

Теплотехнический анализ результатов огневых испытаний под нагрузкой чугунных тьюбингов обделок тоннелей метрополитена, обеспечение их рациональной огнезащиты и заданной огнестойкости

Анатолий Никитович Гаращенко^{1✉}, Андрей Игоревич Данилов¹,
Сергей Порфирьевич Антонов², Светлана Васильевна Марченкова³,
Владимир Валерьевич Павлов⁴

¹ Центр исследований опасных факторов пожаров, г. Санкт-Петербург, Россия

² ПРОЗАСК, г. Москва, Россия

³ Государственный университет по землеустройству, г. Москва, 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 обеспечения фактического предела огнестойкости чугунных тьюбингов обделки тоннелей метрополитена. Ее актуальность обусловлена тем, что до настоящего времени в нашей стране и за рубежом не проводились огневые испытания таких конструкций и, соответственно, теплотехнический анализ их результатов, что необходимо для гарантирования их работоспособности.

Цель и задача. Анализ результатов двух огневых экспериментов: испытание чугунного тьюбинга без огнезащиты, и тьюбинга, защищенного огнезащитной плитой. Выбор и использование рациональной методики для проведения теплотехнического анализа.

Методы. Оценивалась огнестойкость натуральных образцов тьюбингов по стандартизованной методике в ходе испытаний в огневой печи под нагрузкой с проведением термодинамических измерений, результаты которых использовались в ходе теплотехнического анализа. Он проводился с использованием методик и программ численных расчетов нестационарных температурных полей в конструкциях с огнезащитой в одно- и двумерной постановке.

Результаты. Установлено, что предел огнестойкости чугунного тьюбинга тоннельной обделки марки 5,6-25-НУ, испытанного без огнезащиты под воздействием постоянной статической нагрузки (150 кН), составляет 54 мин, что соответствует классификации R 45, а тьюбинга с огнезащитой плитой «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 25 мм — не менее 121 мин (R 120). Расчеты позволили дать прогноз, насколько изменится уровень огнестойкости, если учитывать отличие условий испытаний и эксплуатации тьюбингов. Представлены результаты расчетов для различных вариантов огнезащиты, продемонстрирована высокая эффективность огнезащиты плитой «ПРОЗАСК Файерпанель» и возможность обеспечения с ее помощью требуемых пределов огнестойкости чугунных тьюбингов. Показана возможность прогнозирования их огнестойкости при режимах воздействия, отличающихся от стандартного температурного режима.

Выводы. Теплотехнический анализ результатов двух огневых экспериментов, впервые проведенных для оценки огнестойкости чугунных тьюбингов обделки тоннелей, позволил получить важную информацию, необходимую для обеспечения огнезащиты и заданной огнестойкости указанных ответственных конструкций метрополитена и дальнейшего развития данного направления экспериментальных и теоретических исследований. Продemonстрирована эффективность теплотехнических расчетов как инструмента для оценки параметров огнезащиты и огнестойкости тьюбингов и возможность сокращения с их помощью количества дорогостоящих огневых испытаний.

Ключевые слова: предел огнестойкости; теплотехнические расчеты; температурный режим пожара; статическая нагрузка; граничное условие; теплофизические характеристики

Для цитирования: Гаращенко А.Н., Данилов А.И., Антонов С.П., Марченкова С.В., Павлов В.В. Теплотехнический анализ результатов огневых испытаний под нагрузкой чугунных тьюбингов обделок тоннелей метрополитена, обеспечение их рациональной огнезащиты и заданной огнестойкости // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 1. С. 21–39, DOI: 10.18322/PVB.2022.31.01.21-39

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

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

Anatoliy N. Garashchenko^{1✉}, Andrey I. Danilov¹, Sergey P. Antonov²,
Svetlana V. Marchenkova³, Vladimir V. Pavlov⁴

¹ Research Center of Hazardous Fire Factors, Saint-Petersburg, Russian Federation

² PROZASK, Moscow, Russian Federation

³ State University of Land Use Planning, Moscow, Russian Federation

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

ABSTRACT

Introduction. The article addresses the fireproofing limit of the cast-iron tubing that lines subway tunnels. These structures have been fire tested neither in our country, nor abroad, and therefore, no fire test results have been analyzed, although this analysis is necessary to guarantee structural performance.

Purpose and objective. The purpose of the study is to analyze the results of two fire experiments, including the testing of the cast iron tubing without fire proofing, and the testing of the tubing protected by a fireproof plate. The objective of the study is to choose and use a rational thermal analysis methodology.

Methods. A standardized methodology was applied to test the fire resistance of loaded full-scale tubing specimens in a fire furnace, where thermocouple measurements of tested specimens were taken. The thermal analysis of these measurement results was conducted, using the methods and software for the numerical calculation of non-stationary temperature fields inside fireproof structures in one- and two-dimensional settings.

Results. It has been established that the fire resistance limit of the 5.6-25-NU cast-iron tubing tested under constant static loading (150 kN) without any fire protection is 54 minutes, which corresponds to classification R 45, while the fire resistance limit of the same tubing, fireproofed by PROSASK fire panel plates, that are 25 mm thick, is, at least, 121 min (R 120). Calculations allow to prognosticate a change in the fire resistance, if account is taken of the difference between the test environment and the one of the tubing when in operation. The authors present the results of calculations for various fire protection options and show that the fire protection and fire resistance limits of the cast-iron tubing are high, if PROSASK fire plates are used. The authors also demonstrate the projectability of the fire resistance values, if the modes of exposure differ from the standard temperature mode.

Conclusions. The thermal analysis of the results of two fire experiments, conducted to evaluate the fire resistance of the cast-iron tubing as the tunnel lining allows to obtain the information that is essential for the fire protection and pre-set fire resistance of critical subway structures as well as the further development of this area of experimental and theoretical research. The authors demonstrate the efficiency of thermal calculations as an instrument for the evaluation of fire protection parameters/fire resistance of tubing and the reduction in the number of costly fire tests.

Keywords: fire resistance limits; engineering calculations; temperature regime of fire; static load; boundary condition; thermophysical characteristics

For citation: Garashchenko A.N., Danilov A.I., Antonov S.P., Marchenkova S.V., Pavlov V.V. The thermal analysis of fire test results obtained for loaded cast iron tubing used to line subway tunnels, their rational fire protection and pre-set fire resistance. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2022; 31(1):21-39, DOI: 10.18322/PVB.2022.31.01.21-39 (rus)

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

Введение

Обделки из чугунных тубингов применяются для строительства в сложных гидрогеологических условиях тоннелей метрополитена, а также для строительства стволов вентиляционных шахт, наклонных ходов, сбоек, коммуникационных и транспортных тоннелей. Чугунные тубинги относятся к основным несущим конструкциям перечисленных тоннельных сооружений, работоспособность которых должна быть обеспечена в условиях эксплуатации подземных

сооружений. В их числе требования по обеспечению важнейшего показателя пожарной безопасности — предела огнестойкости. К обделкам тоннелей метрополитена предъявляются требования по пределу огнестойкости 90 мин (перегонные тоннели) и 60 мин (эскалаторы).

Следует отметить, что в строительной отрасли как у нас, так и за рубежом доля несущих конструкций из чугуна относительно невелика по сравнению с конструкциями из стали и железобетона. Отчасти

по этой причине исследования огнестойкости и огнезащиты несущих конструкций из чугуна в требуемом объеме не проводились. Как следует из нормативных документов, определение огнестойкости любых несущих конструкций должно проводиться в ходе огневых экспериментов при действии эксплуатационных нагрузок. Подобным образом в нашей стране и за рубежом испытываются несущие конструкции из стали (колонны, балки и пр.), железобетона (колонны, балки, плиты перекрытий и пр.), а также железобетонные тубинги обделки тоннелей [1–9]. Так, компания EFECTIS, один из ведущих европейских лидеров в области пожарной безопасности, проводит тесты или с сегментами тоннельной обделки, или с железобетонными изделиями в виде стен, или перекрытий размером, минимум, $1,45 \times 1,45$ м, при этом тесты горизонтальных конструкций распространяются также и на вертикальные конструкции, а тесты вертикальных конструкций — только для вертикальных [9]. Практикуются также расчеты огнестойкости, причем большее внимание уделяется статическим расчетам по сравнению с теплотехническими, как, например, в расчетах ожидаемой огнестойкости блоков тоннельной обделки высокоскоростной железной дороги Милан – Генуя [8], где с помощью программного обеспечения FLAC 7.0 моделировались поля напряжений в обделке тоннелей с учетом взаимодействия с различными типами грунтов. Что же касается чугунных тубингов обделки различных тоннелей, то, по имеющейся информации, огневые эксперименты для них при нагрузках и даже без них ранее не проводились ни у нас, ни за рубежом.

Известно, что традиция и опыт [10], а также соответствующие нормативные документы (см. СП 122.13330.2012 «Тоннели железнодорожные и автомобильные. Актуализированная редакция СНиП 32-04-97»), регламентирующие проектирование, изготовление и эксплуатацию подобных тубингов из чугуна, характерны исключительно для нашей страны. Однако до настоящего времени сведения по огнестойкости тубингов и даже прочих несущих конструкций из чугуна крайне ограничены и явно не достаточны. Информация по этой тематике, обнаруженная в зарубежных источниках, не касается тубингов и ограничивается публикациями [11–14]. В статье [11] отмечается малая изученность поведения конструкционного чугуна при высокотемпературном нагреве. Публикации [12, 13] полезны в части оценки предполагаемого уровня критической температуры, необходимой для оценки огнестойкости несущих конструкций из чугуна. В [14] представлены результаты огневых экспериментов для чугунных колонн, а также численного моделирования их поведения и огнестойкости в ходе теплотехнических и статических расчетов.

