

Прогнозирование огнестойкости железобетонных конструкций с полипропиленовой микрофиброй или огнезащитой

Сергей Порфирьевич Антонов^{1, 2}, Анатолий Никитович Гаращенко¹✉, Владимир Ильич Голованов³, Николай Сергеевич Новиков³

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 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. Рассмотрены варианты и особенности решения актуальной задачи по предотвращению взрывообразной потери целостности (ВПЦ) бетона и обеспечению требуемой огнестойкости железобетонных конструкций (ЖБК) за счет использования полипропиленовой микрофибры (ППМФ) в составе бетона или средств конструктивной огнезащиты.

Цель и задачи. Обоснование выбора эффективных способов предотвращения взрывообразной потери целостности бетона и обеспечения заданной огнестойкости конструкций. Организация и проведение огневых испытаний железобетонных колонн и плит перекрытия под нагрузкой при наличии и отсутствии ППМФ в составе бетона, а также при использовании конструктивной огнезащиты. Анализ результатов и вариантов их практического использования.

Методы. Оценка огнестойкости колонн и плит проводилась в ходе испытаний в огневой печи образцов под нагрузкой с дополнительными термометрическими измерениями для их использования в ходе теплотехнического анализа. Он проводился с использованием апробированных несложных методик и программ расчетов температурных полей в конструкциях. Предложен порядок определения теплофизических характеристик материалов конструктивной огнезащиты в рабочем диапазоне температур.

Результаты. Представлены и обобщены результаты уникальных огневых экспериментов образцов несущих колонн и плит под нагрузкой. Продемонстрирована эффективность использования ППМФ, а также роль огнезащиты в предотвращении ВПЦ конструкций и повышении их огнестойкости и огнесохранности при воздействии по стандартному и углеводородному режиму. Представлены примеры эффективного использования конструктивной огнезащиты в виде плит «ПРОЗАСК Файерпанель» и штукатурки «ИГНИС ЛАЙТ» для обеспечения высоких пределов огнестойкости ЖБК. В ходе новой серии испытаний железобетонных плит, впервые проведенных при углеводородном режиме воздействия, установлено, что при использовании ППМФ время достижения образцами предельного состояния превышает 120 мин, а при использовании конструктивной огнезащиты — 240 мин. Показана возможность пересчета (в том числе снижения) толщин огнезащиты, используемых при испытаниях. Это обосновывается теплотехническими расчетами, для которых предусмотрено получение новых данных по теплофизическим характеристикам материалов огнезащиты в рабочем диапазоне температур.

Выводы. Предложена методология комплексных исследований, проведен значительный объем уникальных огневых и прочих экспериментов с теплотехническим анализом их результатов. Получен значительный объем важной информации, необходимой для предотвращения взрывообразного разрушения и обеспечения заданной огнестойкости несущих ЖБК. Представлены рекомендации по дальнейшему проведению экспериментальных и теоретических исследований и использованию полученных результатов при проектировании и изготовлении железобетонных конструкций, средств их огнезащиты, а также при корректировке нормативных документов по ЖБК.

Ключевые слова: конструктивная огнезащита; предел огнестойкости; стандартный режим воздействия; углеводородный режим воздействия; теплотехнические расчеты; статическая нагрузка; теплофизические характеристики

Для цитирования: Антонов С.П., Гаращенко А.Н., Голованов В.И., Новиков Н.С. Прогнозирование огнестойкости железобетонных конструкций с полипропиленовой микрофиброй или огнезащитой // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 6. С. 56–68. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.56-68

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

Prediction of fire resistance of reinforced concrete structures with polypropylene microfibre or fire protection

Sergey P. Antonov^{1, 2}, Anatoliy N. Garashchenko¹ ✉, Vladimir I. Golovanov³, Nikolay S. Novikov³

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 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 options and features of solving the actual problem of preventing explosive loss of integrity of concrete and ensuring the required fire resistance of reinforced concrete structures (RCS) through the use of polypropylene microfibre (PPMF) in concrete or structural fire protection products are considered.

Goal and objectives. Justification of the choice of effective methods to prevent explosive loss of concrete integrity and ensure the given fire resistance of structures. Organization and carrying out of fire tests of reinforced concrete columns and floor slabs under load in the presence and absence of PPMF in the concrete composition, as well as with the use of structural fire protection. Analysis of the results and variants of their practical use.

Methods. The fire resistance of columns and slabs was assessed by testing specimens under load in a fired furnace with additional thermocouple measurements. It was carried out using approved simple methods and programmes for calculating temperature fields in structures. The procedure for determining the thermophysical characteristics of structural fire protection materials in the operating temperature range was proposed.

Results. The results of unique fire experiments of load-bearing columns and slabs are presented and summarized. The effectiveness of the use of PPMF is demonstrated, as well as the role of fire protection preventing loss of integrity in structures and increasing their fire resistance and fire protection under standard and hydrocarbon exposure. Examples of the effective use of structural fire protection in the form of "PROZASK Firepanel" slabs and "IGNIS LIGHT" plaster are presented to ensure high fire resistance limits of concrete. In the course of a new series of reinforced concrete slabs tests, for the first time carried out under hydrocarbon mode of exposure, it was found that when using PPMF, the time of reaching the limit state of specimens exceeds 120 minutes, and when using structural fire protection – 240 minutes. The possibility of recalculation (including reduction) of fire protection thicknesses used in the test is shown. This is substantiated by thermal engineering calculations, for which it is provided to obtain new data on the thermophysical characteristics of fire protection materials in the operating temperature range.

Conclusions. The methodology of complex researches is proposed, a considerable volume of unique fire and other experiments with thermotechnical analysis of their results is carried out. A considerable amount of important information necessary to prevent explosive failure and ensure the specified fire resistance of load-bearing reinforced concrete structures was obtained. Recommendations for further experimental and theoretical studies are presented. The use of the obtained results in the design of reinforced concrete structures, means of their fire protection, as well as in the adjustment of normative documents on reinforced concrete structures are presented.

