчетов задавалось граничное условие 1-го рода в виде зарегистрированного в эксперименте изменения во времени температуры на границе «огнезащита – образец», т.е. под двумя слоями плит «ПРОЗАСК Файерпанель» (см. рис. 10). В ходе расчетов были получены температурные кривые для сечений железобетонной плиты, расположенных на различном расстоянии от ее поверхности (рис. 11).

Проведено сопоставление температурных зависимостей, полученных расчетным путем и зафиксированных термопарами во втором эксперименте на глубине 50 и 80 мм от обогреваемой поверхности железобетонной плиты (см. рис. 10). Сопоставление этих измерений с расчетными кривыми показало, что для контрольной точки, располагающейся на расстоянии 80 мм от нагреваемой поверхности железобетонной плиты, наблюдается близкое соответствие «расчет — эксперимент», а для контрольной точки, на расстоянии 50 мм, расчетная кривая располагается

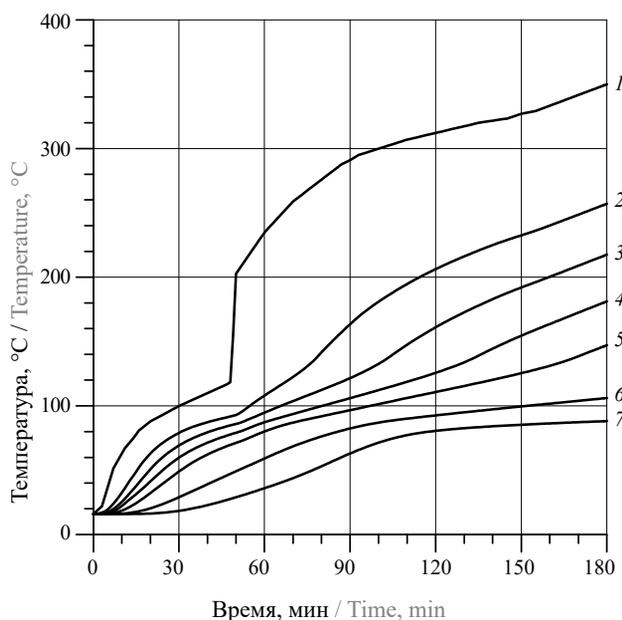


Рис. 11. Зависимости от времени температуры в сечениях железобетонной плиты, расположенных на обогреваемой поверхности (1) и на расстоянии от нее, равном: 20 мм (2); 30 мм (3); 40 мм (4); 50 мм (5); 80 мм (6), а также 140 мм (7), т.е. на ее необогреваемой поверхности (толщина огнезащиты 25 мм)

Fig. 11. Time dependencies of temperature in the concrete slab cross-sections, located on the heated surface (1), and at a distance from the heated surface, equal to 20 mm (2); 30 mm (3); 40 mm (4); 50 mm (5); 80 mm (6), and also 140 mm (7), that is, on its unheated surface (the thickness of the fireproofing is 25 mm)

приблизительно на 20 градусов выше экспериментальной. Полученное соответствие можно признать удовлетворительным. Тем более что отличие значений экспериментальных температур должно составлять не менее 20 градусов с учетом различия глубин расположения термопар. В любом случае можно констатировать, что полученные расчетные значения температур не ниже экспериментальных. Это свидетельствует, что результаты, представленные на рис. 11, можно использовать для прогнозирования уровня прогрева железобетонных конструкций при использовании огнезащиты из плит «ПРОЗАСК Файерпанель» суммарной толщиной 25 мм, что необходимо для оценки пределов огнестойкости таких конструкций. Получено, в частности, что на расстоянии 30 мм от поверхности плиты температура составила порядка 220 °C при времени огневого воздействия 180 мин. Это свидетельствует об избыточности указанной толщины огнезащиты (25 мм) для обеспечения пределов огнестойкости конструкции до REI 180.