Из отечественных публикаций можно отметить статьи [15, 16]. В них представлены результаты теплотехнических расчетов, проведенных для конструкций чугунных тоннельных обделок метрополитена при отсутствии, а также при наличии одного из вариантов их огнезащиты. Указан также предполагаемый уровень критической для чугуна температуры. Результаты расчетов, представленных в [15, 16], в основном, свидетельствовали о недостаточном уровне ожидаемых пределов огнестойкости для типовых чугунных тубингов. Но до последнего времени (даже при наличии подобной информации) задача по обеспечению их огнезащиты и заданной огнестойкости, а, главное, по экспериментальной проверке принятых технических решений не решалась и даже не ставилась. Это предопределило необходимость организации первых огневых экспериментов чугунных тубингов для оценки их огнестойкости. Один эксперимент проводился при отсутствии огнезащиты, а другой — при использовании конструктивной огнезащиты плитами «ПРОЗАСК Файерпанель».

Вариант конструктивной огнезащиты с использованием этих плит представляется наиболее перспективным. Практика его применения для различных конструкций на многочисленных ответственных строительных объектах показала, что он обеспечивает достаточно высокую огнезащитную эффективность, эксплуатационную стойкость (так как изготовлен на цементном связующем), технологичность монтажа с возможностью быстрого снятия и установки плит при мониторинге состояния обделки, эстетическую привлекательность и имеет прочие положительные качества. Особо следует отметить, что для плит «ПРОЗАСК Файерпанель» (в отличие от других средств огнезащиты) имеется наибольший объем огневых экспериментов под нагрузкой, проведенных для различных конструкций из железобетона и стали. Испытания под нагрузкой предусмотрены нормативными документами, тем не менее, для большинства других средств огнезащиты такие испытания проводились и проводятся в явно недостаточном объеме или не проводились вообще. Как и требуется, огневые испытания конструкций с огнезащитой плитами проводились с использованием специальных элементов крепления плит, разработанными для основных видов защищаемых конструкций. Именно совместно с ними должна подтверждаться работоспособность и эффективность конструктивной огнезащиты.

Сложность и высокая стоимость подготовки и проведения огневых испытаний чугунных тубингов (тем более под нагрузкой) предопределили необходимость проведения тщательного анализа первых экспериментальных результатов с привлечением теплотехнических расчетов по надежным методикам.

Предполагается, что такие испытания и их всесторонний анализ могут стать основой для продолжения работ по этой важной тематике с последующей регламентацией порядка их проведения и практического использования получаемых результатов при обеспечении огнезащиты и заданной огнестойкости чугунных тубингов для объектов метрополитена.

Следует отметить, что теплотехническим расчетам до настоящего времени уделяется недостаточное внимание, хотя возможность их проведения при проектировании и анализе результатов огневых испытаний предусмотрена нормативными документами, в частности статьей 87 п. 10 Федерального закона от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». Однако во исполнение этого закона на сегодняшний день нормативными документами по пожарной безопасности не определены расчетно-аналитические методы для расчетов огнестойкости чугунных конструкций. Это затрудняет оценку и обоснованное обеспечение требуемых пределов огнестойкости, а также назначение и обоснование эффективности рациональной огнезащиты. В частности, без таких расчетов затруднены анализ и правильная интерпретация результатов испытаний в огневых печах. В то же время проведение расчетов крайне желательно и востребовано, учитывая значительные затраты времени и средств на проведение даже ограниченного количества огневых испытаний и невозможность проведения таких испытаний для различных вариантов исполнения как самих конструкций, так и их огнезащиты.

Имеющиеся коммерческие (в основном зарубежные) программные комплексы плохо приспособлены к решению задач по проведению оперативного теплотехнического анализа. Они малодоступны из-за их высокой стоимости и обладают относительно низкой производительностью. Оптимальным вариантом в данной ситуации является использование относительно несложных и производительных отечественных методик и программ с доказанной возможностью их применения. При проведении анализа нами использовались методики и программы, апробированные в ходе проектных расчетов для различных средств огнезащиты строительных конструкций на многочисленных объектах.

Изложенное обосновывает правомерность цели и задач исследований, включающих прогнозирование огнестойкости рассматриваемых ответственных конструкций на основе анализа результатов двух огневых экспериментов, впервые проведенных как для чугунного тубинга без огнезащиты, так и при использовании огнезащитных плит «ПРОЗАСК Файерпанель». Для проведения такого анализа выбирались надежные методики теплотехнических расчетов.

Выбор методик, компьютерных программ и исходных данных для теплотехнических расчетов

Теплотехнические расчеты огнестойкости могут использоваться в ходе анализа результатов испытаний на огнестойкость различных строительных конструкций с огнезащитой и без нее, а также (наряду со статическими расчетами) при проектировании и проведении экспертизы проектных решений. Следует отметить недостаточный уровень имеющихся методик и рекомендаций по проведению теплотехнических расчетов строительных конструкций, что не соответствует современным требованиям и возможностям. Особенно это характерно для конструкций с огнезащитой, где такие рекомендации недостаточно четкие и обоснованные, и касается это не только применяемых методик, но и данных по теплофизическим и прочим характеристикам материалов, необходимых для таких расчетов.

Для металлоконструкций (в данном случае для чугунных тубингов обделки тоннелей) рассматривалась возможность использования стандарта СТО АРСС 11251254.001-018-03, подготовленного Ассоциацией развития стального строительства (АРСС) [17]. Он содержит статическую и теплотехническую части методики оценки огнестойкости конструкций и применяется, в том числе, и для проектирования огнезащиты (см., например, [18, 19]. Статический расчет позволяет оценить значения критической температуры конструкций. Однако в [17] рассматривается только их относительно простая форма и простые схемы нагружения. Что же касается теплотехнической части, то упомянутую там методику следует признать устаревшей, поскольку во время ее разработки и публикации [20] уровень методического-программного обеспечения был более низким, чем в настоящее время. Требуется использование более совершенных методик и программ теплотехнических расчетов огнестойкости металлоконструкций, чем методика, рекомендуемая в [17–20].

Точность расчетов (в том числе и по методике, предлагаемой для конструкций из стали с огнезащитой в виде облицовок или плит [17–19]) в значительной степени определяется задаваемыми теплофизическими характеристиками материалов (ТФХ). Однако их величины для огнезащиты часто не известны, или по ним имеются разночтения. В опубликованных работах (например, в [18, 19]) не упоминаются значения используемых ТФХ. Ощущается явный недостаток информации по уровню и зависимостям таких характеристик от температуры. Особенно это актуально для плитных огнезащитных материалов и огнезащитных штукатурок, которые, как правило, являются влагосодержащими. Достоверность и точность определения температурных

полей в конструкциях с такой огнезащитой, а также оценки их огнестойкости в значительной степени зависит от квалификации проводящих такие расчеты специалистов. Зависит также от объема имеющихся в их распоряжении результатов огневых испытаний опытных образцов конструкций, а также данных по ТФХ материалов.

В то же время практика показала, что во многих случаях не обязательно применять сложные и дорогостоящие зарубежные или отечественные программные комплексы. Понимание процессов тепло- и массопереноса в конструкциях при наличии и отсутствии огнезащиты и обоснованный выбор величин ТФХ позволяет использовать преимущественно относительно несложные отечественные методики и программы расчетов, которые, в то же время расширяют возможности численного моделирования и обеспечивают получение значительно большего объема важной для практики информации. Они могут применяться и при анализе результатов огневых экспериментов. Поскольку в настоящее время не существует общепринятых (и узаконенных) методик расчетов огнезащиты из влагосодержащих материалов, которые учитывали бы сложные физико-химические процессы, происходящие в них при нагреве, необходимо применять более простые и доступные для практики методики и программы расчетов теплопередачи в конструкциях.

Вышеизложенное свидетельствует о целесообразности использования приведенной ниже относительно простой исходной системы уравнений, описывающей нестационарный процесс теплопередачи для многослойной конструкции в одномерной постановке, представленной в координатах OX , отсчитываемых от ее обогреваемой поверхности:

- уравнение нестационарной теплопроводности:

$$\rho c_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial x} \right); \quad (1)$$

- граничное условие на обогреваемой поверхности конструкции:

$$\lambda_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_n (T_{cp} - T_n) + A \sigma (T_{cp}^4 - T_n^4),$$

$$A = 1 / \left(\frac{1}{\varepsilon_{cp}} + \frac{1}{\varepsilon_n} - 1 \right); \quad (2)$$

- граничное условие на необогреваемой (наружной) поверхности:

$$-\lambda_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_n (T_n - T_0) - \varepsilon_n \sigma T_n^4; \quad (3)$$

- начальное условие:

$$T(x, 0) = T_0; \quad (4)$$

- условия на границе между слоями:

$$\lambda_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_p-0} = \lambda_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_p+0},$$

$$T \Big|_{x=x_p-0} = T \Big|_{x=x_p+0}. \quad (5)$$

В двумерной постановке уравнение нестационарной теплопроводности в декартовых координатах $OX-OY$ имеет вид (при соответствующем преобразовании краевых условий (2)–(4)):

$$\rho c_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda_{\Sigma} \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \right). \quad (6)$$

Обозначения: T — температура; t — время; x, y — продольная и поперечная координата; ρ — плотность; λ_{Σ} — эффективный коэффициент теплопроводности; c_{Σ} — эффективная удельная теплоемкость; α — коэффициент конвективного теплообмена; ε — степень черноты; A — функция радиационных параметров; T_0 — начальная температура и температура газовой среды у необогреваемой (наружной) поверхности.

Индексы: p — нагреваемая поверхность конструкции; n — необогреваемая (наружная) поверхность конструкции; cp — высокотемпературная газовая среда; gr — границы между слоями конструкции.