Keywords: structural fire protection; fire resistance limit; standard mode of exposure; hydrocarbon mode of exposure; thermotechnical calculations; static load; thermophysical characteristics

For citation: Antonov S.P., Garashchenko A.N., Golovanov V.I., Novikov N.S. Prediction of fire resistance of reinforced concrete structures with polypropylene microfibre or fire protection. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(6):56-68. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.56-68 (rus).

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

Введение

В настоящее время в Российской Федерации интенсивно ведется строительство ответственных сооружений, к которым относятся автодорожные и прочие тоннели и различные тоннельные сооружения, подземные паркинги, высотные здания, эстакады и т.д. При строительстве должны применяться железобетонные конструкции (ЖБК) с задаваемыми параметрами огнестойкости. Кроме этого, для таких конструкций необходимо обеспечить возможность сохранения (восстановления) уровня их огнестойкости после огневого воздействия (или даже ее уве-

личения) за минимальное время и с наименьшими затратами. Рациональное решение задач обеспечения огнестойкости ЖБК невозможно без проведения целого комплекса работ, которые целесообразно проводить по определенной методологии, предусматривающей в обязательном порядке как экспериментальные, так и теоретические исследования.

При строительстве указанных сооружений используются, как правило, высокопрочные (тяжелые) бетоны класса от В25 и выше, а эксплуатация часто осуществляется в условиях повышенной влажности. Изучение последствий огневого воздействия при пожарах, про-

водящееся за рубежом¹ [1–8] и в нашей стране [9–13], явно свидетельствует о том, что во многих случаях происходит снижение огнестойкости несущих ЖБК по причине взрывообразной потери целостности бетона (ВПЦ) или другими словами хрупкого (взрывообразного) разрушения слоя бетона (иногда до 50 мм¹ [8, 12]) с оголением арматурного каркаса конструкций.

Большинство исследователей придерживаются мнения, что на вероятность ВПЦ влияет целый ряд факторов. В их числе повышенная влажность, уровень действующих напряжений и деформаций, режим огневого воздействия, уровень нагрева бетона, рецептура бетона. Имеется понимание, что повышенная влажность в значительной степени способствует возрастанию до критического уровня внутренних напряжений в ЖБК в условиях огневого воздействия на них [8, 10–12]. В связи с этим в качестве средства защиты бетонов от ВПЦ за рубежом [3–8, 14–17], а в последнее время и в нашей стране [9–13, 18] практикуется использование полипропиленовой микрофибры (ППМФ). Ее введение в матрицу бетона обеспечивает увеличение пористости за счет формирования микроканалов в прогретых слоях бетона, что позволяет избежать роста давления в порах до критического уровня. Этим снижается вероятность взрывообразной потери целостности (ВПЦ) конструкций из тяжелых бетонов. В связи с этим использование ПМФ рекомендовано не только зарубежными, но и, наконец, отечественными нормативами². Налицо также преимущества при изготовлении новых железобетонных конструкций ЖБК по такой технологии, что подтверждается зарубежными¹ [3, 4, 8, 14–17] и отечественными публикациями [10–13, 18].

Другим и очевидным способом снижения вероятности ВПЦ, повышения огнестойкости и огнестойкости ЖБК является использование средств огнезащиты¹ [3, 4, 8, 12–21]. Использование вспучивающихся покрытий [19, 20] представляется наименее эффективным по сравнению с конструктивной огнезащитой в виде плит и штукатурок. Это связано с неспособностью ВОЗП обеспечивать стойкость пенококса в течение длительного огневого воздействия и за счет этого обеспечивать высокие пределы огнестойкости конструкций, а также из-за недостаточной адгезии таких покрытий к бетону при нагреве.

Понятно, что для нанесения (монтажа) конструктивной огнезащиты требуются значительные затраты времени и средств. Тем не менее, безус-

ловно, возможны ситуации, когда ее применение необходимо, но только в случае, если это подкрепляется объективными данными. В отчете¹ содержатся рекомендации о том, что огнезащита должна обеспечить снижение уровня нагрева до 380 °С на поверхности ЖБК и до 550 °С на стальной арматуре. Для некоторых объектов и марок бетонов, склонных к выкрашиванию, для обеспечения огнестойкости конструкций после пожара рекомендуется даже снижение до 180–220 °С на их поверхности.

Наряду с наличием публикаций о преимуществах применения конструктивной огнезащиты, имеющих рекламный характер, следует отметить принципиальную возможность того, что полипропиленовая микрофибра не во всех случаях исключает ВПЦ бетонов¹ [8]. Особенно это касается поведения ЖБК при предельных режимах огневого воздействия газовой среды с температурой до 1200–1350 °С. Это тоннельные кривые RWS и HCinc, которые в нашей стране пока не регламентируются. В таких случаях задачу повышения огнестойкости ЖБК целесообразно решать с помощью конструктивной огнезащиты, но с доказательством ее эффективности в рассматриваемых условиях. Для этого необходимы соответствующие исследования ЖБК с огнезащитой и объективный анализ их результатов.

Можно отметить, что исследование эффективности и характеристик материалов конструктивной огнезащиты представляет несомненный научный и практический интерес не только для конструкций из железобетона. В нашем же случае они позволяют получить объективную информацию для сопоставительного технико-экономического анализа возможных вариантов и выбора наиболее рационального способа обеспечения требуемой огнестойкости ЖБК.