Рассмотрена также возможность прогнозирования с помощью расчетов уровня прогрева железобетонных плит при других (меньших) толщинах огнезащиты из плит «ПРОЗАСК Файерпанель». Используя представленный выше подход, реализованный для опытного образца с двумя слоями огнезащитных плит общей толщиной 25 мм, можно было бы таким же образом провести огневые эксперименты и провести подобный теплотехнический анализ для образцов с однослойной огнезащитой плитой толщиной 12,5 или 8 мм. Поскольку такие испытания хоть и готовятся, но результаты еще отсутствуют, попытаемся воспользоваться имеющимися результатами измерения температуры между огнезащитными плитами во втором из рассматриваемых экспериментов (кривая 2 на рис. 10).

Анализ этих результатов показал, что наблюдается (хоть и менее продолжительная, чем для кривой 3) «полка» при температуре порядка 100 °C, что объясняется характерными процессами, происходящими при нагреве во влажосодержащем огнезащитном материале, к числу которых относятся и плиты «ПРОЗАСК Файерпанель». После «полки» на кривой 2 продолжительностью около 8 мин с 14-й мин резко возрастает градиент изменения температуры. Затем он начинает постепенно уменьшаться и далее характер изменения температуры приблизительно «отслеживает» характер изменения температуры в печи по стандартному режиму с постепенным, а не резким сближением обеих кривых. Это свидетельствует, что отсутствует существенное нарушение сплошности огнезащитной облицовки при высокотемпературном нагреве (во всяком случае, в зоне размещения термопары).

Проведено сопоставление ТФХ тяжелого бетона и предполагаемых характеристик огнезащитных плит. Для этого проведена еще одна серия расчетов, которые строились по следующему принципу. Моделировался стандартный режим нагрева на рассматриваемую железобетонную плиту с огнезащитой. Оценивалось, каковым будет отличие в уровне температуры под слоем огнезащиты толщиной 12,5 мм в случае, если под ним окажется не следующий слой огнезащитной плиты, а бетон. Оценки показали, что при замене огнезащиты бетоном температура под ней оказалась существенно ниже, чем при наличии нижележащего слоя огнезащиты. Это объясняется отличием их характеристик, а именно значительно большим уровнем коэффициента теплопроводности (а также температуропроводности) тяжелого бетона по сравнению с огнезащитой, основой которой является легкий (и менее теплопроводный) бетон с наполнителями.

Это свидетельствует о том, что до получения новых результатов огневых экспериментов для образцов с относительно небольшими толщинами огнезащиты, для предварительного анализа можно воспользоваться результатами термодинамических измерений на границах между первой и второй огнезащитными плитами с целью оценки уровня прогрева железобетонной плиты при толщинах огнезащиты менее 25 мм. При этом уровень прогрева этой железобетонной плиты будет определяться с некоторым завышением, т.е. будет проводиться «оценка сверху», что вполне приемлемо (до получения новых экспериментальных результатов) для решения практических задач.

С учетом данного допущения проведены расчеты температурных полей в железобетонной плите с огнезащитой из одной плиты «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 12,5 мм. Расчеты проводились аналогичным путем, с использованием граничного условия 1-го рода, в качестве которого принимались результаты измерения во времени температуры на границе между первой и второй огнезащитными плитами (кривая 2 на рис. 10). В ходе моделирования были получены температурные кривые, представленные на рис. 12.

Расчетные оценки показали, что при толщине огнезащиты 12,5 мм температура на нагреваемой поверхности железобетонной плиты составляет 102 °С, что значительно ниже критической температуры для ограждающей конструкции. Установлено также, что температура 500 °С достигается на расстоянии 20 мм от нагреваемой поверхности плиты за 131 мин, а на глубине 30 мм — за 184 мин. Как известно, плиты «ПРОЗАСК Файерпанель» изготавливаются толщиной не только 12,5 мм, но и 8 мм. С помощью полученных результатов расчетов можно оценивать время достижения различных температур при разных толщинах плит огнезащиты. Для этого следует проводить интерполя-