При расчетах принимались следующие исходные параметры, характерные для условий огневого воздействия (испытаний) при стандартном температурном режиме:

$$T_{cp} = T_0 + 345 \log(8t + 1);$$

$$\alpha_n = 29 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C};$$

$$\varepsilon_n = 0,85;$$

$$\alpha_n = 8 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}.$$

Как известно, аналитические решения такой задачи невозможны, а точность используемых в некоторых случаях приближенных расчетных зависимостей не доказана, в связи с чем в настоящее время их применение нецелесообразно. Тем более, что численная реализация представленной системы уравнений методом конечных разностей или методом конечных элементов не является проблемой. Существуют различные компьютерные программы, разработанные в результате такой численной реализации, которые используются в том числе и для теплотехнических расчетов с целью расчетов температурных полей и оценки огнестойкости строительных конструкций, в частности, из металла или железобетона при наличии и отсутствии огнезащиты. Традиционно сложилось так, что при численной реализации исходных систем уравнений и при разработке компьютерных программ расчетов огнестойкости более часто использовался метод конечных элементов. Это связано с тем, что программы статических расчетов, как правило, основаны именно на методе конечных элементов, что особенно оправдано для конструкций

сложной конфигурации. Оправданным является такой подход и при совместном решении теплотехнической и статической задач. По такому принципу построено большинство современных (преимущественно зарубежных и относительно дорогостоящих) программных комплексов, нашедших применение при оценках и обеспечении огнестойкости строительных конструкций.

Однако во многих важных для практики случаях можно ограничиться проведением только теплотехнических расчетов и использовать их результаты при определении толщин огнезащиты и оценке огнестойкости конструкций. Например, это применяется в случаях, когда для стальных несущих элементов конструкций известны значения критической температуры, которые были заранее определены при решении статической задачи с учетом структуры конструкций, свойств материалов, действующих нагрузок и пр. Но в этом случае использование конечно-элементных теплотехнических методик и программ не всегда рационально. Кроме ограниченной доступности из-за дороговизны таких программных комплексов, это связано и с трудоемким процессом подготовки «сетки» конечных элементов, а также с относительно большим временем численного счета для каждого конкретного варианта.

Удачной альтернативой для численной реализации одномерных и двумерных систем уравнений типа (1)–(6), а также гораздо более сложных математических моделей является метод конечных разностей. Этот метод широко используется в различных отраслях техники (в частности, в ракетно-космической). Удалось адаптировать его и для решения теплотехнических задач обеспечения огнезащиты и огнестойкости строительных конструкций. При создании разностного алгоритма компьютерной программы, применяемой в ходе настоящего теплотехнического анализа, использован метод прогонки по неявной четырехточечной схеме «зонт», обеспечивающий высокий порядок аппроксимации разностного алгоритма. При расчетах в одномерной постановке использована одна из созданных по этому принципу компьютерных программ серии «Огнезащита» [21], а именно «Огнезащита. Версия ВУ.2», на которую в свое время получены сертификаты соответствия Росстандарта (РОСС RU.СП05.С00036 от 15.07.2001 г. и РОСС RU.СП05.Н00261 от 29.01.2008 г.).

В данном случае моделируется одномерная теплопередача в многослойной конструкции в «якобы неизменяющемся» материале с эффективными ТФХ. Поэтому обнуляется целый ряд параметров, предусмотренных в данной программе и позволяющих учитывать физико-химические процессы и процессы массопереноса, происходящие в материале при нагреве. Учитывается только изменение от температу-

ры теплофизических характеристик материалов каждого слоя конструкции. Преимуществом такой методики и программы является возможность проведения значительного объема расчетов в одномерной постановке за ограниченный период времени.

Для моделирования теплопередачи в двумерной постановке использовалась методика и компьютерная программа «Огнезащита. Версия 2Т» [21], на которую получены в свое время сертификаты соответствия Росстандарта (РОСС RU.СП05.С00037 от 15.07.2001 г. и РОСС RU.СП05.Н00262 от 29.01.2008 г.). Ее использование может быть востребованным для расчетов металлоконструкций (в данном случае чугунных тубингов обделки с огнезащитой и без нее). Естественно, могут применяться и другие программные комплексы, тем более такие, использование которых позволяет, наряду с расчетами температурных полей, определять эпюры напряжений, возникающих в конструкциях при действии заданных нагрузок.

Следует отметить еще одну особенность проводимых расчетов. Если в ходе экспериментов удалось измерить температуру на поверхности конструкции (под огнезащитой), то эту важную информацию можно использовать для теплотехнического анализа. В этом случае необходимо задавать граничное условие 1-го рода в виде зарегистрированного в эксперименте изменения во времени температуры на границе огнезащита – опытный образец. Такой подход позволяет абстрагироваться от огнезащиты (здесь из плит) и, соответственно, от сложных процессов тепло- и массопереноса, происходящих в такой огнезащите, а также от малоизученных на данный момент характеристик самих огнезащитных материалов. Граничное условие 1-го рода задается в данном случае вместо обычно используемого условия (2) (лучисто-конвективный нагрев), которое зависит от температуры газовой среды, изменяющейся по стандартному или иному режиму пожара, и от соответствующего набора сопутствующих параметров.

Следует обратить внимание и на то, что регистрируемые при экспериментах и используемые при расчетах температурные кривые учитывают не только сложные физико-химические процессы в огнезащите и ее характеристики, но и зависят от сохранения сплошности и толщины огнезащиты, т.е. зависят от возможного растрескивания, разрушения, образования щелей и зазоров и т.д. Эти факторы могут работать только в одном направлении, т.е. привести к существенному увеличению уровня температуры в контролируемой зоне по сравнению со случаем теплопередачи в огнезащите со стабильной геометрией и структурой.

С использованием упомянутых методик и программ расчетов, а также указанных выше параметров проводились теплотехнические расчеты для анализа

результатов двух впервые проведенных огневых испытаний под нагрузкой чугунных тюбингов обделки тоннелей. До настоящего времени необходимость проведения таких испытаний игнорировалась, и они не проводились даже без нагрузок на конструкции. В отличие от тюбингов из чугуна, испытания под нагрузкой железобетонных блоков обделки тоннелей (преимущественно автодорожных и метрополитена) в последнее время проводятся регулярно.

Сложившаяся ситуация в значительной степени связана с тем, что производителей чугунных тюбингов почему-то не обязывают подтверждать показатель их огнестойкости, хотя он относится к числу важнейших характеристик, обеспечивающих их работоспособность в процессе эксплуатации. Явно недостаточное внимание к данной проблеме проявляют также проектные организации и, собственно, сами заказчики данной продукции. Косвенным подтверждением сказанного являются сложности, с которыми пришлось столкнуться в ходе поиска и приобретения образцов для огневых испытаний. Данная ситуация неприемлема и требует разрешения, для чего и были инициированы и организованы первые испытания чугунных тюбингов обделки тоннелей с перспективой совершенствования методики их проведения и обеспечения, в дальнейшем, выхода на требуемый объем огневых экспериментов и должный уровень анализа их результатов.

Результаты огневых экспериментов и их анализ

Первый огневой эксперимент был проведен в ИЛ НИЦПБ ФГБУ ВНИИПО МЧС России. Его результаты представлены в «Отчете № 957-3.2-КИ-2020 от 25.12.2020 г. об испытаниях тюбинга обделки мар-

ки 5,6-25-НУ». Испытания опытных образцов проводились с целью определения предела их огнестойкости по ГОСТ 30247.0–94 и ГОСТ 30247.1–94. Образцы испытывались без огнезащиты, а также без теплоизоляции со стороны необогреваемой поверхности. Опытные образцы, пролет которых составлял 1540 мм, устанавливались на огневую камеру испытательной установки и подвергались одностороннему тепловому воздействию снизу по стандартному температурному режиму. Испытания проводились под действием постоянной вертикальной статической нагрузки 150 кН. Следует отметить, что при эксплуатации тюбинги могут подвергаться более высоким, более сложным и по другому распределенным нагрузкам. Однако на момент проведения данных тестов на базе ВНИИПО не было адаптированных к чугунным тюбингам стендов для одновременного приложения разнонаправленных нагрузок на чугунные тюбинги. В ходе испытаний предварительно определялось расчетное значение предельного прогиба в середине пролета исследуемого образца. Оно составило 77 мм, а средняя скорость нарастания деформации (до момента начала лавинообразного нарастания прогиба) — 0,79 мм/мин.

Предел огнестойкости опытных образцов был достигнут на 53-й и 55-й минутах огневого воздействия вследствие потери ими несущей способности (R), в результате последовательного достижения скорости нарастания деформации более 0,13 см/мин и предельного прогиба более 77 мм. Образец после эксперимента показан на рис. 1. Кроме того, проводились измерения температуры наружной (необогреваемой) поверхности. Установлено, что предел огнестойкости исследуемого чугунного тюбинга составил 54 мин, что соответствует классификации R 45.



a



b

Рис. 1. Внешний вид наружной поверхности *a* и зоны разрушения *b* опытного образца

Fig. 1. The external appearance of the exterior surface *a* and the failure area *b* of the tested specimen

Результаты второго огневого эксперимента, проведенного во ВНИИПО, представлены в «Отчете № 971-3.2-КИ-2021 от 12.02.2021 г. об испытаниях тубинга обделки марки 5,6-25-НУ с огнезащитой плитами «ПРОЗАСК Файерпанель». На опытные образцы производился монтаж конструктивной огнезащиты толщиной 25 мм (два слоя плит толщиной по 12,5 мм). На рис. 2 показана установка профилей для монтажа плит. Выбиралась такая схема установки каркаса и такая конструкция легких стальных тонкостенных конструкций, которая позволяла легко монтировать и демонтировать их к крепежным эле-

ментам в технологических отверстиях с внутренней стороны тубинга. На рис. 3 показан образец, на левой половине которого смонтирован один, а на правой — два слоя огнезащитных плит. Несмотря на кажущуюся сложность системы, плиты монтируются к легко устанавливаемому каркасу с помощью саморезов (также прошедших серию огневых испытаний). Это позволяет очень комфортно обслуживать и саму огнезащитную систему, и тубинги при эксплуатации, обеспечивая ее ремонтпригодность. Внешний вид опытного образца тубинга после монтажа огнезащиты представлен на рис. 4, а.