Как отмечалось, и у нас, и за рубежом отсутствуют обоснованные сомнения в том, что вероятность взрывообразного разрушения и в целом огнестойкость и огнестойкость железобетонных конструкций зависят от уровня действующих напряжений и деформаций. Поэтому в российском (как и в зарубежном) законодательстве предусмотрено обязательное определение уровня огнестойкости несущих строительных конструкций при действии статических эксплуатационных нагрузок. Однако до настоящего времени в нашей стране объем таких огневых экспериментов для ЖБК был явно недостаточен, несмотря на то что получение подобной информации чрезвычайно востребовано. Кроме того, в большинстве случаев не проводился на должном уровне анализ и обобщение результатов даже проведенных экспериментов, хотя он необходим для их обоснованного использования при проектировании зданий и сооружений на этапе строительства

¹ Structural Fire Protection For Road Tunnels. ITA REPORT n.18 // The International Tunnelling and Underground Space Association. ITA Working Group 6, April 2017. Longrine, Avignon. France. 46 p. URL: www.longrine.fr

² СП 468.1325800.2019. Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнестойкости. п. 9.16.

или реконструкции. Для проведения такого анализа и последующего проектирования конструкций необходимо в большей мере применять предусмотренные нормативными документами расчетно-аналитические методы оценки их огнестойкости. Требуется выбор надежных методик расчетов, а также определение (уточнение) характеристик материалов, необходимых для их проведения. Это прочностные характеристики для статических расчетов огнестойкости и теплофизические характеристики (ТФХ) для теплотехнических.

Было установлено, что такая неармирующая добавка, как ППМФ, естественно, может понизить прочностные свойства бетона [10–13]. Для новых рецептур бетонов с полипропиленовой микрофиброй их определение актуально, тем более, если такие характеристики будут получены и при повышенных температурах. Но следует отметить, что информация о прочностных характеристиках недостаточна даже для существующих марок бетонов (без ППМФ). В нашем случае их определение необходимо, в том числе, для подтверждения эффективности проводимых мероприятий по подбору композиции бетонной матрицы для компенсации возможного падения прочности бетонов при добавлении в их состав полипропиленовой микрофибры.

Сложность и важность всех аспектов обозначенной проблемы обусловила, как отмечено в [21], необходимость проведения целого комплекса исследований по схеме «материал – технология – экспериментальные исследования свойств материалов и огнестойкости конструкций – прогностическое моделирование с помощью расчетно-аналитических методов – внедрение результатов при проектировании конструкций и подготовке нормативных документов по ЖБК». Получение новой информации по каждой из указанных позиций актуально для ЖБК. Но, прежде всего, очевидна необходимость проведения значительного объема предусмотренных нормативными документами огневых экспериментов при действии силовых нагрузок, а также теплотехнического анализа и обобщения его результатов с использованием расчетно-аналитических методов оценки огнестойкости конструкций. Для проектирования ЖБК с требуемой огнестойкостью и обеспечения (в случае необходимости) их огнезащиты требуется информация по прочностным и теплофизическим характеристикам применяемых материалов.

Анализ используемых в настоящее время расчетно-аналитических методов свидетельствует о том, что методики статических расчетов имеются и широко используются. В то же время отсутствуют общепринятые методики теплотехнических расчетов для моделирования температурных полей,

выбора рациональных систем и определения толщин огнезащиты, обеспечивающих заданные пределы огнестойкости конструкций. В результате во многих случаях толщины огнезащиты назначаются без должного обоснования. Применяются устаревшие и недостаточно апробированные теплотехнические методики (см., например, [22, 23]), при этом не приводятся ТФХ материалов, при которых расчеты проводились. В то же время имеются методики теплотехнических расчетов конструкций с огнезащитой, которые уже успешно используются и могут рассматриваться в качестве основы для дальнейшего совершенствования. Они являются важным элементом применяемой методологии комплексных исследований. Также следует отметить недостаточный уровень исследованности физико-механических и теплофизических характеристик материалов (тяжелых бетонов и средств огнезащиты). Обозначенная и применяемая методология предполагает определение или уточнение таких характеристик.

Таким образом, целью исследований является выбор эффективных способов предотвращения взрывообразной потери целостности бетона и обеспечения заданной огнестойкости ЖБК. Для этого потребовалось проведение значительного количества огневых испытаний железобетонных колонн и плит перекрытия под нагрузкой при наличии и отсутствии полипропиленовой микрофибры в составе бетона, а также при использовании конструктивной огнезащиты. Это позволяет проводить объективный анализ полученных результатов и обосновывать варианты их практического использования. Предназначением результатов комплексных исследований является их внедрение при проектировании, испытаниях и изготовлении конструкций на строительных объектах. Естественно, одним из важных конечных результатов должны стать обоснованные рекомендации по корректировке соответствующих нормативных документов, в частности².

Материалы и методы

Объектом экспериментальных исследований являлись конструкции из тяжелых (высокопрочных) бетонов класса от В25 до В40 с использованием полипропиленовой микрофибры или средств огнезащиты. Они уже применяются и имеют хорошие перспективы для дальнейшего использования при строительстве ответственных объектов. Целью исследований является определение их требуемой огнестойкости и наиболее рациональных вариантов ее обеспечения.

Была обоснована целесообразность применения и параметры полипропиленовой микрофибры «PROZASK IGS» [11]. Она вводится в количестве 1 кг/м^3 в состав рецептуры бетонов. Была отработана

и реализуется технология изготовления железобетонных изделий с микрофиброй (несущих колонн, плит перекрытий, тубингов обделки тоннелей) и определен значительный объем характеристик бетонов с ППМФ [10, 11, 13, 18]. Поскольку даже небольшое количество микрофибры приводит все-таки к незначительному снижению прочностных свойств на сжатие бетонов по отношению в тому же составу бетонов, но без ППМФ, были предложены и использованы компенсирующие добавки (различные суперпластификаторы), позволившие нивелировать такое снижение и получить проектный класс бетона. Исследовались образцы ЖБК (колонны и плиты перекрытий), изготовленные из тяжелых бетонов класса от В25 до В40 с ПМФ и без нее. На части образцов без ПМФ для предотвращения ВЦП и повышения их огнестойкости наносилась (монтировалась) конструктивная огнезащита. Огнестойкость ЖБК определялась установленными методами, т.е. при действии различных нагрузок по ГОСТ 30247.1–94³.

