

Огнестойкость железобетонных тубингов подземных сооружений с полипропиленовой фиброй

© В. И. Голованов✉, А. В. Пехотиков,
Н. С. Новиков, В. В. Павлов, Е. В. Кузнецова

Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны
МЧС России (Россия, 143903, г. Балашиха Московской обл., мкр. ВНИИПО, 12)

РЕЗЮМЕ

Введение. Железобетонные конструкции из тяжелого бетона повышенной влажности (более 3,5 %) имеют склонность к взрывообразному разрушению, которое может привести к преждевременному наступлению предела огнестойкости таких конструкций и частичному или полному обрушению зданий и сооружений. Повышенная влажность железобетонных конструкций обычно встречается в подземных сооружениях и во вновь возводимых зданиях. Огнестойкость железобетонных тубингов подземных сооружений в значительной степени зависит от взрывообразного (хрупкого) разрушения бетона при воздействии высоких температур пожара на поверхность отделки тоннеля.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования были выбраны железобетонные тубинги из тяжелого бетона влажностью 6 % с добавкой полипропиленовой фибры в количестве 1 кг/м³. Проведены крупномасштабные огневые испытания на специально изготовленном стенде при нагружении образцов вертикальной и горизонтальной нагрузкой.

Результаты и обсуждение. Представлены основные результаты экспериментального исследования огнестойкости железобетонных тубингов с добавкой полипропиленовой фибры и без нее. По результатам установлено, что предел огнестойкости железобетонного тубинга с добавкой полипропиленовой фибры согласно ГОСТ 30247.0–94 составил не менее 125 мин (REI 120). Разработана аналитическая модель оценки огнестойкости. Для решения теплотехнической задачи проведен численный эксперимент с помощью программного комплекса “ANSYS”. Предложена аналитическая зависимость определения дополнительного температурного прогиба для геометрически нелинейного элемента. Расчет предела огнестойкости железобетонного тубинга с добавкой полипропиленовой фибры по разработанной аналитической модели с учетом ранее полученных прочностных и теплотехнических характеристик подтвердил результаты огневых испытаний: предел огнестойкости составил REI 120.

Заключение. Использование для ограждающих конструкций тоннеля железобетонных тубингов из фибробетона с полипропиленовой фиброй позволит значительно снизить затраты на устройство огнезащиты и сократить сроки строительства.

Ключевые слова: стандартный температурный режим пожара; теплотехническая задача; статическая (прочностная) задача; взрывообразное (хрупкое) разрушение бетона; отделка тоннеля.

Для цитирования: Голованов В. И., Пехотиков А. В., Новиков Н. С., Павлов В. В., Кузнецова Е. В. Огнестойкость железобетонных тубингов 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.

✉ Голованов Владимир Ильич, e-mail: pavelgol1@yandex.ru

Fire resistance of reinforced concrete tubings of underground structures with polypropylene fiber

© Vladimir I. Golovanov✉, Andrey V. Pekhotikov,
Nikolay S. Novikov, Vladimir V. Pavlov, Elena V. Kuznetsova

All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia
(VNIIPPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. Reinforced concrete structures made of heavy concrete of high humidity (more than 3.5 %) are prone to explosive destruction. This phenomenon can lead to premature onset of the fire resistance of such structures and the partial or complete collapse of buildings and structures. The increased humidity of reinforced concrete structures is usually found in underground structures and newly constructed buildings. The fire resistance of reinforced concrete tubes of underground structures largely depends on the explosive (brittle) destruction of concrete when exposed to high temperatures of fire on the surface of the tunnel lining.

Materials and methods. As the object of the study were selected reinforced concrete tubes of heavy concrete with a moisture content of 6 % with the addition of polypropylene fiber in the amount of 1 kg/m³. Large-scale fire tests were carried out on a specially manufactured test bench when loading samples with vertical and horizontal loads.

Results and discussion. The main results on the study of fire resistance of reinforced concrete tubes with the addition of polypropylene fiber and without additives are presented. According to the results of experimental studies, it was established that the fire resistance limit of reinforced concrete tubing with the addition of polypropylene fiber according to GOST 30247.0–94 was at least 125 minutes (REI 120). The analytical model of fire resistance assessment is developed. To solve the thermal engineering problem, a numerical experiment was performed in the ANSYS software package. An analytical dependence is proposed for determining an additional temperature deflection for a geometrically nonlinear element. The calculation of the fire resistance limit of reinforced concrete tubing with the addition of polypropylene fiber according to the developed analytical model, considering the previously obtained strength and thermal characteristics, confirmed the results of fire tests, and amounted to REI 120.

Conclusion. The use of reinforced concrete tubing made of fiber-reinforced concrete with polypropylene fiber for building envelopes will significantly reduce the cost of a fire protection device and shorten the construction time.

Keywords: standard temperature fire; thermal engineering problem; static (strength) problem; explosive (brittle) concrete destruction; tunnel lining.

For citation: V. I. Golovanov, A. V. Pekhotikov, N. S. Novikov, V. V. Pavlov, E. V. Kuznetsova. Fire resistance of reinforced concrete tubings of underground structures with polypropylene fiber. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 5, pp. 60–70 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.60-70.