Рис. 2. Установка профилей каркаса для монтажа огнезащитных плит

Fig. 2. The installation of frame profiles needed to fix fire protection plates



Рис. 3. Огнезащитные плиты смонтированы на чугунном тубинге

Fig. 3. Fire protection plates fixed to the cast iron tubing



a



b

Рис. 4. Опытный образец перед испытанием

Fig. 4. The specimen before the onset of testing



Рис. 5. Образец с огнезащитой после испытания (вид с обогреваемой стороны)

Fig. 5. The specimen, that has fire protection, after testing (if viewed from the heated side)

Схема испытаний и уровень нагрузок соответствовали первому эксперименту. Также измерялась температура наружной (необогреваемой) поверхности тьюбинга, на которой в данном случае размещался слой теплоизоляции из минераловатных плит толщиной порядка 150 мм, что видно на рис. 4, *b*. Испытания показали, что предел огнестойкости образцов по потере несущей способности конструкции за время огневого воздействия продолжительностью 121 мин не был достигнут. Прогиб составил 31 и 33 мм для 1 и 2-го образца соответственно, что значительно ниже предельного значения (77 мм). Таким образом, предел огнестойкости исследуемого тьюбинга с огнезащитой плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 25 мм составляет не менее 121 мин, что соответствует классификации R 120. Внешний вид опытного образца после испытания представлен на рис. 5. Видно, что на отдельных участках отсутствует или отслоился первый (наружный) слой огнезащитной плиты. Для объективности следует отметить, что плиты после окончания испытаний еще длительное время подвергались оставшемуся тепловому воздействию огневой печи, а испытательная установка не позволяла осуществлять визуальный контроль за состоянием плит в ходе огневого воздействия.

Ранее огневые эксперименты для чугунных тьюбингов не проводились, для оценки ожидаемой огнестойкости приходилось ограничиваться расчетами. Однако и их объем (можно назвать публикации [15, 16]) был явно недостаточен. Проведение первых огневых испытаний чугунных тьюбингов позволило провести теплотехнический анализ их результатов с использованием данных измерения температуры на их необогреваемой поверхности. Осредненные температурные кривые для образцов тьюбинга без

огнезащиты представлены на рис. 6, а образцов с конструктивной огнезащитой — на рис. 9.

При расчетах температурных полей задавались теплофизические характеристики серого чугуна, заимствованные в [15, 16]: $\rho = 7100 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 52 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; $c = 502 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ($0 \text{ }^\circ\text{C}$), $523 \text{ (}160 \text{ }^\circ\text{C)}$, $553 \text{ (}260 \text{ }^\circ\text{C)}$, $586 \text{ (}360 \text{ }^\circ\text{C)}$, $620 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ($510 \text{ }^\circ\text{C}$). Но в отличие от [15, 16] использовалось значение степени черноты $\epsilon_n = 0,96$ (по рекомендации [22, 23] для шероховатого окисленного чугуна). Важность этого параметра в данном случае обусловлена тем, что на характер изменения и уровень температуры конструкции значительно влияет теплосъем с его наружной поверхности за счет излучения в окружающее пространство. Как следует из граничного условия (3), тепловой поток излучения зависит от уровня нагрева конструкции и степени черноты ее поверхности. Расчеты проводились для приведенной толщины металла испытываемого тьюбинга, равной 34,7 мм. Это значение находится в диапазоне значений приведенной толщины (от 31,7 до 35,9 мм), который обозначен в [11] в качестве характерного для тьюбингов из серого чугуна, используемых при строительстве тоннелей метрополитена.

Результаты расчетов прогрева рассматриваемого тьюбинга в условиях первого эксперимента представлены на рис. 6. Характер изменения расчетной зави-

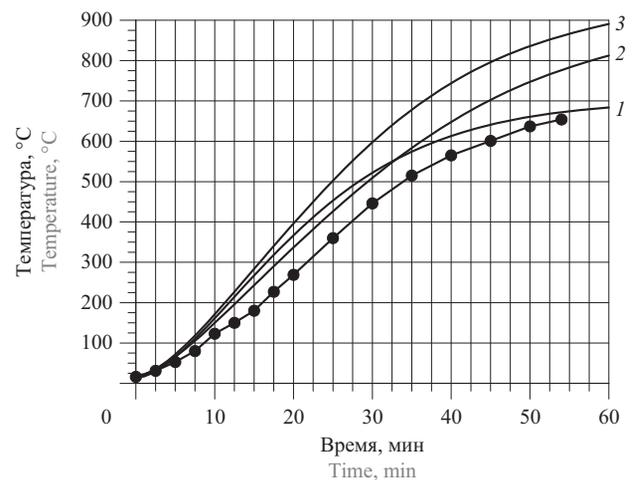


Рис. 6. Зависимости от времени температуры наружной (необогреваемой) поверхности чугунного тьюбинга без огнезащиты при стандартном температурном воздействии для незащищенной (открытой) наружной поверхности 1 при ее контактировании с грунтом 2 и в случае теплоизоляции минераловатными плитами 3; —●—●—●— измерения температуры в первом огневом эксперименте

Fig. 6. Dependences between the exposure time and the temperature of the external (unheated) surface of the cast-iron tubing (without fire protection) in the case of the standard temperature exposure of 1 an unprotected (open) external surface, 2 if the tubing is in contact with soil, and 3 if the tubing is insulated by mineral wool slabs; —●—●—●— temperature measurements in the first fire experiment

симости (1) соответствует экспериментальной, при этом расчетные значения температуры (что важно) не ниже, чем при испытаниях. К тому же они практически совпадают в завершающий (наиболее интересующий нас) период испытания. Отмеченное отличие свидетельствует о необходимости получения в дальнейшем более точной информации по температурным измерениям и ТФХ чугуна. Однако уже имеющиеся результаты представляют значительный интерес и могут использоваться для практики.

Не вызывает сомнений, что этот эксперимент продемонстрировал, каким является уровень критической температуры для рассматриваемого типа конструкции тьюбинга и при реализованном уровне и способе приложения нагрузок. Установлено, что предел огнестойкости тьюбинга 5,6-25-НУ, испытанного под воздействием постоянной статической нагрузки, равной 150 кН, составляет 54 мин. При этом зафиксирован рост температуры на его наружной поверхности до 654 °С к моменту нарушения целостности опытного образца. В данном случае это демонстрирует уровень критической температуры при данном приложении нагрузки. Следует отметить, что это несколько заниженное значение, и последующие огневые испытания могли бы дать более точные данные по критическим температурам для испытаний с одновременным приложением вертикальных и горизонтальных нагрузок. Как показали расчеты, имеется перепад температур. На нагреваемой поверхности при указанной приведенной толщине металла (34,7 мм) температура должна быть приблизительно на 14 градусов выше. Перепад, естественно, увеличивается для более массивных конструкций. Например, для приведенной толщины металла 50 мм он составляет 23 градуса.

Наличие ребер является дополнительным источником неравномерности температуры. Для соответствующих оценок использовалась упомянутая выше методика и программа в двумерной постановке. В результате расчетов поля температур для тьюбинга с толщиной спинки и центрального ребра, равной 32 мм, и высотой ребра 168 мм определено, что для 60-й минуты воздействия в условиях первого огневого эксперимента прогрев кончика ребра мог составить порядка 760 °С, а перепад температуры его по высоте более 70 °С. Отмечается также отличие температуры участков спинки тьюбинга на удалении от ребер от температуры в их основании. Неравномерность прогрева зависит от геометрии конструкции, условий нагрева на нагреваемых поверхностях и условий теплоотдачи с наружной (необогреваемой) поверхности. Естественно, такие особенности прогрева не могут не сказаться на пределе огнестойкости конструкции. При проведении статических расчетов

огнестойкости результаты таких теплотехнических расчетов следует учитывать.

Проведение расчетов в двумерной постановке во многих случаях можно сочетать или даже заменить расчетами в одномерной постановке и получать при этом достаточно надежные результаты. Результаты одномерных расчетов представлены в [15, 16], где они использовались для оценки уровня прогрева тьюбингов различной массивности и построения номограмм для оценки времени достижения конструкциями критических значений температур. Учитывалась теплопередача от тьюбингов в окружающий их грунт. Для этого в [16] рекомендовано рассматривать в качестве грунта сухой известняк, как имеющий минимальный коэффициент температуропроводности. В [16] представлены также соответствующие ТФХ известняка: $\rho = 2100 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 1,25 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $c = 920 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$. Рекомендовано проводить расчеты для слоя грунта толщиной до 300 мм.

Следуя этой логике, был проведен пересчет результатов оценки прогрева тьюбинга в первом эксперименте на случай его использования при натурной эксплуатации, т.е. при контактировании с окружающим тьюбинг грунтом (кривая 2 на рис. 6). Установлено, что уровень прогрева его наружной поверхности, зафиксированный перед разрушением испытываемых образцов (654 °С), в случае контакта с грунтом был бы достигнут значительно раньше (приблизительно на 42-й минуте). Это объясняется гораздо большим теплосъемом с необогреваемой поверхности опытного образца за счет излучения в окружающее пространство по сравнению с теплопередачей от тьюбинга в грунт. Поэтому при указанном уровне нагрузок в натуральных условиях фактический предел огнестойкости чугунного тьюбинга будет значительно ниже зафиксированного в эксперименте уровня (54 мин). Конструкция данного тьюбинга не будет соответствовать в натуральных условиях даже показателю R45, указанному в «Отчете» об огневых испытаниях.