В качестве основного варианта конструктивной огнезащиты рассматривались плиты «ПРОЗАСК Файерпанель» («ПФ»), которые уже доказали свою эффективность и представляются перспективным средством защиты от пожаров различных строительных конструкций. В ходе подготовки железобетонных изделий с этими плитами для проведения огневых экспериментов под нагрузкой использовались штатные элементы крепления плит. Учитывалось, что именно с ними должна оцениваться работоспособность и эффективность конструктивной огнезащиты, а также огнестойкость защищаемых ею конструкций. Дополнительно рассматривался вариант конструктивной огнезащиты в виде цементной огнезащитной штукатурки «Игнис Лайт» («ИЛ»). Получение информации по экспериментам с огнезащитой, кроме прочего, представляет интерес для сопоставительного технико-экономического анализа, который необходим для выбора наиболее целесообразного варианта для исключения ВЦП и повышения огнестойкости ЖБК.

Огнестойкость является важнейшей характеристикой, необходимой для обоснования возможности использования ЖБК на ответственных объектах. Как отмечалось, для ее определения прежде всего необходимо проведение требуемого объема огневых экспериментов под нагрузкой. Это реализуется в ходе проводимых авторами комплексных исследований. При этом был обеспечен больший, чем того требуют существующие методики, объем термометрических измерений, а также уточнена система силового нагружения конструкций, что позволяло лучше вос-

производить действие задаваемых эксплуатационных нагрузок. В ходе проведенных авторами ранее огневых испытаний различных образцов ЖБК уже была показана эффективность использования ППМФ. Но в данной статье предлагается обратить внимание на две серии огневых экспериментов, которые удалось организовать и провести в последнее время.

Во-первых, это серия из одиннадцати испытаний под нагрузкой несущих железобетонных колонн и плит перекрытий при отсутствии и наличии ППМФ в составе бетона, а также при отсутствии и наличии огнезащиты. Реализовывался стандартный температурный режим воздействия. Испытывались образцы железобетонных колонн сечения 400 × 400 мм при вертикальной статической нагрузке 981 кН, а также плит толщиной 170 и 140 мм при различных нагрузках. Вторая серия состояла из пяти испытаний железобетонных плит при различных нагрузках. Главной ее отличительной особенностью являлось то, что она проводилась при углеводородном режиме огневого воздействия.

Что касается первой серии испытаний, то описание, особенности методики проведения и результаты испытаний образцов железобетонных колонн и плит представлены в статье [12]. В ней отражен порядок измерений температуры с помощью термопар, установленных по толщине ЖБК и под огнезащитой, а также порядок анализа состояния образцов в ходе и после экспериментов. Для наглядности основные сведения об этих испытаниях обобщены и представлены в табл. 1 и 2 (позиции 1–6). Кроме того, упомянут эксперимент, проведенный для ненагруженных плит при углеводородном режиме воздействия (см. табл. 2, позиция 7).

Во второй (последней) серии из пяти огневых экспериментов под нагрузкой испытывались образцы плит из железобетона класса В40, но уже при тепловом воздействии по ГОСТ Р ЕН 1363-2–2014⁴ (углеводородный температурный режим). Образцы представляли собой железобетонные плиты размером 600 × 1200 × 150 мм. Глубина залегания арматуры 33 мм (до середины арматурного прутка). Основные сведения об особенностях проведения второй серии испытаний образцов плит представлены в табл. 2 (позиции 8–12).

В двух экспериментах использовались образцы без микрофибры (позиции 8 и 9), а в образец для одного из экспериментов (позиция 10) в состав бетона добавлялась полипропиленовая микрофибра в указанном ранее количестве (1 кг/м³). Определено, что прочность бетона без микрофибры составляла 44,3 МПа, а с ПМФ — 46,0 МПа.

³ ГОСТ 30247.1–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции.

⁴ ГОСТ Р ЕН 1363-2–2014. Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Часть 2. Альтернативные и дополнительные методы. П. 4.

Оценивалось также влияние на огнестойкость образцов без ППМФ, но с конструктивной огнезащитой, состоящей в одном случае из двух слоев плит «ПРОЗАСК Файерпанель» по 12,5 мм (общая толщина 25 мм), а в другом случае — из одного слоя этих плит толщиной 12,5 мм (позиции 11 и 12). Крепление плит к образцам осуществлялось при помощи саморезов по бетону, т.е. оценивалась также эффективность данного способа крепежа плит. Испытания проводились с фиксированием времени достижения образцами предельного состояния, т.е. деформаций плит до предельного уровня (150 мм) при конкретных тепловых и силовых нагрузках. Дополнительно измерялась температура арматуры, с глубиной ее залегания (до оси), равной 33 мм. Анализировались состояние и внешний вид образцов в ходе проведения и после экспериментов.

Авторами неоднократно отмечалось, что наряду с недостаточным количеством огневых экспериментов при действии нагрузок недостаточное внимание уделяется использованию статических и теплотехнических расчетно-аналитических методик для анализа, обработки и правильной трактовки дорогостоящих экспериментальных результатов.