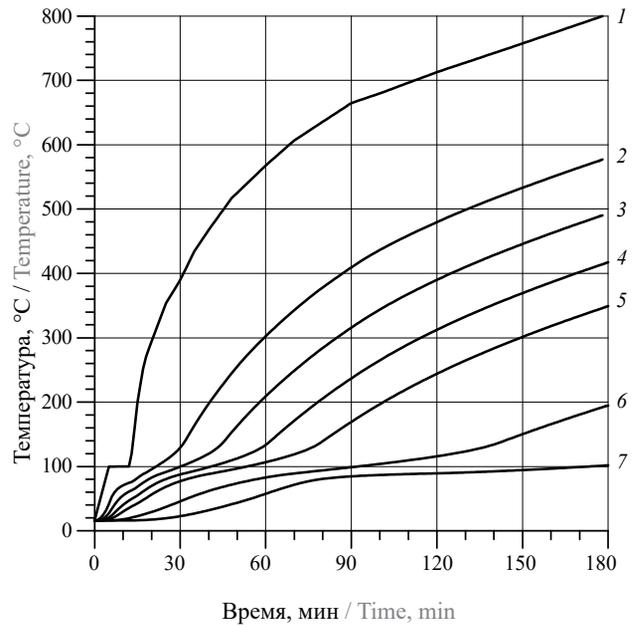


Рис. 12. Зависимости от времени температуры в сечениях железобетонной плиты, расположенных на обогреваемой поверхности (1) и на расстоянии от нее, равном: 20 мм (2); 30 мм (3); 40 мм (4); 50 мм (5); 80 мм (6), а также 140 мм (7), т.е. на ее необогреваемой поверхности (толщина огнезащиты 12,5 мм)

Fig. 12. Time dependencies of temperature in the concrete slab cross-sections, located on the heated surface (1), and at a distance from the heated surface, equal to 20 mm (2); 30 mm (3); 40 mm (4); 50 mm (5); 80 mm (6), and also 140 mm (7), that is, on its unheated surface (the thickness of the fireproofing is 12.5 mm)

цию данных, представленных на рис. 12. При обработке результатов, например, получено, что при толщине огнезащиты 20,5 мм (12,5 + 8 мм) и даже 16 мм (8 + 8 мм) время достижения температуры 500 °С на глубине 30 мм значительно превышает 180 мин. Таким образом, можно констатировать, что проведенный теплотехнический анализ результатов по огневым испытаниям железобетонных плит с огнезащитой плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» общей толщиной 25 мм дал значительный объем важных результатов, которыми можно пользоваться в практике обеспечения огнезащиты и огнестойкости строительных конструкций из железобетона.

Важным обстоятельством является возможность использования предложенного алгоритма анализа для обработки вновь получаемых результатов огневых экспериментов (например, при других толщинах огнезащиты и (или) при ином уровне нагрузок на железобетонную плиту) и уточнения представленных на рис. 11 и 12 результатов прогнозирования. Кроме того, можно констатировать, что подобным образом целесообразно проводить анализ и обработку результатов огневых испытаний не только железобетонных плит, но и других конструкций, а также других видов огнезащиты. Продемонстрирована также целесообразность обеспечения дополнительных термодина-

ных измерений при проведении подобных дорогостоящих огневых испытаний конструкций, в частности, на границе между их наружной поверхностью и огнезащитой.

Для более качественного теплотехнического анализа в дальнейшем необходим более точный учет влияния физической влаги, содержащейся и в огнезащитных плитах, и в теле бетона, на характеристики и прогрев как конструкций из бетона, так и их огнезащиты, поскольку все эти материалы являются влагосодержащими. Как отмечалось, такое влияние проявилось и в ходе рассмотренной серии огневых экспериментов. При расчетах проводился упрощенный учет влаги на теплофизические характеристики тяжелого бетона [25]. Однако при прогреве бетона и других влагосодержащих конструктивных и огнезащитных материалах реализуются сложные процессы тепломассопереноса. Используя сформулированные в [26–28] представления о механизме их протекания, можно дать следующую трактовку характера изменения рассматриваемых при анализе экспериментальных температурных кривых. Относительно быстрый подъем температуры приблизительно до 100 °С, зафиксированный термопарами, объясняется тепловыделением при конденсации пара, образовавшегося при нагреве влагосодержащих материалов и переместившейся по порам в бетоне воды в более холодную зону конструкции. Такая конденсация и концентрация влаги в менее прогретых зонах колонны могла стать причиной появления влаги в нижней части печи, что было отмечено в ходе третьего огневого эксперимента для колонн. Наличие плато (или «полок») на уровне 100 °С, как отмечалось ранее, объясняется кипением конденсата после нагрева соответствующей зоны конструкции до такой температуры.