Подобным образом можно смоделировать ситуацию, когда испытывался бы рассматриваемый опытный образец со слоем теплоизоляции из минераловатных плит толщиной 150 мм на его необогреваемой поверхности (как во втором огневом эксперименте). Расчеты проводились при значениях ТФХ теплоизоляции, указанных в [15, 16] для плит ROCKWOOL CONLIT SL 150: $\rho = 165 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0,0569 + 0,00011T \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $c = 752 + 0,63T \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$. Расчеты (см. кривую 3 на рис. 6) показали, что такой слой еще сильнее затрудняет теплопередачу от тьюбинга, в результате чего время его прогрева до указанной критической температуры (в данном случае 654 °С) было бы еще ниже, чем при моделировании теплопередачи в грунт, и прогнозируемый предел огнестойкости тьюбинга составил бы всего порядка 34 мин.

Указанный инструмент математического моделирования, примененный в ходе анализа рассмотренных экспериментальных данных, позволил провести теплотехнические расчеты с целью оценки уровня прогрева тубингов в зависимости от приведенной толщины металла и времени огневого воздействия по аналогии с расчетами, проведенными ранее авторами [15, 16] в одномерной постановке для варианта теплопередачи от тубингов в грунт (сухой известняк). Их результаты представлены в виде номограмм на рис. 7.

Подобные номограммы можно использовать для приближенных оценок огнестойкости чугунных тубингов различных типоразмеров. Однако, как отмечалось ранее, в некоторых случаях возникает необходимость проведения теплотехнических расчетов в двумерной постановке. Это позволяет учитывать неравномерность прогрева тубингов с конкретными размерами и конфигурацией, что может и должно учитываться при проведении статических расчетов огнестойкости. В качестве примера (рис. 8) представлены результаты таких расчетов. Они демонстрируют, что при учете теплопередачи от тубинга в грунт имеет место большая неравномерность прогрева конструкции по сравнению с рассмотренным выше случаем, когда при испытаниях происходит теплоотдача в окружающее пространство с открытой наружной поверхности тубинга.

Проведенные расчеты наглядно свидетельствуют, что практически во всех случаях при отсутствии огнезащиты не обеспечивается предел огнестойкости чугунных тубингов, имеющих типовые размеры, на уровне 60 мин (и, тем более, 90 мин). Это касается тубингов для перегонных тоннелей с заданным пределом огнестойкости 90 мин и даже тубингов для эскалаторов с пределом огнестойкости 60 мин. Следовательно, основное внимание при проведении огневых испытаний под нагрузкой и при проведении расчетов должно уделяться оценке и обеспечению заданной огнестойкости за счет использования рациональной огнезащиты.

Как отмечалось, в качестве варианта огнезащиты, способной повысить огнестойкость чугунных тубингов обделки до требуемого уровня, рассматривается использование конструктивной огнезащиты (облицовки) плитами «ПРОЗАСК Файерпанель». Кроме отмеченных ранее положительных качеств, отметим, что с ними уже проведено наибольшее (по сравнению с другими средствами огнезащиты) количество огневых испытаний конструкций под нагрузкой, подтвердивших работоспособность и огнезащитную эффективность как самих плит, так и элементов их крепления к защищаемым конструкциям. Это обусловлено оптимальными физико-механическими ха-

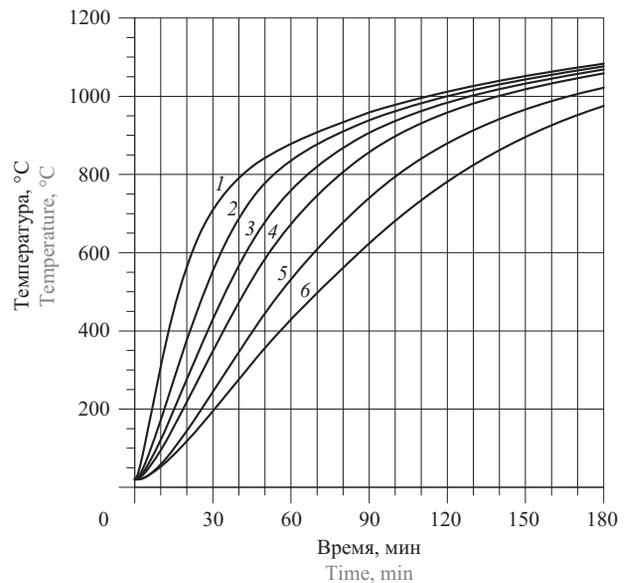


Рис. 7. Зависимости от времени температуры необогреваемой поверхности чугунного тубинга без огнезащиты для конструкций с приведенной толщиной металла, равной: 1 — 10 мм; 2 — 30 мм; 3 — 50 мм; 4 — 70 мм; 5 — 100 мм; 6 — 150 мм

Fig. 7. Dependences between the exposure time and the temperature of the unheated surface of cast-iron tubing (without fire protection) in constructions, featuring the reduced thickness of metal: 1 — 10 mm; 2 — 30 mm; 3 — 50 mm; 4 — 70 mm; 5 — 100 mm; 6 — 150 mm

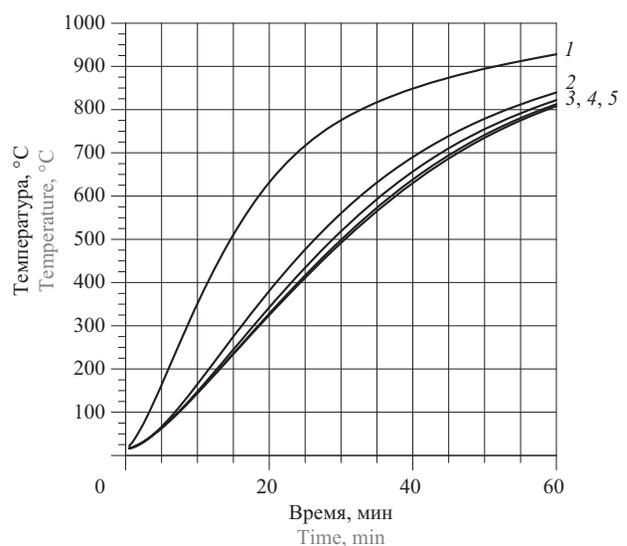


Рис. 8. Зависимости от времени температуры кончика (торца) ребра 1 тубинга толщиной 32 мм и температуры на необогреваемой поверхности спинки толщиной 32 мм у основания ребра 2, а также на удалении от него на 100 мм — 3; 200 мм — 4; 300 мм — 5 (огнезащита отсутствует)

Fig. 8. Dependences between the exposure time and the temperature of the tubing edge that is 32 mm thick 1, the temperature of the unheated back surface of the rib base area that is 32 mm thick 2 and the temperature at the distance of 100 mm — 3; 200 mm — 4; 300 mm — 5 from it; (no fire protection)

рактическими такими плит, позволяющими в течение значительного времени сохранять их целостность при огневом воздействии и существенном деформировании несущих конструкций вследствие силовых нагрузок. Отметим, что данный материал имеет согласованные с ГУП «Московский метрополитен» Технические условия ТУ 23.61.11-002-01595455-2018 «Система огнезащиты конструкций метрополитена плитами огнезащитными на цементном связующем с легким минеральным наполнителем, армированными с двух сторон стеклосеткой, негорючими, с односторонним защитным покрытием «ПРОЗАСК Файерпанель», что также позволило бы беспрепятственно применять их на объектах метрополитена.

В ходе анализа результатов второго огневого эксперимента проведена серия теплотехнических расчетов для чугунного тьюбинга с огнезащитой плитами. Использовались указанные ранее характеристики тьюбинга, а также предварительные данные по ТФХ цементных огнезащитных плит: коэффициент теплопроводности $0,391 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, удельная теплоемкость $1444 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, плотность 1100 кг/м^3 . Значения ТФХ для слоя теплоизоляции толщиной 150 мм принимались как для минераловатных плит ROCKWOOL CONLIT SL 150. Результаты расчетов прогрева рассматриваемого тьюбинга с огнезащитой в условиях второго эксперимента представлены на рис. 9.

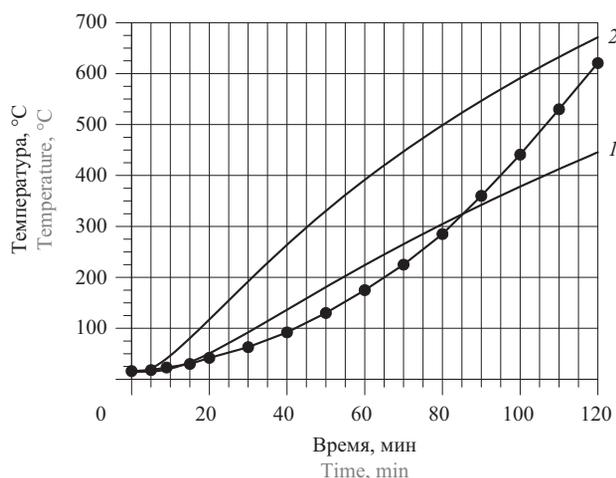


Рис. 9. Зависимости от времени температуры наружной поверхности чугунного тьюбинга с огнезащитой плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» при стандартном температурном с учетом наличия теплоизоляции наружной поверхности минераловатными плитами: расчет при толщине огнезащиты, равной 25 мм — 1 и $12,5 \text{ мм}$ — 2; —•—•—•— измерения температуры (под слоем изоляции) во втором огневом эксперименте

Fig. 9. Dependences between the exposure time and the temperature of the external surface of the cast-iron tubing, that has PROZASK fire panels, at the standard temperature: the calculation is made for the case when the fire insulation layer is 25 mm thick — 1 and 12.5 mm thick — 2; —•—•—•— temperature measurements (under the insulation layer) in the second fire experiment

Сопоставление расчетной кривой 1 с экспериментальной показало, что расчетные значения температуры конструкции до $85\text{--}90$ -й минуты не ниже, чем при испытаниях (что важно). К тому же они практически совпадают в наиболее интересующий нас период испытания (90 -я минута). После 90 -й минуты отмечается некоторое, а, в дальнейшем, значительное занижение расчетных температур по сравнению с экспериментальными. Такое расхождение может быть объяснено частичным нарушением целостности огнезащиты в завершающий период испытания (появление щелей между огнезащитой и тьюбингом, а также между плитами, отслоение наружного слоя плит), что и было отмечено при осмотре образцов после испытаний и показано на рис. 5. Косвенным подтверждением сказанного является кривая 2 на рис. 9. Она демонстрирует, что для толщины огнезащиты, в два раза меньшей ($12,5 \text{ мм}$ вместо 25 мм), т.е. при отсутствии одного слоя плит уровень прогрева наружной поверхности тьюбинга был бы значительно выше и в период окончания испытания (120 -я минута) мог бы оказаться на уровне, зафиксированном при термометрических измерениях. Понятно, что в условиях деформирования исследуемого образца в огнезащите происходят сложные процессы, зафиксировать и объяснить которые затруднительно. Однако результаты данного эксперимента подтверждают необходимость проведения испытаний конструкций с огнезащитой при нагрузках, поскольку только они способны объективно подтвердить ее работоспособность.