Что касается методик для проведения статического анализа результатов огневых экспериментов, а также статических расчетов огнестойкости, то они имеются и используются на практике. Им до настоящего времени уделялось намного больше внимания, чем теплотехническим. Основной проблемой статических расчетов является недостаточная исследованность прочностных характеристик различных классов бетонов при высоких температурах. Поэтому получение любой дополнительной информации по таким характеристикам является важной и востребованной. В рамках проводимых авторами комплексных исследований предусмотрено определение пределов прочности на сжатие и коэффициентов условий работы для нескольких классов тяжелых бетонов при наличии и отсутствии микрофибры, причем с учетом влияния температуры на эти характеристики. Информация по методике и результатам этих исследований будет представлена в последующих публикациях.

Расчеты огнестойкости должны учитывать результаты теплотехнических расчетов температурных полей в ЖБК при огневом воздействии на них по заданному режиму. Но, как показала практика, во многих случаях оценки огнестойкости ЖБК могут проводиться на основании только теплотехнических (даже без проведения статических) расчетов. Такие возможности показаны в [12], где обоснован выбор и продемонстрирована эффективность использования надежных и относительно несложных методик и программ теплотехнических расче-

тов, применимых как при расчетах температурных полей, так и для анализа и обобщения результатов огневых экспериментов и оценок огнестойкости ЖБК с огнезащитой и без нее.

Для конструкций из ЖБК с огнезащитой можно использовать методику, представленную, например, в [24]. Практика показала, что она вполне применима даже для конструкций из материалов с содержанием влаги, к которым относится и железобетон, и основные материалы конструктивной огнезащиты. Это одномерная задача, но практика показала возможность ее использования во многих случаях и для различных конструкций. Методика и программа основаны на численном решении методом конечных разностей общеизвестной системы уравнений, включающей уравнение нестационарной теплопроводности многослойной пластины (или цилиндра), причем пока даже без учета сложных процессов дегидратации, тепломассопереноса и пр., происходящих в огнезащите при нагреве [12, 24]. Имеется и подобная двумерная конечно-разностная методика и программа.

Для расчетов необходимы данные по теплофизическим характеристикам бетонов, а также средств огнезащиты (в случае ее применения), причем в рабочем диапазоне температур. При расчетах температурных полей в ЖБК на данном этапе исследований признано целесообразным пользоваться опубликованными данными по ТФХ для тяжелых бетонов [25]. В то же время уделено внимание исследованиям ТФХ материалов конструктивной огнезащиты.

Их определение является одним из элементов упоминаемой методологии комплексных исследований, причем признано целесообразным проведение дополнительных испытаний образцов огнезащиты на стенде лучистого нагрева [26]. Проводились термпарные измерения, обработка которых (кроме важных данных по огнезащитной эффективности) позволила определить ТФХ, причем в рабочем диапазоне температур. В [26, 27] показано, что испытания по такой методике представляются наиболее приемлемым вариантом дополнительных исследований конструктивной огнезащиты. Тем более что обеспечивалось воспроизведение в течение продолжительного времени режимов как стандартного, так и углеводородного воздействия.

Однако основное внимание должно уделяться подготовке, проведению и анализу результатов испытаний под нагрузкой различных ЖБК с целью определения их огнестойкости установленными методами.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты двух уникальных серий подготовленных и проведенных соответствующим образом огневых экспериментов образцов несущих колонн и плит убедительно продемонстрировали эффектив-

ность использования ПМФ, а также роль огнезащиты в предотвращении ВПЦ конструкций и повышении их огнестойкости и огнесохранности.

Эти результаты уже сейчас можно непосредственно использовать для обоснования оптимальных технических решений по обеспечению огнестойкости ЖБК, в том числе решений по их рациональной огнезащите. Кроме того, они могут являться основой для обоснованного «переноса» результатов на другие условия и конструкции, «аналогичные», но несколько отличающиеся от испытанных. Следует напомнить, что возможность такого «переноса» с использованием надежных расчетно-аналитических методик предусмотрена нормативными документами.

В таблицах указаны значения температуры, зафиксированные в моменты окончания испытаний с помощью дополнительных термодатчиков, установленных на различной глубине образцов ЖБК, а также на их поверхности (под огнезащитой). Такие температурные измерения использовались авторами при теплотехническом анализе, обработке и обобщении результатов первой из рассматриваемых серий испытаний образцов ЖБК [12]. Авторы глубоко убеждены в целесообразности или даже обязательности таких измерений. Можно отметить, что рекомендации по подобным измерениям при огневых экспериментах приводятся и в зарубежных публикациях¹. Основные результаты обеих серий проведенных авторами огневых экспериментов, включая некоторые сведения об измерениях, обобщены в табл. 1 и 2.

Как видно из табл. 1, за время испытаний предельное состояние образцов колонн при указанных нагрузках и стандартном температурном режиме не наступило как в случае использования ПМФ, так и конструктивной огнезащиты. Таким образом было предотвращено взрывообразное разрушение и обеспечены достаточно высокие пределы огнестойкости колонн. Это означает, что возможно изменение подхода к проектированию ЖБК, в частности, за счет уменьшения толщины защитного слоя бетона и, соответственно, веса конструкций. Например, толщины огнезащиты (порядка 25 мм), указанные в табл. 1, для многих реальных ситуаций представляются чрезмерными, поскольку требуемая огнестойкость в ходе испытаний была обеспечена со значительным запасом. При необходимости толщины огнезащиты могут быть уменьшены, но только при соответствующем обосновании с использованием расчетных методик.