Предпринимались попытки создания методик и программ теплотехнических расчетов, на основе математической модели, учитывающей указанную совокупность сложных процессов тепломассопереноса во влагосодержащих материалах [26–28], но они носили, по существу, характер научных изысканий и не позволили пока создать приемлемый для инженерной практики инструмент. В связи с этим на данный момент проведение предложенным образом моделирования прогрева железобетонных конструкций является вполне оправданным.

Естественно, к числу задач, решение которых еще предстоит найти, относится совершенствование статических расчетов огнестойкости железобетонных конструкций. И в этой связи одним из важных вопросов является определение неизвестных до настоящего времени коэффициентов условий работы γ_{bt} различных классов бетонов при высоких температурах. Их необходимо определять в дальнейшем как для конкретных бетонов без фибры, в том числе и для

тех, рецептуры которых содержат полипропиленовую микрофибру со специальными добавками, компенсирующими некоторое снижение прочности вследствие наличия ППМФ. Это позволит в дальнейшем более точно оценивать условия и критерии разрушения (в том числе и ВПЦ) несущих железобетонных конструкций за счет повышения точности тепло-статических расчетов огнестойкости. Необходимо также уточнение теплофизических характеристик всех возможных огнезащитных материалов, которые представляются наиболее эффективным средством защиты от пожара рассматриваемых конструкций.

В целом можно констатировать, что результаты исследований, представленные в статье, являются значимой составной частью решения актуальной проблемы обеспечения огнестойкости ответственных несущих строительных конструкций из железобетона. Продемонстрировано также, что для решения задачи по предотвращению взрывообразной потери целостности бетона и повышения огнестойкости конструкций иными (чем указанные в статье) средствами, необходимо проведение и анализ результатов соответствующего комплекса исследований.

Выводы

Проведен детальный анализ результатов серии испытаний в огневой печи образцов железобетонных колонн и плит перекрытий под нагрузкой. В ходе анализа:

1. Получены дополнительные свидетельства эффективности введения в состав бетона полипропиленовой микрофибры как средства для предотвращения взрывообразной потери целостности нагруженных колонн и плит из тяжелого бетона и обеспечения их требуемых пределов огнестойкости конструкций.

2. Продемонстрирована роль и особенности использования конструктивной огнезащиты в виде плит «ПРОЗАСК Файерпанель» и штукатурки «ИГНИС ЛАЙТ» как средства для предотвращения ВПЦ и обеспечения высоких пределов огнестойкости железобетонных конструкций.

3. Обоснована целесообразность и эффективность проведения теплотехнических расчетов по апробированным методикам и программам в одномерной и в двумерной постановке в качестве инструмента для анализа результатов проведенных испытаний.