В целом результаты второго эксперимента свидетельствуют об эффективности рассматриваемого варианта конструктивной огнезащиты, которая позволяет с большим запасом обеспечить предел огнестойкости 90 мин , задаваемый для чугунных тьюбингов обделки перегонных тоннелей. Эксперимент был прекращен на 121 -й мин без нарушения целостности образца и без превышения критической величины прогиба конструкции. Фиксация температуры тьюбинга показала, что только на 121 -й минуте она приблизилась (оставаясь ниже) к уровню критической температуры ($636 \text{ }^\circ\text{C}$), обозначенной в [15, 16] в качестве характерной для конструкций из чугуна.

Кроме того, следует отметить, что имеется еще один фактор, свидетельствующий, что соответствие тьюбинга классификации R120 установлено со значительным запасом. Это связано с тем, что уровень прогрева наружной поверхности тьюбинга, зафиксированный при окончании эксперимента ($625 \text{ }^\circ\text{C}$), в натурных условиях, т.е. в случае контакта тьюбинга с окружающим его грунтом, был бы значительно ниже, чем в эксперименте. Связано это, как отмечалось, с различием ТФХ для грунта и теплоизоляции,

используемой при испытаниях. Теплопередача от тьюбинга в грунт существенно выше, чем при использовании теплоизоляции.

Таким образом, даже один огневой эксперимент продемонстрировал работоспособность и высокую эффективность конструктивной огнезащиты плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» и показал принципиальную возможность обеспечения требуемого предела огнестойкости тьюбингов (90 мин) толщинах огнезащиты меньше 25 мм. В ходе анализа результатов этого, а также первого огневого эксперимента продемонстрированы возможности теплотехнических расчетов и показана необходимость их использования при обеспечении огнезащиты и заданной огнестойкости рассматриваемых конструкций.

Теплотехнические расчеты в двумерной постановке, которые также проводились в ходе анализа, показали, что в том случае, когда вся поверхность тьюбинга перекрыта огнезащитой, включая и торцы ребер, неравномерность прогрева относительно невелика, и могут проводиться расчеты в одномерной постановке. Иная ситуация, когда не допускается уменьшение внутреннего диаметра обделки тоннеля и торцы ребер остаются незащищенными. В этом случае неизбежен неравномерный нагрев тьюбинга, и крайне желательно проведение расчетов в двумерной постановке.

Подобная ситуация рассмотрена в [16], где предложен вариант огнезащиты из минераловатных плит ROCKWOOL CONLIT SL 150. Этот вариант предусматривал размещение плит на поверхности полки (спинки) и по боковой поверхности ребер. При этом внутренний диаметр обделки тоннеля не уменьшался и допускался нагрев открытых торцов ребер. В [17] рассматриваются результаты двух расчетов в одномерной постановке: для определения температуры ребер без огнезащиты (приведенная толщина металла принята равной высоте ребра) и температуры зон с огнезащитой (приведенная толщина металла равняется толщине спинки). Далее проводилось определение средней температуры тьюбинга. По результатам расчетов построены номограммы.

Такой подход и подобные номограммы, естественно, могут использоваться. Но когда происходит неравномерный нагрев конструкции, как в случае с незащищенными торцами ребер, более целесообразны расчеты в двумерной постановке. Они востребованы как для оценки эффективности огнезащиты, так и для оценки огнестойкости конструкций. На рис. 10 в качестве примера представлены результаты прогрева тьюбинга с вариантом огнезащиты, предложенным в [16].

Полученные результаты демонстрируют бóльший уровень средней температуры тьюбинга по сравнению с [16], а также значительный уровень прогрева ребра у его открытого торца. Отмечается, что недостатком

рассмотренного в статье способа огнезащиты является сложность обеспечения крепления плит на внутреннюю поверхность тьюбингов, а также отсутствие влагостойкости данной системы при практически повсеместных водопрооявлениях в тоннелях. В этом плане прошедший огневые испытания под нагрузкой способ огнезащиты плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» имеет преимущества. Однако, если обязательным условием будет недопущение уменьшения внутреннего диаметра обделки тоннеля, может быть предложен вариант конструктивного исполнения (крепления) с использованием плит «ПРОЗАСК Файерпанель» «заподлицо» (при изменении конструкции подкаркаса путем уменьшения высоты его вертикальных полок) или на незначительном отдалении от незащищенных торцов ребер. При таком варианте монтажа плит уровень прогрева тьюбинга будет даже несколько ниже, что видно из сопоставления результатов расчетов для плиты ROCKWOOL CONLIT толщиной 20 мм на рис. 10 и 11.

Если рассматривать вариант огнезащиты с ее размещением по аналогии с [16] по всей внутренней поверхности тьюбинга, то более рациональным представлялось бы использование не плит, а рулонных огнезащитных материалов. Но в таком случае мы также столкнулись бы с отсутствием эксплуатационной долговечности таких материалов по причине отсутствия их стойкости к намоканию. В качестве такой

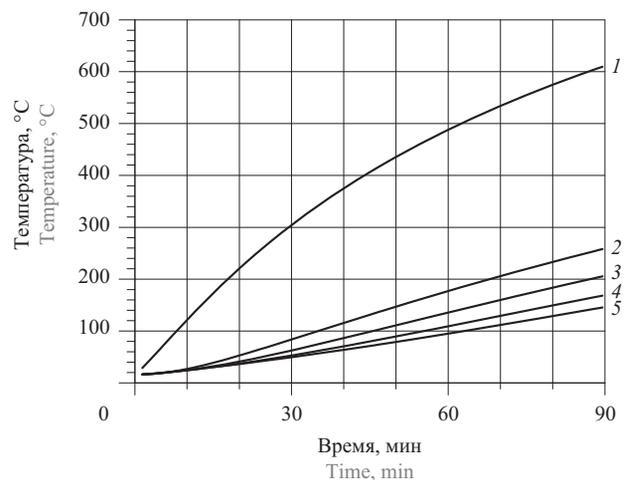


Рис. 10. Зависимости от времени температуры открытого торца ребра 1 тьюбинга и температуры на необогреваемой поверхности спинки у основания ребра 2, а также на удалении от него на 100 мм — 3; 200 мм — 4; 300 мм — 5 (огнезащита боковой поверхности ребер и спинки плитами ROCKWOOL CONLIT толщиной 20 мм)

Fig. 10. Dependences between the exposure time and the temperature of the open tubing edge 1, the temperature of the unheated back surface of the edge base 2, as well as at a distance of 100 mm — 3; 200 mm — 4; 300 mm — 5 from it (the side surfaces of edges and the back are protected by ROCKWOOL CONLIT plates 20 mm thick)

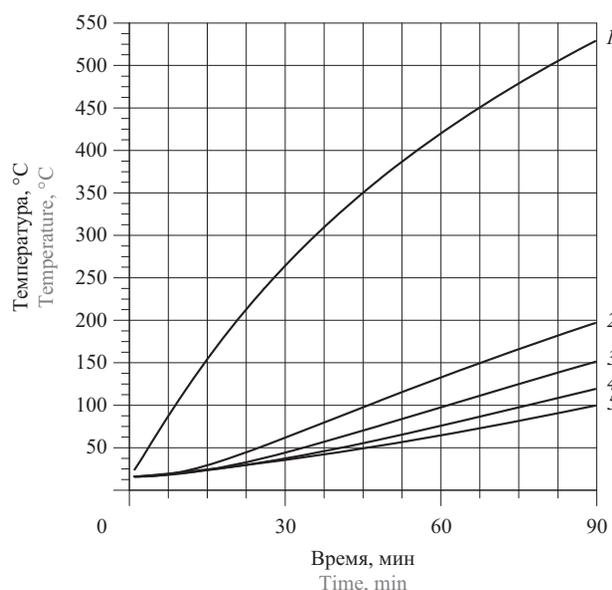


Рис. 11. Зависимости от времени температуры открытого торца ребра 1 тьюбинга и температуры на необогреваемой поверхности спинки у основания ребра 2, а также на удалении от него на 100 мм — 3; 200 мм — 4; 300 мм — 5 (огнезащита плитой ROCKWOOL CONLIT толщиной 20 мм, расположенной параллельно спинке «заподлицо» с открытой поверхностью ребра)

огнезащиты, мы можем рассмотреть материал МБОР (базальтоволокнистый огнезащитный рулонный фольгированный), который крепится к защищаемой поверхности клеевым огнезащитным составом на неорганической основе «ПЛАЗАС». На рис. 12 представлены результаты расчетов для такого варианта огнезащиты. Они проведены для слоя огнезащиты толщиной 20 мм (МБОР-20Ф). Использовались следующие теплофизические характеристики: $\rho = 110 \text{ кг/м}^3$; $c = 1000 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$; $\lambda = 0,032 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ (273K); $0,052 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ (398K); $0,09 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ (573K); $0,122 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ (573K); $0,36 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ (1473K). Нарис. 12 получен несколько ббльший уровень нагрева, чем на рис. 10, что объясняется различием ТФХ материалов. Однако вариант использования рулонного материала МБОР-20Ф с клеевым составом «ПЛАЗАС» представляется более предпочтительным по технологическим соображениям по сравнению с вариантом использования огнезащитных минераловатных плит.