При испытаниях плит при нагрузках и стандартном температурном режиме предельное состояние (разрушение) зафиксировано только для образцов без ПМФ (см. табл. 2 позиция 1), причем уже после относительно непродолжительного огневого воздействия (53 мин). Использование конструктивной огнезащиты и ПМФ позволило предотвратить ВПЦ и обеспечить высокие пределы огнестойкости колонн и плит, причем со значительным запасом. Это позволяет, в частности, обосновать возможность уменьшения указанных в таблице толщин огнезащиты. Как показано в [12], подобные обоснования должны основываться на теплотехническом

Таблица 1. Основные результаты огневых испытаний железобетонных колонн при стандартном режиме воздействия
Table 1. Main results of reinforced concrete columns fire tests with standard exposure conditions

Номер Number	Класс бетона (наличие ПМФ) Concrete class (PPMF availability)	Время, мин/соответствие показателю Time, min/compliance with indicator	Предельная/фиксируемая деформация, мм Maximum/fixe d deformation, mm	Максимальная температура (на глубине), мм Maximum temperature (at depth), mm	Особенности испытаний и результат Test features and result
1	V30 (–)	15/R15	30/5,2	89 °C (20) 52 °C (40)	ВПЦ (от 5 до 50 мм) Integrity loss (from 5 till 50 mm)
2	V30 (+)	15/R15	30/3	53 °C (20) 42 °C (40)	Без ВПЦ Without integrity loss
3	V30 (+)	151/R150	30/4	300 °C (20) 165 °C (30) 150 °C (50)	Без ВПЦ Without integrity loss
4	V30 (–)	241/R240	30/4,7	627 °C (20)	Без ВПЦ «ПФ» — 25 мм Without integrity loss “PF” — 25 mm
5	V30 (–)	151/R240	30/8,1	400 °C (20) 276 °C (30)	Без ВПЦ/«ИЛ» — 26 мм Without integrity loss/“IL” — 26 mm

Примечание: наличие (+) и отсутствие (–) ПМФ; ПФ — плиты «ПРОЗАСК Файерпанель»; ИЛ — штукатурка «Игнис Лайт».
Note: presence (+) and absence (–) of PPMF; PF — slabs “PROZASK Firepanel”; IL — plaster “IGNIS Light”.

Таблица 2. Основные результаты огневых испытаний железобетонных плит при стандартном (СТ) и углеводородном (УВ) режиме воздействия

Table 2. Main results of reinforced concrete slabs fire tests with standard (ST) and hydrocarbon (HC) exposure conditions

Номер Number	Класс бетона/ толщина плиты, мм Concrete class/slab thickness, mm	Нагрузка Load	Режим и время воздействия (разрушения*), мин/показатель Mode and time of exposure (deformation*), min/indicator	Предельная/ фиксируемая деформация, мм Maximum/fixe d deformation, mm	Максимальная температура (на глубине, мм) Maximum temperature (at depth, mm)	Особенности испытаний и результат Test features and results
1	B25/170	40 кН 40kN	СТ – 53 (53*)/ REI 45	140/140	501 °C (30)	ВПЦ до 7 мм (17–25 мин) Integrity loss till 7 mm (17–25 min)
2	B25/170	600 кг 600 kg	СТ – 121/ REI 120	140/121	292 °C (25)	Без ВПЦ/«ПФ» 12,5 мм Without integrity loss/“PF” 12.5 mm
3	B25/170	600 кг 600 kg	СТ – 121/ REI 120	140/9,5	355 °C (0) 330 °C (20)	Без ВПЦ «ИЛ» — 25 мм Without integrity loss “IL” — 25 mm
4	B30/140	24,5 кН 24.5 kN	СТ – 91/ REI 90	285/7	295 °C (0)	Без ВПЦ «ПФ» — 25 мм Without integrity loss “PF” — 25 mm
5	B30/140	24,5 кН 24.5 kN	СТ – 185/ REI 180	285/259	348 °C (0) 126 °C (50) 118 °C (80)	Без ВПЦ «ПФ» — 25 мм Without integrity loss “PF” — 25 mm
6	B45/140	566 кг/м ² 566 kg/m ²	СТ – 180/ REI 180	200/184	677 °C (33)	Без ВПЦ — ППМФ Without integrity loss — PPMF
7	B25/170	–	УВ – 139	–	312 °C (20) 108 °C (30)	Без ВПЦ — ППМФ Without integrity loss — PPMF
8	B40/150	900 кг 900 kg	УВ – 139 (139*)	150/150	498 °C (33)	ВПЦ до 14 мм Integrity loss till 14 mm
9	B40/150	1100 кг 1,100 kg	УВ – 108 (108*)	150/150	431 °C (33)	ВПЦ до 20 мм Integrity loss till 20 mm
10	B40/150	1100 кг 1,100 kg	УВ – 139 (139*)	150/150	679 °C (33)	Без ВПЦ — ППМФ Without integrity loss — PPMF
11	B40/150	1100 кг 1,100 kg	УВ – 311 (311*)	150/150	551 °C (33)	Без ВПЦ «ПФ» — 25 мм Without integrity loss “PF” — 25 mm
12	B40/150	1100 кг 1,100 kg	УВ – 258 (258*)	150/150	581 °C (33)	Без ВПЦ «ПФ» — 12,5 мм Without integrity loss “PF” — 12.5 mm

* Время достижения образцами предельного уровня деформаций / Time for specimens to reach maximum deformation

анализе, качество которого возрастает при использовании надежной информации по дополнительным измерениям в ходе огневых экспериментов.