Продемонстрированы возможности теплотехнических расчетов (моделирования) для пересчета результатов измерений при экспериментах на другие условия эксплуатации аналогичных конструкций, что необходимо для принятия обоснованных технических решений по огнестойкости железобетонных конструкций, подобных испытанным, а также по их огнезащите.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мешалкин Е.А. Исследование процесса разрушения бетонных изделий при пожаре с учетом их взрывообразной потери целостности : дис. ... канд. техн. наук. М., 1979. 216 с.
2. McNamee R.J., Bostrom L. Fire spalling—the moisture effect // 1st International workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure—From Real Life Experiences and Practical Applications to Lab-scale Investigations and Numerical Modelling. MFPA Institute Leipzig, Germany. September 3–5, 2009. 2009. Pp. 120–129.
3. Jansson R. Fire spalling of concrete: Theoretical and experimental studies : Doctoral Thesis in Concrete Structures: KTH Royal Institute of Technology. Stockholm : Trita-BKN, Bulletin, 2013. 117 p.
4. Голованов В.И., Пехотиков А.В., Новиков Н.С., Павлов В.В., Кузнецова Е.В. Огнестойкость железобетонных туннелей подземных сооружений с полипропиленовой фиброй // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 5. С. 60–70. DOI: 10.18.18322/PVB.2019.28.05.60-70
5. Новиков Н.С. Огнестойкость конструкций из фибробетона для автодорожных тоннелей и метрополитена : дис. ... канд. техн. наук. М., 2019. 167 с.
6. Dehn F., Werther N., Knitl J. Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig // Beton- und Stahlbetonbau, 2006. Nr. 101. Heft 8. Pp. 631–635. DOI: 10.1002/best200608186
7. 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
8. 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 Assambley. Dubrovnik, Croatia, 2015. Pp. 1–10.
9. Chiarini M., Lunardi G., Cassani G., Bellocchio A., Frandino M. High speed railway Milan — Genoa, implementation of coupled analysis to estimate thermo-mechanical effects produced by the fire on the TBM segmental lining // Proceedings of the World Tunnel Congress 2017 — Surface challenges — Underground solutions. Bergen, Norway, 2017. Pp. 1–10.
10. Liu J.-C., Tan K.H., Yao Y. A new perspective on nature of fire-induced spalling in concrete // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 184. Pp. 581–590. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.204
11. Голованов В.И., Новиков Н.С., Павлов В.В., Антонов С.П. Прочностные характеристики фибробетона для тоннельных сооружений в условиях высоких температур // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращения, ликвидация. 2017. № 2. С. 65–69. DOI: 10.25257/FE.2017.2.63-67
12. Антонов С.П. Технологии предотвращения взрывообразного разрушения бетонов при огневом воздействии // Пожарная безопасность/ Специализированный каталог. 2021. С. 56–61.
13. Кузнецова И.С., Рябенкова В.Г., Корнюшина М.П., Саврасова И.П., Востров М.С. Полипропиленовая фибра — эффективный способ борьбы со взрывообразным разрушением бетона при пожаре // Строительные материалы. 2018. № 11. С. 15–20. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-765-11-15-20
14. Khoury G.A., Willoughby B. Polypropylene fibres in heated concrete. Part 1: Pressure relief mechanisms and concrete // Magazine of Concrete Research. 2008. Vol. 60. Issue 2. Pp. 125–136. DOI: 10.1680/macr.2008.60.2.125
15. Khoury G.A. Polypropylene fibres in heated concrete. Part 2: Pressure relief mechanisms and modeling criteria // Magazine of Concrete Research, 2008. Vol. 60. Issue 3. Pp. 189–204. DOI: 10.1680/MACR.2007.00042
16. Shihada S. Effect of polypropylene fibers on concrete fire resistance // Journal of Civil Engineering and Management. 2011. Vol. 17. Issue 2. Pp. 259–264. DOI: 10.3846/13923730.2011.574454
17. Serrano R., Cobo A., Prieto M.I., Gonzales M. Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers. Construction and Building Materials. 2016. Vol. 122. Pp. 302–309. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.055
18. Пухаренко Ю.В., Кострикин М.П. Стойкость фибробетона к высокотемпературному воздействию // Строительные материалы и технологии. 2020. № 2 (88). С. 96–106. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-96-106
19. Gravit M., Antonov S., Nedryshkin O. Research features of tunnel linings with innovations fireproof panels // Procedia Engineering. 2016. Vol. 165. Pp. 1651–1657. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.906
20. Ройтман В.М., Габдулин Р.Ш. Обеспечение стойкости железобетонных конструкций против взрывообразного разрушения при пожаре с помощью тонкослойных огнезащитных вспучивающихся покрытий // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2013. № 2. С. 11–16. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22413522>
21. Мешалкин Е.А. Антонов С.П. Об избыточности требований пожарной безопасности // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2019. № 2 (39). С. 26–29.
22. Антонов С.П. Российское противопожарное законодательство и требования по обеспечению огнестойкости железобетонных строительных конструкций // Технологии бетонов. 2018.