Кроме того, с помощью теплотехнических расчетов можно проводить прогнозирование огнестойкости чугунных тьюбингов при режимах огневого воздействия, отличающихся от стандартного температурного режима. Используемые в ходе анализа методики расчетов в одномерной и двумерной поста-

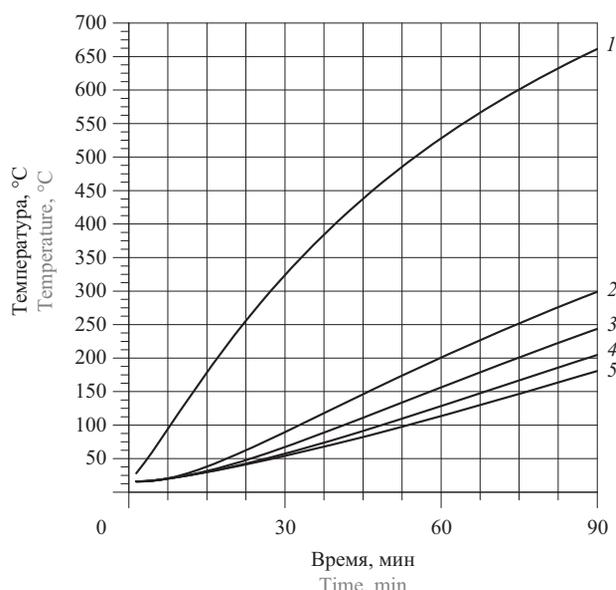


Рис. 12. Зависимости от времени температуры открытого торца ребра 1 тьюбинга и температуры на необогреваемой поверхности спинки у основания ребра 2, а также на удалении от него на 100 мм — 3; 200 мм — 4; 300 мм — 5 (огнезащита боковой поверхности ребер и спинки огнезащитой на основе рулонного материала МБОР-20Ф толщиной 20 мм)

Fig. 12. Dependences between the exposure time and the temperature of the open edge 1 of the tubing and the temperature of the unheated surface of the back at the edge base 2, as well as at a distance of 100 mm — 3; 200 mm — 4; 300 mm — 5 from it (the side surface of the edge and back are protected by the roll material MBOR-20F 20 mm thick)

новке предоставляют такие возможности. Например, можно проводить оценки пределов огнестойкости в условиях воздействия по режиму горения углеводородного горючего по ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014. Могут задаваться также режимы, параметры которых определяются в ходе крупномасштабных экспериментов или в ходе расчетов по соответствующим методикам для вероятного сценария развития аварийной ситуации в тоннеле метрополитена.

Ниже представлены результаты серии расчетов, проведенных для рассматриваемого чугунного тьюбинга с приведенной толщиной металла 34,7 мм при огневым воздействии по одному из режимов пожара в тоннеле метрополитена. Изменение от времени температуры газовой среды для этого режима представлено на рис. 13 (кривая 1). Приведенная кривая получена в ходе математического моделирования для одного из вероятных сценариев развития аварийной ситуации в тоннеле с использованием полученной в [24] временной зависимости изменения от времени мощности пожара в одном вагоне метрополитена, учитывающей особенности процесса горения в его ограниченном объеме тоннеля.

Прежде всего были проведены расчеты в одномерной постановке для тьюбинга без огнезащиты,

в результате которых получены зависимости от времени температуры на внутренней и наружной (контактирующей с грунтом) поверхности тьюбинга (кривые 2 на рис. 13). Для данного (немонотонного) режима в соответствующие моменты времени температура газовой среды ниже, чем при стандартном режиме. Поэтому, естественно, и уровень прогрева тьюбинга оказался ниже, чем при стандартном режиме (см. рис. 8).

В данном случае прогнозируется максимальный уровень нагрева тьюбинга (860 °С) на 110-й минуте. Критический (для конструкций из чугуна при данном приложении нагрузки) уровень температуры, указанный ранее (636 °С), достигается на 90-й минуте, а критический уровень, зафиксированный в ходе первого огневого эксперимента во ВНИИПО (654 °С), достигается на 92-й минуте. После этого уровень прогрева существенно снижается. Кажется бы, это — хороший результат, но при этом следует учесть, что приложенные вертикальные нагрузки во время огневых испытаний относительно невелики, поскольку условно соответствовали глубине заложения тью-

бингов не более 10 м. К тому же законодательство требует проведения расчетов при стандартных огневых нагрузках. Поэтому данные расчеты невозможно распространить в целом на все объекты метрополитена.

При этом еще одним из неисследованных вопросов является поведение металлических деталей болтовых соединений в обделках при температурах, превышающих 500 °С. Такие температуры сами по себе являются условно критическими для стальных конструкций, но кроме этого следует учесть, что работа соединения, например, на срез часто сильно осложнена несоответствиями форм болтов и стенок отверстия, что еще больше затрудняет расчеты, особенно на огнестойкость болтовых соединений.

Также следует учесть, что расчеты сделаны для приведенной толщины металла на уровне 35 мм, т.е. не для всех типов чугунных тьюбингов.

Для данного режима огневого воздействия проведены также расчеты для тьюбинга с огнезащитой плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 12,5 и 25 мм, т.е. с одним и двумя слоями облицовки (см. рис. 13). Они показали, что использование такой огнезащиты с гарантированным запасом обеспечивает огнестойкость чугунного тьюбинга. Также следует отметить, что применение огнезащиты повышает и огнестойкость болтовых соединений, выполненных из стали. Подобным образом может проводиться моделирование (прогнозирование) уровня прогрева тьюбингов метрополитена при любых вероятных режимах и продолжительности пожара.

Выводы

Проведен детальный теплотехнический анализ результатов двух огневых экспериментов, впервые проведенных для оценки огнестойкости чугунных тьюбингов обделки тоннелей при действии выбранных при испытаниях нагрузок. Анализ позволил получить значительный объем важной информации, представляющей несомненный практический интерес для обеспечения огнезащиты и заданной огнестойкости указанных ответственных конструкций и дальнейшего развития данного важного направления экспериментальных и теоретических исследований.

Представленные в статье данные демонстрируют, что теплотехнические расчеты являются эффективным инструментом для выбора материалов, оценки эффективности и толщин огнезащиты еще до проведения огневых испытаний чугунных тьюбингов. Причем прогнозирование эффективности огнезащиты и огнестойкости конструкций может проводиться для различных режимов огневого воздействия. Полученные таким образом результаты могут учитываться при оценках огнестойкости рассматриваемых несущих конструкций в ходе статических расчетов.

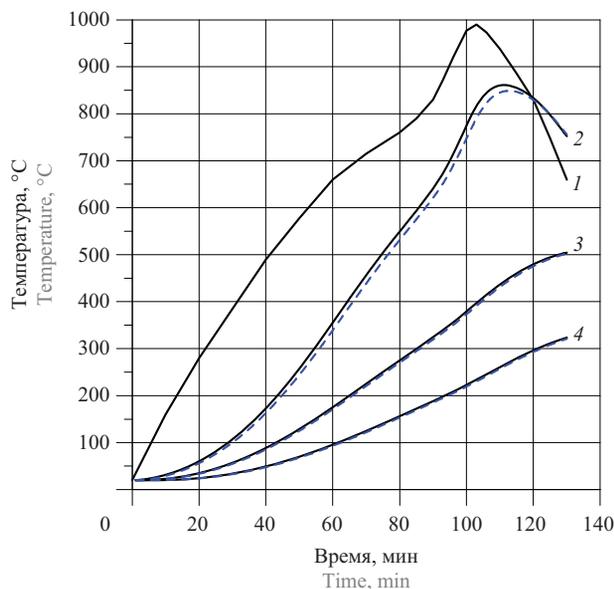


Рис. 13. Один из вероятных режимов пожара в тоннеле метрополитена 1 и зависимости от времени температуры наружной (контактирующей с грунтом) поверхности чугунного тьюбинга без огнезащиты 2 и с огнезащитой при толщине облицовки из плит «ПРОЗАСК Файерпанель», равной 12,5 мм — 3 и 25 мм — 4. Для кривых 2–4: ———— — внутренняя поверхность тьюбинга, - - - - - — наружная поверхность тьюбинга

Fig. 13. One of probable fire regimes in a subway tunnel 1 and dependences between the exposure time and temperature of the external (in contact with soil) surface of the castiron tubing that has no fire protection 2 and if the fire protection by PROZASK fire panels, whose thickness is 12.5 mm — 3 and 25 mm — 4, is available. For curves 2–4: ———— — the inner surface of the tubing, - - - - - — the external surface of the tubing