✉ Vladimir Ilich Golovanov, e-mail: pavelgol1@yandex.ru

Введение

Железобетонные конструкции из тяжелого бетона повышенной влажности (более 3,5 %) имеют склонность к взрывообразному разрушению. Данное явление может привести к преждевременному наступлению предела огнестойкости несущих железобетонных конструкций и, как следствие, к частичному или полному обрушению зданий и сооружений. Повышенная влажность таких конструкций обычно встречается в подземных сооружениях и во вновь возводимых зданиях.

Исследования по защите железобетонных конструкций от взрывообразного разрушения бетона [1–6] проводились в ряде европейских стран. Добавка в бетонную смесь полипропиленовой фибры [7–13] является наиболее эффективным способом защиты железобетонных конструкций от взрывообразного разрушения.

Однако при добавке фибры в состав бетонной смеси изменяются физико-механические и тепло-технические характеристики бетона, которые очень важны при оценке огнестойкости железобетонных конструкций расчетными методами. Значения этих характеристик были получены в ранее проведенных исследованиях.

Так как полипропиленовая фибра предотвращает взрывообразное разрушение бетона, целесообразно применять данный материал на таких объектах, как подземные сооружения, влажность конструкций которых может превышать пороговые значения. Основными конструкциями подобных сооружений являются железобетонные туннели, которые образуют обделку тоннеля и используются для прокладки в грунте автодорожных тоннелей и метрополитена. Обеспечение пожарной безопасности таких объектов — важная народнохозяйственная задача, целью которой является обеспечение достаточной

несущей способности конструкций при воздействии пожара, а актуальность этих исследований обуславливается перевозкой большого количества людей, пожароопасных грузов и т. д. [14, 15]. Несущая способность конструкций при воздействии пожара обеспечивается достаточными пределами огнестойкости железобетонных конструкций, которые оцениваются как экспериментальными, так и расчетными методами.

Экспериментальные методы позволяют посредством крупномасштабных огневых испытаний оценить огнестойкость конструкции и наглядно рассмотреть ее поведение в условиях пожара. Однако данный метод является трудоемким и экономически затратным.

При рассмотрении существующих расчетных методов установлено, что ни один из них не позволяет производить расчет огнестойкости железобетонных туннелей.

В то же время в соответствии с ГОСТ 30247.0–94 (Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования) расчетные методы для оценки огнестойкости конструкций должны быть подтверждены результатами экспериментов для конструкций, аналогичных по форме, материалам и конструктивному исполнению. В соответствии с этим были проведены крупномасштабные огневые эксперименты с туннелями тоннельной обделки.

Целью исследований является:

- 1) определение влияния добавки полипропиленовой фибры в бетонную смесь железобетонного туннеля тоннельной обделки на предотвращение взрывообразного разрушения бетона с влажностью 6 %;
- 2) установление предела огнестойкости железобетонного туннеля с добавкой полипропиленовой фибры;

3) разработка методики расчета огнестойкости железобетонных тубингов с добавкой полипропиленовой фибры с учетом полученных ранее физико-механических и теплотехнических характеристик фибробетона.

Материалы и методика проведения эксперимента

Образцы железобетонных тубингов для проведения эксперимента изготавливались из тяжелого бетона на заводе ОАО “Моспромжелезобетон”. Состав бетона: портландцемент марки ПЦ I-500-Н, мелкий заполнитель — кварцевый песок, крупный заполнитель — гранитный щебень (фракции 5–15 мм), пластификатор — Glenium 51. Размеры тубингов — 2984×1400×300 мм. В состав железобетонных тубингов вводилась полипропиленовая фибра “Pro-ZASK IGS” с длиной волокон 6 мм, диаметром 18 мкм в количестве 1 кг/м³. Армирование: 28 Ø12 мм, класс стали B500C. Арматурные каркасы изготавливались с применением точечной сварки. Толщина защитного слоя от обогреваемой поверхности до края арматуры составляла 34 мм. Общий вид испытуемых образцов представлен на рис. 1.

Испытания на огнестойкость проводились по ГОСТ 30247.0–94 и ГОСТ 30247.1–94, в которых установлены требования к оборудованию, размещению термопреобразователей и регистрации необходимых параметров.

В ходе испытаний на огнестойкость тубингов необходимо воспроизвести нагрузку, которая воздействует на конструкцию при эксплуатации объекта с максимальным моментом и продольной силой в сечении обделки тоннеля. Эксперименты проводили во ВНИИПО МЧС России. Так как на данную конструкцию в процессе ее эксплуатации действуют как вертикальные, так и горизонтальные нагрузки, необходимо было усовершенствовать систему опи-



Рис. 1. Общий вид исследуемых железобетонных тубингов
Fig. 1. General view of the tested reinforced concrete tubings