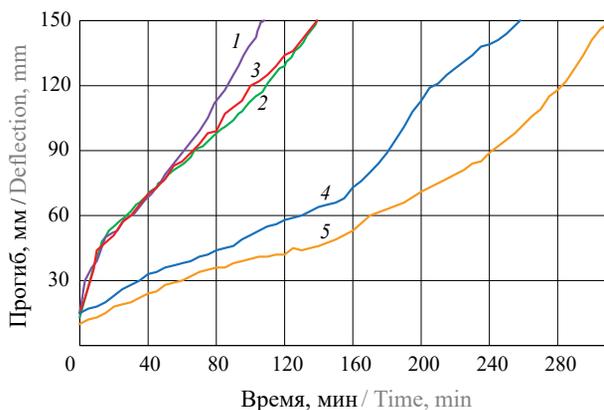
Все пять впервые проведенных испытаний железобетонных плит под нагрузкой при углеводородном температурном режиме продолжались до момента разрушения образцов. Получены результаты, свидетельствующие о значительном увеличении времени наступления предельного состояния (см. табл. 2) при использовании как ПМФ, так и огнезащиты одним или двумя слоями плит «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 12,5 мм. Зафиксировано, что при наличии огнезащиты температура необогреваемой поверхности плит на момент разрушения превысила критическое значение и возросла до 258 °С при толщине 12,5 мм и до 311 °С при толщине 25 мм. При необходимости возможен теплотехнический анализ с «переносом» полученных результатов на «аналогичные» конструкции и другие условия высокотемпературного воздействия с использованием полученных результатов как «штатных», так и дополнительных температурных измерений.

В ходе испытаний образцов без микрофибры и без огнезащиты фиксировались характерные хлопки, свидетельствующие о взрывообразном разрушении бетона. Осмотр образцов после этих экспериментов подтвердил наличие утонений защитного слоя бетона на отдельных участках, что подтверждает ВПЦ конструкций, причем большие участки и утонения зафиксированы при большем уровне нагрузок. Возможен и полезен также последующий статический анализ этих испытаний. Для него востребованной информацией являются результаты измерений величины прогиба плит. Соответствующие кривые для рассматриваемых пяти экспериментов представлены на рисунке.

Как отмечалось, основной проблемой статических расчетов огнестойкости является недостаточная исследованность прочностных характеристики бетонов, в особенности при высоких температурах.

Возможности теплотехнического анализа авторами показаны в [12, 24], здесь обоснован выбор и продемонстрирована эффективность использования надежных и относительно несложных конечно-разностных методик и программ расчетов, применимых как для анализа и обобщения результатов огневых экспериментов, так и для расчетов температурных полей и оценок огнестойкости ЖБК с огнезащитой и без нее.

Для проведения более качественного анализа авторами предложен и реализован порядок определения теплофизических характеристик огнезащиты в рабочем диапазоне температур. Он изложен в [26], а также в [27], где на примере огнезащитных плит «ПРОЗАСК Файерпанель» представлены



Изменение во времени величины прогиба плит при испытаниях под нагрузкой и углеводородном температурном режиме: кривые 1, 2, 3, 4 и 5 соответствуют позициям 8, 9, 10, 11, 12 табл. 2

Time changes in the slab deflection value under load and hydrocarbon temperature tests: curves 1, 2, 3, 4 and 5 correspond to positions 8, 9, 10, 11, 12 of the Table 2

результаты исследования их ТФХ как на известных лабораторных установках, так и с использованием стенда лучистого нагрева, где воспроизводился стандартный и углеводородный режимы воздействия, с последующей обработкой результатов термометрических измерений при решении обратной задачи теплопроводности. Подобный подход позволил определить ТФХ плит в рабочем диапазоне температур, причем он применим для исследований любых других средств конструктивной огнезащиты [26].

Таким образом, представлены основные положения применяемой авторами методологии комплексных исследований по одной из важных проблем пожарной безопасности и результаты работ по ее реализации. Они необходимы для принятия обоснованных технических и нормативных решений по ЖБК, что отвечает реальным потребностям строительной отрасли.

Выводы

1. Обоснована целесообразность решения актуальной задачи обеспечения требуемой огнестойкости железобетонных конструкций для ответственных строительных объектов в соответствии с предложенной методологией комплексных исследований, реализация которой уже позволила получить целый ряд результатов, представляющих как научный, так и практический интерес.

2. Представлены и обобщены результаты двух уникальных серий подготовленных и проведенных соответствующим образом огневых экспериментов образцов несущих колонн и плит под нагрузкой, которые продемонстрировали эффективность использования ПМФ, а также роль огнезащиты в предотвращении ВПЦ конструкций и повышении их огнестойкости и огнесохранности при воздей-

ствии как стандартного, так и углеводородного режимов воздействия.

3. Отмечена необходимость проведения теплотехнического анализа результатов огневых экспериментов, позволяющего осуществлять обоснованный «перенос» результатов на другие условия и конструкции, которые можно признать как «аналогичные», но отличающиеся от испытанных.

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

5. Отмечено, что одним из элементов реализуемой методологии комплексных исследований являются испытания на стенде лучистого нагрева образцов конструктивной огнезащиты, позволяющие проводить температурные измерения, дающие информацию по ее эффективности и позволяющие

при их обработке получать данные по ТФХ огнезащитных материалов в рабочем диапазоне температур.

6. Показано, что уже полученные и последующие результаты исследований огнестойкости железобетонных изделий, а также эффективности и характеристик конструктивной огнезащиты являются основой для проведения технико-экономического анализа с выбором наиболее целесообразного способа предотвращения ВЦП и обеспечения требуемых показателей ЖБК.

7. Предполагается использовать практический опыт, накопленный в ходе разработки технологий, проведения теплотехнического анализа результатов огневых экспериментов и моделирования прогрева, проектирования и изготовления конструкций, при подготовке рекомендаций по корректировке нормативных документов по ЖБК, в частности по внесению изменений в СП 468.1325800.2019².