- № 11–12. С. 52–56. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36403099>
23. *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. 23–42. DOI: 10.18322/PVB.2021.31.01.23-42
 24. *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.
 25. *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.
 26. *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
 27. *Гаращенко А.Н., Страхов В.Л., Рудзинский В.П., Казиев М.М.* Расчет огнезащиты из материалов на основе минеральных вяжущих (на примере покрытия СОТЕРМ-1 м) // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2005. Т. 14. № 4. С. 17–22. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12601838>
 28. *Страхов В.Л., Мельников А.С., Каледин В.О.* Математическое моделирование высокотемпературного тепломассопереноса в бетонных конструкциях // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2009. Т. 18. № 6. С. 29–36. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12837161>

REFERENCES

1. Meshalkin E.A. *Investigation of the process of destruction of concrete products in a fire, taking into account their explosive loss of integrity : Dissertation of the Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 1979; 216. (rus).
2. McNamee R.J., Bostrom L. Fire spalling-the moisture effect. *1st International workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure-From Real Life Experiences and Practical Applications to Lab-scale Investigations and Numerical Modelling*. MFPA Institute Leipzig, Germany. September 3-5, 2009; 120-129.
3. Jansson R. *Fire spalling of concrete: Theoretical and experimental studies : Doctoral Thesis in Concrete Structures: KTH Royal Institute of Technology*. Stockholm, Trita-BKN, Bulletin, 2013; 117.
4. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Novikov N.S., Pavlov V.V., Kuznetsova E.V. Fire resistance of reinforced concrete tubings of underground structures with polypropylene fiber. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(5):60-70. DOI: 10.18.18322/PVB.2019.28.05.60-70 (rus).
5. Noikov N.S. *Fire resistance of fiber concrete constructions for auto roads tunnels and underground : Dis. Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2019; 167. (rus).
6. Dehn F., Werther N., Knitl J. Großbrandversuche für den city-tunnel Leipzig. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2006; 101(8):631-635. DOI: 10.1002/best200608186 (ger).
7. Maraveas Ch., Vrakas A.A. Design of concrete tunnel linings for fire safety. *Structural Engineering International*. 2014; 24(3):319-329. DOI: 10.2749/101686614X13830790993041
8. Annerel E., Boch K., Lemaire T. Passive fire protection ends life safety. *Topic Safety of Tunnel and Underground Structure. "SEE Tunnel: Promoting in SEE Region" ITA WTS 2015 Congress and 41st General Assambly*. Dubrovnik, Croatia, 2015; 1-10.
9. Chiarini M., Lunardi G., Cassani G., Bellocchio A., Frandino M. High speed railway Milan — Genoa, implementation of coupled analysis to estimate thermo-mechanical effects produced by the fire on the TBM segmental lining. *Proceedings of the World Tunnel Congress 2017 — Surface challenges — Underground solutions*. Bergen, Norway, 2017; 1-10.
10. Liu J-C., Tan K.H., Yao Y. A new perspective on nature of fire-induced spalling in concrete. *Construction and Building Materials*. 2018; 184:581-590. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.204
11. Golovanov V.I., Novikov N.S., Pavlov V.V., Antonov S.P. Strength characteristics of fiber reinforced concrete for tunnel structures in high temperatures. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2017; 2:65-69. DOI: 10.25257/FE.2017.2.63-67 (rus).
12. Antonov S.P. Technologies of concrete spalling preventing under fire action. *Fire Safety. Special Catalog*, 2021; 56-61.
13. Kuznetsova I.S., Ryabchenkova V.G., Korniyushina M.P., Savrasova I.P., Vostrov M.S. Polypropylene fiber is an effective way to combat explosive destruction of concrete in case of fire. *Stroitel'nye Materialy/Construction Materials*. 2018; 11:15-20. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-765-11-15-20 (rus).
14. Khoury G.A., Willoughby B. Polypropylene fibres in heated concrete. Part 1: Pressure relief mechanisms