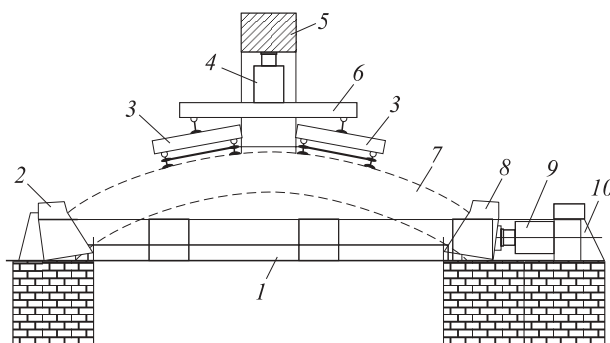


Рис. 2. Усовершенствованная система нагружения для исследования огнестойкости железобетонных тубингов: 1 — горизонтальная рама; 2 — неподвижная опора домкрата; 3 — рамы для создания вертикальной нагрузки; 4 — гидравлический домкрат для вертикальной нагрузки; 5 — вертикальная рама; 6 — упор домкрата; 7 — испытуемый образец; 8 — подвижная опора; 9 — гидравлический домкрат для горизонтальной нагрузки; 10 — опора гидравлического домкрата

Fig. 2. The advanced loading system for the study of fire resistance of reinforced concrete tubings: 1 — horizontal frame; 2 — fixed jack support; 3 — vertical load frames; 4 — hydraulic jack for vertical load; 5 — vertical frame; 6 — jack rest; 7 — test sample; 8 — movable support; 9 — hydraulic jack for horizontal load; 10 — hydraulic jack support

рания и нагружения на новой установке для испытаний на огнестойкость перекрытий, покрытий и балок дополнительной системой нагружения. На рис. 2 представлена схема усовершенствованной системы нагружения, которая во время огневых испытаний находилась вне зоны нагрева.

Перед началом проведения эксперимента согласно ГОСТ 30247.1–94 рассчитывали максимальные значения прогиба (99,5 мм) и предельной скорости деформации (0,33 см/мин), превышение которых характеризует наступление предельного состояния по несущей способности. В ходе эксперимента прогиб фиксировали с помощью прибора “Прогибомер МП-3”. Для установления предельного состояния по теплоизолирующей способности на необогреваемой поверхности размещали термопреобразователи для измерения температур.

Нагрузка в эксперименте рассчитывалась ОАО “Мосинжпроект” для тубингов тоннельной обделки диаметром 6,0 м.

За 30 мин до начала огневых испытаний конструкция нагружалась расчетной нагрузкой, которая составляла: вертикальная — 50 тс (490,5 кН), горизонтальная — 30 тс (294,3 кН). После этого испытуемый образец тубинга подвергался воздействию температурного режима стандартного пожара.

В результате экспериментальных исследований были построены графики изменения температуры в огневой камере и прогиба (рис. 3), а также температуры на необогреваемой поверхности (рис. 4).



Рис. 3. Результаты испытаний на огнестойкость железобетонного тубинга с полипропиленовой фиброй

Fig. 3. The test results on the fire resistance of reinforced concrete tubing with polypropylene fiber

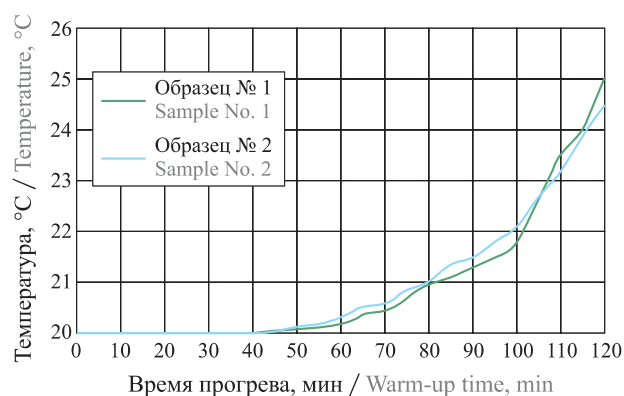


Рис. 4. Зависимость температуры на необогреваемой поверхности тубинга от времени при огневых испытаниях

Fig. 4. The time dependence of the temperature on the unheated surface of the tubing during fire tests

Нормативный предел огнестойкости тубингов составлял REI 120, поэтому огневые испытания проводились в течение 125 мин.

По результатам эксперимента с тубингами без добавки полипропиленовой фибры отмечено взрывообразное разрушение бетона при воздействии высоких температур, которое сопровождалось сильными хлопками. Это привело к отслаиванию защитного слоя бетона и быстрому прогреву арматуры до критических значений. Образец после огневых испытаний с разрушенным защитным слоем бетона представлен на рис. 5, а.

В ходе огневых испытаний тубингов с добавкой полипропиленовой фибры взрывообразного разрушения бетона не отмечено. Предельная деформация составила 7 мм, что не превышает предельно допустимого прогиба (99,5 мм). Средняя температура по пяти термопарам в интервале 0–120 мин составила 25 °С, что значительно меньше допустимой температуры (160 °С). В ходе испытаний визуально определено, что выпаривание влаги на необогреваемой поверхности образцов происходит на 30–37-й ми-



Рис. 5. Железобетонные тубинги после испытаний без добавки (а) и с добавкой полипропиленовой фибры (б)

Fig. 5. Reinforced concrete tubings after testing without the addition of polypropylene fiber (a) and with the addition of polypropylene fiber (b)