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *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. Pp. 120–129.
2. *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.
3. *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
4. *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. Pp. 1–10.
5. *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, Bergen, 2017. Pp. 1–10.
6. *Dehn F., Werther N., Knitl J.* Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig // Beton-und Stahlbetonbau, 2006. Vol. 101. Issue 8. Pp. 631–635. DOI: 10.1002/best200608186
7. *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
8. *Hendrix B., Pimienta P.* The future for fire protection // Tunnelling Journal. September, 2019. Pp. 8–12. URL: www.researchgate.net/publication/287431544_Fire_behaviour_of_high_performance_concrete_-_An_experimental_investigation_on_spalling_risk
9. *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
10. *Новиков Н.С.* Огнестойкость конструкций из фибробетона для автодорожных тоннелей и метрополитена : дис. ... канд. техн. наук. М., 2019. 167 с.
11. *Антонов С.П.* Технологии предотвращения взрывообразного разрушения бетонов при огневом воздействии // Пожарная безопасность. Специализированный каталог. 2021. С. 56–61.
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. Кузнецова И.С., Рябченкова 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. Houry 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. Houry 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. 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>
20. Габдулин Р.Ш. Повышение огнестойкости железобетонных конструкций с помощью тонкослойных огнезащитных покрытий : дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 146 с.
21. Антонов С.П., Гаращенко А.Н., Голованов В.И., Новиков Н.С. Результаты определения огнестойкости железобетонных конструкций с полипропиленовой микрофиброй // Огнезащита материалов и конструкций SPBPU FPM-2023 : сб. тез. докл. I Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 18–20 апреля 2023 г. СПб. : Университет ГПС МЧС. С. 23–26.
22. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В. Инженерный метод расчета огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой плитами КНАУФ-Файрборд // Пожарная безопасность. 2016. № 3. С. 171–179. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26731725>
23. 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.
24. 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
25. Волков А.А., Ройтман В.М., Приступок Д.Н., Федоров В.Ю. Влияние влажности строительных материалов на точность расчетов прогрева конструкций при оценке их огнестойкости // Системотехника строительства. Киберфизические строительные системы : сб. мат. семинара, в рамках VI Междунар. науч. конф. Москва, 14–16 ноября 2018 г. М. : МГСУ, 2018. С. 207–212.
26. Гаращенко А.Н., Виноградов А.В., Кобылков Н.В., Никольченко А.А., Антипов Е.А. Экспериментальное и расчетное моделирование огнетепло-защиты и огнестойкости конструкций и изделий в условиях высокотемпературного воздействия // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-84-97
27. 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

REFERENCES

1. 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.
2. 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.
3. Maraveas C., Vrakas A.A. Design of concrete tunnel linings for fire safety. *Structural Engineering International*. 2014; 24(3):319–329. DOI: 10.2749/101686614X13830790993041
4. 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 Assambly*. Dubrovnik, Croatia. 2015; 1–10.

5. 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.
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
7. 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
8. Hendrix Bart, Pimienta Pierre. The future for fire protection. *Tunnelling Journal*. September, 2019; 8-12. URL: www.researchgate.net/publication/287431544_Fire_behaviour_of_high_performance_concrete_-_An_experimental_investigation_on_spalling_risk
9. 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. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(5):60-70. DOI: 10.1818322/PVB.2019.28.05.60-70 (rus).
10. Novikov N.S. *Fire resistance of fiber concrete constructions for auto roads tunnels and underground : dis. Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2019; 167 (rus).
11. Antonov S.P. Technologies of concrete spalling preventing under fire action. *Fire Safety. Special Catalog*. 2021; 56-61 (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. Kuznetsova I.S., Ryabchenkova V.G., Korniyushina M.P., Savrasov I.P., Vostrov M.S. Polypropylene fiber is an effective way to struggle with the explosion-like destruction of concrete in case of fire. *Building 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. 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.
20. Gabdulin R.Sh. *Ensuring of the fire resistance concrete constructions durability against spalling by thin layer fire retardant coating : dis. Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2014; 146. (rus).
21. Antonov S.P., Garashchenko A.N., Golovanov V.I., Novikov N.S. The results of determining the fire resistance of reinforced concrete structures with polypropylene microfiber. *Fire protection of materials and structures SPBP U FPM-2023 : collection of abstracts of the I Inter. scientific and practical conference. St. Petersburg, April 18-20, 2023*. Saint Petersburg, University of GPS of the Ministry of Emergency Situations, 2003; 23-26. (rus).
22. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Engineering method for designing fire resistance of steel constructions protected by KNAUF-fireboard plates. *Fire Safety*. 2016; 3:171-179. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26731725> (rus).
23. 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 Publ., 2018; 70. (rus).
24. 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 preset fire resistance. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(1):21-39. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.21-39 (rus).
25. Volkov A.F., Rojzman 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. 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):08. URL: <http://www.journal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-84-97 (rus).

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

Поступила 27.10.2023, после доработки 03.11.2023;

принята к публикации 08.11.2023

Received October 27, 2023; Received in revised form November 3, 2023;

Accepted November 8, 2023

Информация об авторах

АНТОНОВ Сергей Порфирьевич, директор, ООО «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

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

ГОЛОВАНОВ Владимир Ильич, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, 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; ORCID: 0000-0001-6043-0537; e-mail: pavelgol1@yandex.ru

НОВИКОВ Николай Сергеевич, научный сотрудник, 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:

Антонов С.П. — концепция исследования; организация и участие в проведении огневых экспериментов; анализ экспериментальной информации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Гаращенко А.Н. — концепция исследования; научное руководство; участие в анализе экспериментальной информации; анализ результатов расчетов; написание исходного текста; итоговые выводы.

Голованов В.И. — участие в разработке концепции исследования, анализе экспериментальной информации и доработке текста.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

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

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

Vladimir I. GOLOVANOV, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, 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; ORCID: 0000-0001-6043-0537; e-mail: pavelgol1@yandex.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; ORCID: 0000-0002-2945-663X; e-mail: agps.nick182@mail.com

Contribution of the authors:

Sergey P. Antonov — conceptual research; organization and participation in various firing experiments; analysis of experimental information; describing the initial; final conclusions.

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

Vladimir I. Golovanov — participation in the conceptual research, in the analysis of experimental information and describing the initial.

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

The authors declare no conflicts of interests.