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Голованов В.И., Пехотиков А.В., Павлов В.В., Новиков Н.С. Огневые испытания тьюбингов тоннельной обделки // Пожарная безопасность. 2019. № 4 (97). С. 50–55. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41442482>
2. Голованов В.И., Пехотиков А.В., Новиков Н.С., Павлов В.В., Кузнецова Е.В. Огнестойкость железобетонных тьюбингов подземных сооружений с полипропиленовой фиброй // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 5. С. 60–70. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.60-70
3. Kordina K. Brände in unterirdischen Verkehrsanlagen // Bautechnik. 2003. Nr. 80. Heft 5. Pp. 327–338. DOI: 10.1002/bate.200302620
4. 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
5. 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
6. 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. Pp. 1–10.
7. Pagani E., Cassani G. Terzo valico dei Giovi: Milan-Genoa high speed/High capacity line // Proceedings of Swiss Tunnel Congress, Luzern, 2016. Pp. 48–57.
8. Chiarini M., Lunard 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.
9. Fire testing procedure for concrete tunnel and other tunnel components // Report No. Efectis-R0695:2020. EfectisNederland BV, 2020. Pp. 1–46.
10. Меркин В.Е., Зерцалов М.Г., Петрова Е.Н. Подземные сооружения транспортного назначения : учеб. пос. М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. 432 с.
11. Porter A., Wood C., Fidler J., McCaig I. The behavior of structural cast iron in fire // English Heritage Transaction. 1998. Vol. 1. Pp. 11–20.
12. Maraveas C., Wang Y.C., Swailes T., Sotiriadis G. An experimental investigation of mechanical properties of structural cast iron at elevated temperatures and after cooling down // Fire Safety Journal. 2015. Vol. 71. Pp. 340–352. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.026
13. Maraveas C., Wang Y.C., Swailes T. Fire resistance of 19th century fireproof flooring systems: A sensitivity Analysis // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 55. Pp. 69–81. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.01.022
14. Maraveas C., Wang Y.C., Swailes T. Elevated temperature behavior and fire resistance of cast iron columns // Fire Safety Journal. 2016. Vol. 82. Pp. 37–48. DOI: 10.1016/j.firesaf.2016.03.004
15. Голиков А.Д., Черкасов Е.Ю., Данилов А.И., Сиваков И.А. Предел огнестойкости конструкций чугунных тоннельных обделок метрополитена без огнезащитных покрытий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2014. Т. 23. № 12. С. 20–27. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25866626>
16. Голиков А.Д., Черкасов Е.Ю., Данилов А.И., Сиваков И.А. Способ огнезащиты обделки транспортных тоннелей из чугунных тьюбингов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 12. С. 22–29. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.22-29
17. 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.
18. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В. Инженерный метод расчета огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой плитами КНАУФ-Файерборд // Пожарная безопасность. 2016. № 3. С. 171–179. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26731725>
19. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В. Огнезащита стальных конструкций плитным материалом PYRO-SAFE AESTUVER T // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 11. С. 60–70. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.8-16
20. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1988. 143 с.
21. Страхов В.Л., Гаращенко А.Н., Рудзинский В.П. Программные комплексы для расчетов тепло-массопереноса 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.
22. Исаченко В.П., Осипов В.А., Сукомел А.С. Теплопередача : учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Энергия, 1974. 488 с.
 23. Володин Ю.Г., Дульнев Г.Н. Исследование конвективного теплообмена в замкнутом пространстве // Инженерно-физический журнал. 1965. Т. 9. № 5. С. 603–608.
 24. Данилов А.И., Маслак В.А., Вагин А.В., Сиваков И.А. Численное моделирование пожара в вагоне метрополитена // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 10. С. 27–35. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.27-35

REFERENCES

1. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V., Novikov N.S. Fire tests of tunnel lining tubings. *Pozharnaja bezopasnost/Fire Safety*. 2019; 4(97):50-55. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41442482> (rus).
2. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V., Novikov N.S. Fire resistance of reinforced concrete tubings of underground structures with polypropylene fiber. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(5):60-70. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.60-70 (rus).
3. Kordina K. Brände in unterirdischen Verkehrsanlagen. *Bautechnik*. 2003; 80(5):327-338. DOI: 10.1002/bate.200302620
4. Dehn F., Werther N., Knitl J. Großbrandversuche für den city-tunnel Leipzig. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2006; 101(8):631-635. DOI: 10.1002/best.200608186
5. 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
6. Emmanuel Annerel, Kees Boch, Tony Lemaire. 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*. 2015; 1-10.
7. Pagani E., Cassani G. Terzo valico dei Giovi: Milan-Genoa high speed/High capacity line. *Proceedings of Swiss Tunnel Congress, Luzern, 2016*. 2016; 48-57.
8. 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*. 2017; 1-10.
9. Fire testing procedure for concrete tunnel and other tunnel components. *Report No. Efectis-R0695:2020. EfectisNederland BV, 2020*; 1-46.
10. Merkin V.E., Zertsalov M.G., Petrova E.N. Underground structures for transport purposes : textbook. Moscow, Vologda, Infra-Engineering, 2020; 432.
11. Porter A., Wood C., Fidler J., McCaig I. The behavior of structural cast iron in fire. *English Heritage Transaction*. 1998; 1:11-20.
12. Maraveas C., Wang Y.C., Swailes T., Sotiriadis G. An experimental investigation of mechanical properties of structural cast iron at elevated temperatures and after cooling down. *Fire Safety Journal*. 2015; 71:340-352. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.026
13. Maraveas C., Wang Y.C., Swailes T. Fire resistance of 19th century fireproof flooring systems: A sensitivity analysis. *Construction and Building Materials*. 2014; 55:69-81. DOI: 10.1016/J.CONBUILD-MAT.2014.01.022
14. Maraveas C., Wang Y.C., Swailes T. Elevated temperature behavior and fire resistance of cast iron columns. *Fire Safety Journal*. 2016; 82:37-48. DOI: 10.1016/j.firesaf.2016.03.004
15. Golikov A.D., Cherkasov E.Yu., Danilov A.I., Sivakov I.A. Fire resistance of cast iron tunnel lining without fireproof covering. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and explosion safety*. 2014; 23(12):20-27. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25866626> (rus).
16. Golikov A.D., Cherkasov E.Yu., Danilov A.I., Sivakov I.A. Method fire protection of cast iron tunnel lining. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(12):22-29. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.22-29 (rus).
17. Pronin D.G., Timonin S.A., Golovanov V.I. STO ARSS 11251254.001-018-03. Design of fire protecting loaded steel constructions using different facings. Moscow, ARSS, 2018; 70. (rus).
18. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Engineering method for designing fire resistance of steel constructions protected by KNAUF-Fireboard plates. *Pozharnaja bezopasnost/Fire Safety*. 2016; 3:171-179. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26731725> (rus).

19. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Fire protection of steel structures with slab material PYRO-SAFE AESTUVER T. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(11):60-70. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.8-16 (rus).
20. Yakovlev A.I. *Calculation of fire resistance of building constructions*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988; 143. (rus).
21. 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. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2001; 10(4):9-11. (rus).
22. Isachenko V.P., Osipov V.A., Sukomel A.S. Heat transfer. Textbook for universities. 3rd ed., rev. and exp. Moscow, Energy Publ., 1974; 488. (rus).
23. Volodin Yu.G., Dulnev G.N. Investigation of convective heat transfer in a closed space. *Engineering and Physics Journal*. 1965; 9(5):603-608. (rus).
24. Danilov A.I., Maslak V.A., Vagin A.V., Sivakov I.A. Numerical simulation of a subway car fire. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(10):27-35. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.27-35 (rus).

Поступила 09.12.2021, после доработки 28.01.2022; принята к публикации 02.02.2022
Received December 9, 2021; Received in revised form January 28, 2022; Accepted February 2, 2022

Информация об авторах

ГАРАЩЕНКО Анатолий Никитович, д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Центр исследований опасных факторов пожаров, Россия, 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Марата, 51; ORCID: 0000-0002-8143-944X; e-mail: a.n.gar@mail.ru

ДАНИЛОВ Андрей Игоревич, генеральный директор, Центр исследований опасных факторов пожаров, Россия, 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Марата, 51; ORCID: 0000-0002-9162-7073; e-mail: danilov@ciofp.ru

АНТОНОВ Сергей Порфирьевич, генеральный директор, ПРОЗАСК, Россия, 107564, г. Москва, ул. Краснобогатырская, 42, стр. 1; ORCID: 0000-0002-2664-1397; e-mail: asp@prozask.ru

МАРЧЕНКОВА Светлана Васильевна, канд. экон. наук, доцент кафедры городского кадастра, Государственный университет по землеустройству, 105064, Москва, ул. Казакова, 15; ORCID: 0000-0002-2592-6366; e-mail: s.v.marchenkova@yandex.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

Вклад авторов:

Гаращенко А.Н. — научное руководство, участие в анализе экспериментальной информации, проведение и анализ результатов расчетов, написание исходного текста, итоговые выводы.

Information about the authors

Anatoliy N. GARASHCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Leading Researcher, Research Center of Hazardous Fire Factors, Marata St., 51, Saint-Petersburg, 191002, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8143-944X; e-mail: a.n.gar@mail.ru

Andrey I. DANILOV, Director, Research Center of Hazardous Fire Factors, Marata St., 51, Saint-Petersburg, 191002, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9162-7073; e-mail: danilov@ciofp.ru

Sergey P. ANTONOV, Director, PROZASK, Krasnobogatyrskaya St., 42, bld. 1, Moscow, 107564, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2664-1397; e-mail: asp@prozask.ru,

Svetlana V. MARCHENKOVA, Cand. Sci. (Econ.), Assistant Professor, City Cadastre Department, State University of Land Use Planning, Kazakova St., 15, Moscow, 105064, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2592-6366; e-mail: s.v.marchenkova@yandex.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

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.

Данилов А.И. — концепция исследования, организация и участие в проведении огневых экспериментов, анализ экспериментальной информации, доработка текста, итоговые выводы.

Антонов С.П. — участие в организации и проведении огневых экспериментов, участие в анализе экспериментальной информации, доработка текста.

Марченкова С.В. — участие в подготовке концепции исследования, участие в анализе экспериментальной информации, участие в подготовке итоговых выводов.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Sergey P. Antonov — participation in the organization and conduct of firing experiments, participation in the analysis of experimental information, revision of the text.

Svetlana V. Marchenkova — participation in the preparation of the research concept, participation in the analysis of experimental information, participation in the preparation of final conclusions.

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

The authors declare no conflicts of interests.