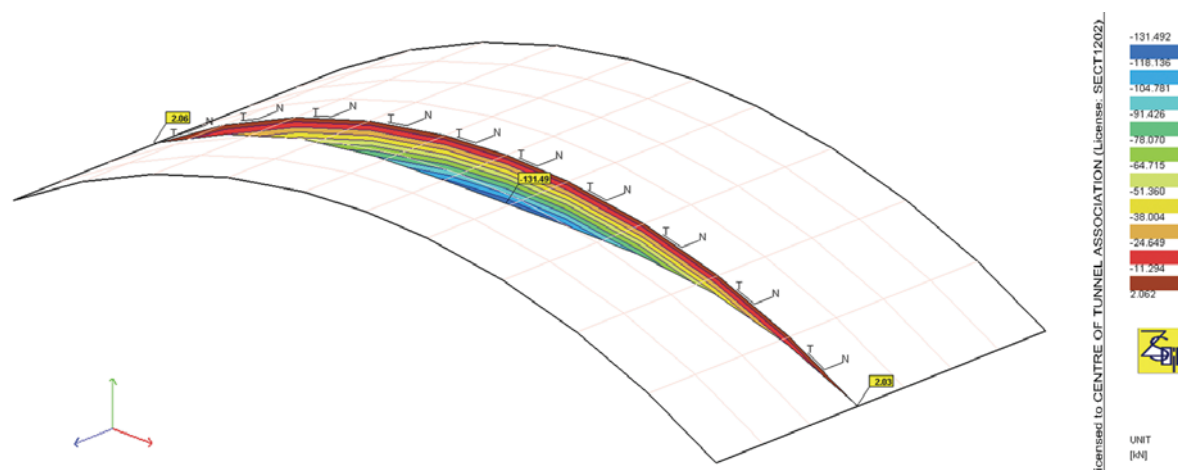


Рис. 6. Зависимость изгибающего момента от расстояния между опорами тьюбинга при расчете в программном комплексе *Z_Soil*
Fig. 6. The dependence of the bending moment on the distance between the supports of tubing in the calculation in the software package *Z_Soil*

нута и продолжается до момента завершения испытаний.

По окончании испытаний и демонтажа образца с установки на обогреваемой стороне обнаружены две поперечные трещины шириной 1–3 мм и глубиной 20–30 мм и многочисленные нитевидные трещины (рис. 5,б).

При визуальном осмотре после огневых испытаний обогреваемой поверхности тьюбинга с добавкой полипропиленовой фибры (см. рис. 5,б) повреждений защитного слоя бетона не отмечено. Обнаружены лишь незначительные отколы защитного слоя бетона, образовавшиеся в результате демонтажа образца с опор установки. Это свидетельствует об отсутствии взрывообразного разрушения бетона на поверхности исследуемого образца.

В результате экспериментальных исследований железобетонных тьюбингов с полипропиленовой фиброй установлено, что предел огнестойкости тьюбингов составил REI 120, что соответствует нормируемому пределу огнестойкости. Эксперимент был прекращен на 125-й минуте.

Аналитическая оценка огнестойкости железобетонного тьюбинга

Для установления предела огнестойкости расчетным методом необходимо решить две задачи — теплотехническую и статическую (прочностную).

Совместно с ООО “Научно-инженерный центр тоннельной ассоциации” проводился расчет момен-

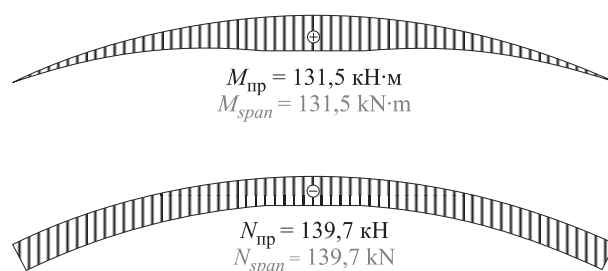


Рис. 7. Эпюры моментов и сжимающих усилий железобетонного тьюбинга: $M_{пр}$, $N_{пр}$ — расчетные усилия в поперечном сечении в середине пролета тьюбинга

Fig. 7. Plot of moments and compressive forces of reinforced concrete tubing: M_{span} , N_{span} — calculated forces in the cross section in the middle of the tubing span

тов и сжимающих усилий, возникающих в исследуемом блоке от внешней нагрузки при нормальной температуре (до огневых испытаний). С помощью метода конечных элементов (МКЭ) решалась задача на базе программно-вычислительного комплекса (ПВК) *Z_Soil*.

В результате вычислений получены максимальные моменты и сжимающие усилия от внешних нагрузок, образующиеся в поперечных сечениях блока (рис. 6 и 7).

Кроме того, определено расчетное сечение с максимальным положительным моментом $M_{пр} = 131,5$ кНм и продольной силой $N_{пр} = 139,7$ кН, где растянутая зона располагается с обогреваемой стороны образца.

Таблица 1. Коэффициенты γ_{bt} условия работы бетона при нагреве с добавкой полипропиленовой фибры ProZASK IGS

Table 1. The coefficients γ_{bt} of the working conditions of concrete when heated with the addition of polypropylene fibers ProZASK IGS

Температура, °C Temperature, °C	20	100	200	300	400	500	600	700	800
Коэффициент γ_{bt} Coefficient γ_{bt}	1	1	1	0,99	0,96	0,82	0,72	0,5	0,21

Таблица 2. Свойства бетона с полипропиленовой фиброй и арматуры**Table 2.** Properties of concrete with polypropylene fiber and reinforcement