- and concrete. *Magazine of Concrete Research*. 2008; 60(2):125-136. DOI: 10.1680/mac.2008.60.2.125
15. Khoury G.A. Polypropylene fibres in heated concrete. Part 2: Pressure relief mechanisms and modeling criteria. *Magazine of Concrete Research*. 2008; 60(3):18-204. DOI: 10.1680/MACR.2007.00042
 16. Shihada S. Effect of polypropylene fibers on concrete fire resistance. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2011; 17(2):259-264. DOI: 10.3846/13923730.2011.574454
 17. Serrano R., Cobo A., Prieto M.I., Gonzales M. Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers. *Construction and Building Materials*. 2016; 122:302-309. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.055
 18. Pukharensko Yu.V., Kostrikin M.P. Resistance of fiber-reinforced concrete to high-temperatures. *Building and reconstruction*. 2020; 2(88):96-106. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-96-106 (rus).
 19. Gravit M., Antonov S., Nedryshkin O. Research features of tunnel linings with innovations fireproof panels. *Procedia Engineering*. 2016; 165:1651-1657. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.906
 20. Rojzman V.M., Gabdulin R.Sh. Ensuring of the reinforced concrete constructions durability against spalling under fire by thin layer intumescent fire retardant coating. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2013; 2:11-16. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22413522> (rus).
 21. Meshalkin E.A., Antonov S.P. On redundancy of fire safety requirements. *Natural and technogenic risks. Maintenance safety*. 2019; 2(39):26-29. (rus).
 22. Antonov S.P. Russian fire legislation and requirements for fire resistance of reinforced concrete building structures. *Technologies of concrete*. 2018; 11-12:52-56. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36403099> (rus).
 23. 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. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(1):23-42. DOI: 10.18322/PVB.2021.31.01.01.23-42 (rus).
 24. Strakhov V.L., Garashchenko A.N., 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 avaporation — condensation. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2001; 10(4):9-11. (rus).
 25. 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, VI scientifique conference. Moscow, November 14-16, 2018*. Moscow, MGSU, 2018; 207-212. (rus).
 26. 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
 27. Garashchenko A.N., Strakhov V.L., Rudzinskii V.P., Kaziev M.M. Calculation of fire protection from materials based on mineral binders (for example, SOTERM-1 m coating). *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2005; 14(4):17-22. (rus).
 28. Strakhov V.L., Melnikov A.S., Kaledin V.O. Mathematical modeling of high-temperature heat and mass transfer in concrete structures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2009; 18(6):29-36. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12837161> (rus).

Поступила 28.02.2022, после доработки 08.04.2022;
принята к публикации 13.05.2022

Received February 28, 2022; Received in revised form April 8, 2022;
Accepted May 13, 2022

Информация об авторах

ГАРАЩЕНКО Анатолий Никитович, д-р техн. наук, доцент, директор по науке, ООО «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, 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

ДАНИЛОВ Андрей Игоревич, генеральный директор, ООО «Центр исследований опасных факторов пожаров»,

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, 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

Andrey I. DANILOV, Director, Research Center of Hazardous Fire Factors, LLC, Marata St., 51, Saint-Petersburg, 191002,

Россия, 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Марата, 51; ORCID: 0000-0002-9162-7073; e-mail: danilov@ciofp.ru

ПАВЛОВ Владимир Валерьевич, начальник сектора огнестойкости конструкций, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 760824; ORCID: 0000-0002-0629-5765; e-mail: vv.pavlov@mail.ru

НОВИКОВ Николай Сергеевич, научный сотрудник сектора огнестойкости конструкций, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 942702; ORCID: 0000-0002-2945-663X; e-mail: agps.nick182@mail.com

Вклад авторов:

Гаращенко А.Н. — научное руководство, участие в 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.

Данилов А.И. — участие в разработке концепции исследования, организация и участие в проведении огневых экспериментов, анализ экспериментальной информации, участие в доработке текста.

Павлов В.В. — руководство, обеспечение и участие в проведении огневых экспериментов, анализ экспериментальной информации.

Новиков Н.С. — участие в обеспечении и проведении огневых экспериментов, участие в анализе экспериментальной информации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9162-7073; e-mail: danilov@ciofp.ru

Vladimir V. PAVLOV, Head of Sector, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 760824; ORCID: 0000-0002-0629-5765; e-mail: vv.pavlov@mail.ru

Nikolay S. NOVIKOV, Resercher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 942702; ORCID: 0000-0002-2945-663X; e-mail: agps.nick182@mail.com

Contribution of the authors:

Anatoliy N. Garashchenko — scientific guidance, participation in the analysis of experimental information, conducting and analyzing the results of text calculations, describing the initial, final results of the survey.

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

Andrey I. Danilov — participation in the conceptual research, organization and conduct of firing experiments, analysis of experimental information, revision of the text.

Vladimir V. Pavlov — leadership, support and participation in conducting fire experiments, analysis of experimental information.

Nikolay S. Novikov — participation in the support and preparation conceptual research, participation in the analysis of experimental information.

The authors declare no conflicts of interests.