Характеристика Property	Значение Value
<i>Бетон с полипропиленовой фиброй</i> <i>Concrete with polypropylene fiber</i>	
Коэффициент теплопроводности λ_t , Вт/(м·К) Thermal conductivity λ_t , W/(m·K)	1,3 – 0,0006t
Коэффициент теплоемкости c_t , Дж/(кг·К) Heat capacity c_t , J/(kg·K)	481 + 0,92t
Плотность, кг/м ³ / Density, kg/m ³	2400
Влажность W , % Humidity W , %	6
<i>Арматура / Reinforcement</i>	
Коэффициент теплопроводности λ_t , Вт/(м·К) Thermal conductivity λ_t , W/(m·K)	78 – 0,048t
Коэффициент теплоемкости c_t , Дж/(кг·К) Heat capacity c_t , J/(kg·K)	310 + 0,48t
Плотность, кг/м ³ / Density, kg/m ³	7800

Состав образцов для исследования прочностных показателей фибробетона соответствовал составу, из которого были изготовлены блоки.

Исследованиями установлено, что призмная прочность бетона с добавкой полипропиленовой фибры $R_{bn} = 33,7$ МПа, что согласно СП 63.13330.2012 (Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 51-01–2003) соответствует классу бетона В45. Экспериментальные данные по изменению прочности фибробетона от температуры при нагреве представлены в табл. 1.

Для решения теплотехнической задачи использовались показатели теплопроводности λ_t и теплоемкости c_t , полученные в ходе исследований бетона с добавкой полипропиленовой фибры [16, 17]:

$$\lambda_t = 1,2 - 0,0006t; \quad (1)$$

$$c_t = 710 + 0,92t. \quad (2)$$

Основной целью теплотехнической части расчета является определение температуры по сечению тубинга в процессе огневого воздействия. Изменение температуры в железобетонном элементе рассчитывают путем решения дифференциального уравнения теплопроводности Фурье [15].

Поскольку задача такого рода является трудоемкой из-за наличия большого количества переменных и нелинейных граничных условий, для ее решения использовался программный комплекс ANSYS [18–21].

При подготовке к расчету моделировалась объемная конструкция (расчетная область) в виде железобетонного тубинга; бетону и арматуре присваивались свойства, представленные в табл. 2 (начальные условия). Модель разбивалась на конечные элементы.

Для расчета в программном комплексе задавались граничные условия 3-го рода. Для обогреваемой поверхности задавались характеристики, приведенные в табл. 3.

На необогреваемой поверхности в табличном виде задавался коэффициент теплоотдачи α' :

$$\alpha' = 1,5 \sqrt[3]{t_i - t_n} + 5,77\varepsilon_{np} \left(\frac{\left(\frac{t_i}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_n}{100}\right)^4}{t_i - t_n} \right), \quad (3)$$

где α' — коэффициент теплоотдачи от необогреваемой поверхности к среде, Вт/(м²·К);

t_i — температура необогреваемой поверхности, К;

t_n — начальная температура конструкции, К;

ε_{np} — приведенная степень черноты конструкции.

Так как бетон является гигроскопичным материалом, учитывалось выпаривание свободной влаги из пор бетона за счет увеличения коэффициента теплоемкости в интервале температур 100–140 °С.

Расчет выполнялся при воздействии стандартного температурного режима пожара в течение 120 мин. Результаты расчета представлены на рис. 8 и 9.

По окончании теплотехнического расчета проводилась обработка результатов численного эксперимента в целях определения основных параметров, необходимых для решения прочностной задачи.

Таблица 3. Граничные условия для обогреваемой поверхности / **Table 3.** Boundary conditions for heated surface

Характеристика / Property	Значение / Value
Коэффициент передачи тепла конвекцией α_k , Вт/(м ² ·°С) Convection heat transfer coefficient α_{conv} , W/(m ² ·°C)	29
Приведенная степень черноты системы <i>огневая камера – бетонная поверхность</i> ε_{np} The degree of blackness of the system <i>fire chamber – concrete surface</i> ε_{ref}	0,67 – 0,0004t
Зависимость стандартного температурного режима пожара (t_n — начальная температура конструкции, °С) The temperature dependence of the standard mode of fire (t_{in} — initial temperature of construction, °C)	345 lg (0,133t + 1) + t_n 345 lg (0,133t + 1) + t_{in}

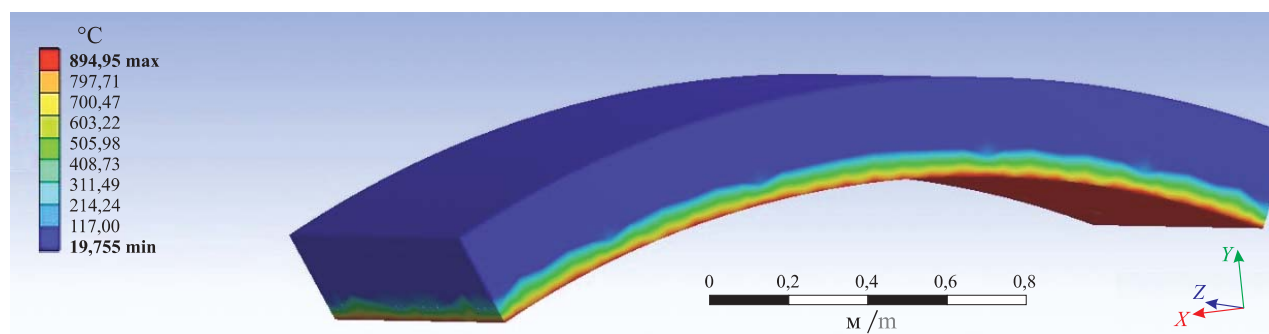


Рис. 8. Результаты расчета температурных полей для железобетонного туннеля в программном комплексе ANSYS

Fig. 8. The results of the calculation of temperature fields for reinforced concrete tubing in the software package ANSYS

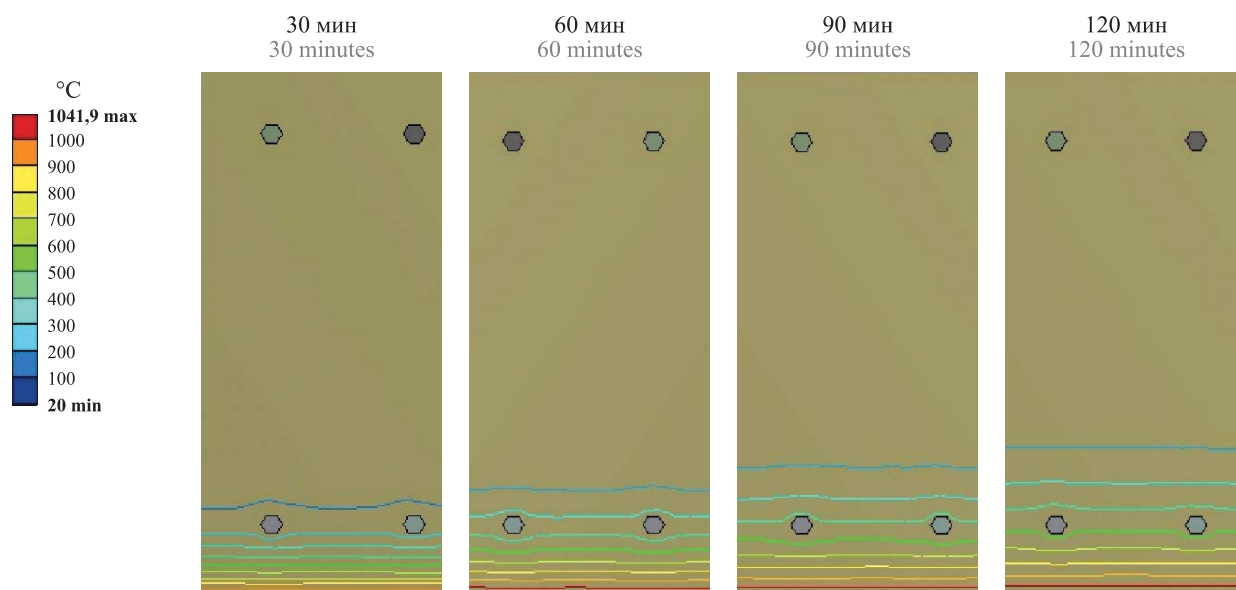


Рис. 9. Изотермы прогрева для железобетонного туннеля с полипропиленовой фиброй

Fig. 9. Heating isotherms for reinforced concrete tubing with polypropylene fiber

При этом для определения достоверности полученных результатов сравнивались расчетные и экспериментальные кривые роста температуры на необогреваемой поверхности туннеля (рис. 10). Сравнение показало, что расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 10 %.

В результате теплотехнического расчета определены: температура растянутой арматуры на 120-й минуте прогрева 475,1 °C; коэффициент снижения нормативного сопротивления арматурной стали $\gamma_{s,t} = 0,662$; коэффициент снижения модуля упругости $\beta_{s,t} = 0,812$.

Расчет несущей способности туннеля проводился для наиболее напряженного поперечного сечения, расположенного в середине пролета.

От неравномерного нагрева по толщине блока образуется дополнительный температурный прогиб [15, 22, 23], который увеличивает эксцентриситет продольной силы.

Железобетонный туннель является геометрически нелинейным элементом, поэтому использование

для его расчета приведенных в справочной литературе формул для колонн и стен не представляется возможным.

В процессе исследования получена расчетная схема (рис. 11) и формула для определения дополнительного температурного прогиба e_t (м) железобетонного туннеля при огневом воздействии:

$$e_t = \frac{3(\alpha_{t_s} t_s + \alpha_{t_b} t_b) r^2 \sin^2 \varphi}{2h_{0,t}} = 0,00612 \text{ м}, \quad (4)$$

где α_{t_s} — коэффициент температурного расширения арматуры растянутой зоны при нагреве до t_s (475,1 °C);

α_{t_b} — коэффициент температурного расширения бетона сжатой грани при нагреве до t_b (25 °C);

r — длина от опоры туннеля до середины конструкции по нейтральной оси элемента, м;

φ — угол между r и осью OX;

$h_{0,t}$ — рабочая высота сечения, м.

Эксцентриситет e (м) внешней продольной силы N относительно центра тяжести сечения арматуры

2. *Maraveas C., Vrakas A. A.* Design of concrete tunnel linings for fire safety // *Structural Engineering International*. — 2014. — Vol. 24, No. 3. — P. 319–329. DOI: 10.2749/101686614X13830790993041.
3. *Бартелеми Б., Крюнна Ж.* Огнестойкость строительных конструкций / Пер. с фр. — М.: Стройиздат, 1985. — 216 с.
4. *Голованов В. И., Кузнецова Е. В.* Эффективные средства огнезащиты для стальных и железобетонных конструкций // *Промышленное и гражданское строительство*. — 2015. — № 9. — С. 82–90.
5. *Голованов В. И., Павлов В. В., Пехотилов А. В.* Защита железобетонных туннелей от хрупкого разрушения при пожаре // *Пожарная безопасность*. — 2008. — № 2. — С. 50–55.
6. *Фёдоров В. С., Левитский В. Е., Молчадский И. С., Александров А. В.* Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций. — М.: АСВ, 2009. — 408 с.
7. *Neo Y.-S., Sanjayan J. G., Han C.-G., Han M.-C.* Synergistic effect of combined fibers for spalling protection of concrete in fire // *Cement and Concrete Research*. — 2010. — Vol. 40, No. 10. — P. 1547–1554. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.06.011.
8. *Werther N.* Brandversuche an Tunnelinnenschalenbetonen für den M 30-Nordtunnel in Madrid // *Beton- und Stahlbetonbau*. — 2006. — Vol. 101, No. 9. — P. 729–731 (in German). DOI: 10.1002/best.200608187.
9. *Dutta Dey S., Winterberg R., Korulla M., Gharpure A. D.* Steel fibre reinforced concrete for underground structures // 6th Asian Rock Mechanics Symposium. — 2010. — 8 p.
10. *Rodrigues J. P. C., Laím L., Correia A. M.* Behaviour of fiber reinforced concrete columns in fire // *Composite Structures*. — 2010. — Vol. 92, Issue 5. — P. 1263–1268. DOI: 10.1016/j.compstruct.2009.10.029.
11. *Кузнецова И. С., Рябенкова В. Г., Корнюшина М. П., Саврасов 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.
12. *Dehn F., Werther N., Knitl J.* Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig // *Beton- und Stahlbetonbau*. — 2006. — Vol. 101, Issue 8. — P. 631–636 (in German). DOI: 10.1002/best.200608186.
13. *Kordina K.* Brände in unterirdischen Verkehrsanlagen // *Bautechnik*. — 2003. — Vol. 80, No. 5. — P. 327–338 (in German). DOI: 10.1002/bate.200302620.
14. *Ройтман В. М., Голованов В. И.* Необходимость технического регулирования огнестойкости зданий с учетом возможности комбинированных особых воздействий с участием пожара // *Пожарная безопасность*. — 2014. — № 1. — С. 86–93.
15. *Яковлев А. И.* Расчет огнестойкости строительных конструкций. — М.: Стройиздат, 1988. — 144 с.
16. *Голованов В. И., Новиков Н. С., Павлов В. В., Кузнецова Е. В.* Прочностные и теплофизические свойства бетона с полипропиленовой фиброй в условиях температурного режима стандартного пожара // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. — 2017. — Т. 26, № 5. — С. 37–44. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.37-44.
17. *Голованов В. И., Новиков Н. С., Павлов В. В., Антонов С. П.* Прочностные характеристики фибробетона для тоннельных сооружений в условиях высоких температур // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. — 2017. — № 2. — С. 63–67.
18. *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 // *Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании: сб. матер. VI Международной научной конференции*. — М.: НИУ МГСУ, 2018. — С. 207–212.
19. *Камлюк А. Н., Ширко А. В., Янковский А. Г.* Теплотехнический и прочностной расчет железобетонных колонн в программной среде ANSYS // *Техносферная безопасность*. — 2014. — № 2(3). — С. 26–33.
20. *Ширко А. В., Камлюк А. Н., Полевода И. И., Зайнудинова Н. В.* Прочностной расчет железобетонных плит при пожаре с использованием программной среды ANSYS // *Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь*. — 2014. — № 1(19). — С. 48–58.
21. *Камлюк А. Н., Полевода И. И., Ширко А. В.* Модели материалов арматуры и бетона для теплотехнических и прочностных расчетов на примере Российского стандарта // *Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь*. — 2013. — № 1(17). — С. 104–116.
22. *Kordina K., Meyer-Ottens C.* Beton brandschutz. Handbuch. 2 Auflage. — Düsseldorf: Verlag Bau + Technik, 1999. — 284 p. (in German).
23. *Nause P.* Brandschutztechnische Bewertung tragender Bauteile im Bestand. — Brandschutz-Forum-München, 21.06.2013. — 47 p. URL: <https://docplayer.org/2762246-Brandschutztechnische-bewertung-tragender-bauteile-im-bestand.html> (дата обращения: 15.05.2019).

REFERENCES

1. D. B. Moore, T. Lennon. Fire engineering design of steel structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 1997, vol. 1, no. 1, pp. 4–9. DOI: 10.1002/pse.2260010104.
2. C. Maraveas, A. A. Vrakas. Design of concrete tunnel linings for fire safety. *Structural Engineering International*, 2014, vol. 24, no. 3, pp. 319–329. DOI: 10.2749/101686614X13830790993041.
3. Barthélèmy B., Kruppa J. *Résistance au feu des structures béton – acier – bois*. Paris, Editions Eyrolles, 1978. 216 p. (in French) (Russ. ed.: Barthélèmy B., Kruppa J. Ognestoykost stroitelnykh konstruksiy. Moscow, Stroyizdat Publ., 1985. 216 p.).
4. V. I. Golovanov, E. V. Kuznetsova. Effective means of fire protection for steel and concrete structures. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo / Industrial and Civil Engineering*, 2015, no. 9, pp. 82–90 (in Russian).
5. V. I. Golovanov, V. V. Pavlov, A. V. Pekhotikov. Protection of concrete tubing highway tunnels by brittle fracture during a fire. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2008, no. 2, pp. 50–55 (in Russian).
6. V. S. Fedorov, V. E. Levitskiy, I. S. Molchadskiy, A. V. Aleksandrov. *Ognestoykost i pozharnaya opasnost stroitelnykh konstruksiy* [Fire behavior and fire danger of building designs]. Moscow, ASV Publ., 2009. 408 p. (in Russian).
7. Y.-S. Heo, J. G. Sanjayan, C.-G. Han, M.-C. Han. Synergistic effect of combined fibers for spalling protection of concrete in fire. *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 10, pp. 1547–1554. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.06.011.
8. N. Werther. Brandversuche an Tunnelinnenschalenbetonen für den M 30-Nordtunnel in Madrid. *Beton- und Stahlbetonbau*, 2006, vol. 101, issue 9, pp. 729–731 (in German). DOI: 10.1002/best.200608187.
9. S. Dutta Dey, R. Winterberg, M. Korulla, A. D. Gharpure. Steel fibre reinforced concrete for underground structures. In: 6th Asian Rock Mechanics Symposium, 2010. 8 p.
10. J. P. C. Rodrigues, L. Laím, A. M. Correia. Behaviour of fiber reinforced concrete columns in fire. *Composite Structures*, 2010, vol. 92, issue 5, pp. 1263–1268. DOI: 10.1016/j.compstruct.2009.10.029.
11. I. S. Kuznetsova, V. G. Ryabchenkova, M. P. Korniyushina, I. P. Savrasov, M. S. Vostrov. Polypropylene fiber is an effective way to struggle with the explosion — like destruction of concrete in case of fire. *Stroitel'nye Materialy / Construction Materials*, 2018, no. 11, pp. 15–20. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-765-11-15-20.
12. F. Dehn, N. Werther, J. Knitl. Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig. *Beton- und Stahlbetonbau*, 2006, vol. 101, issue 8, pp. 631–636 (in German). DOI: 10.1002/best.200608186.
13. K. Kordina. Brände in unterirdischen Verkehrsanlagen. *Bautechnik*, 2003, vol. 80, no. 5, pp. 327–338 (in German). DOI: 10.1002/bate.200302620.
14. V. M. Roytman, V. I. Golovanov. Need for technical regulation of the buildings fire resistance taking into account the possible combined hazardous fire exposure. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2014, no. 1, pp. 86–93 (in Russian).
15. A. I. Yakovlev. *Raschet ognestoykosti stroitelnykh konstruksiy* [Calculation of fire resistance of building structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 143 p. (in Russian).
16. V. I. Golovanov, N. S. Novikov, V. V. Pavlov, E. V. Kuznetsova. Strength and thermo-physical properties of concrete with polypropylene fiber under standard temperature regimes. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 5, pp. 37–44 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.37-44.
17. Golovanov V. I., Novikov N. S., Pavlov V. V., Antonov S. P. Strength characteristics of fiber reinforced concrete for tunnel structures in high temperatures. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya / Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2017, no. 2, pp. 63–67 (in Russian).
18. A. A. Volkov, V. M. Roytman, D. N. Pristupyuk, V. Yu. Fedorov. The influence of humidity of construction materials on the accuracy of calculations of the heating of structures in assessing their fire resistance. In: *Integratsiya, partnerstvo i innovatsii v stroitel'noy nauke i obrazovanii. Sbornik materialov VI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Partnership and Innovation in Construction Science and Education. Proceedings of VI International Scientific Conference]. 2018, pp. 207–212 (in Russian).
19. A. N. Kamlyuk, A. V. Shirko, A. G. Yankovskiy. The thermal and strength calculation of concrete columns in a software environment ANSYS. *Tekhnosfernaya bezopasnost / Technosphere Safety*, 2014, no. 2(3), pp. 26–33 (in Russian).
20. A. V. Shirko, A. N. Kamlyuk, I. I. Polevoda, N. V. Zaynudinova. The strength calculation of concrete slabs in a soft-ware environment ANSYS. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus / Vestnik of the Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus*, 2014, no. 1(19), pp. 48–58 (in Russian).

21. A. N. Kamlyuk, I. I. Polevoda, A. V. Shirko. Models of reinforcement and concrete materials for thermal engineering and strength calculations on the example of the Russian standard. *Vestnik Komandno-inzhenerenogo instituta MChS Respubliki Belarus / Vestnik of the Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus*, 2013, no. 1(17), pp. 104–116 (in Russian).
22. K. Kordina, C. Meyer-Ottens. *Beton brandschutz. Handbuch*. 2 Auflage. Düsseldorf, Verlag Bau + Technik, 1999. 284 p. (in Germany).
23. P. Nause. *Brandschutztechnische Bewertung tragender Bauteile im Bestand*. Brandschutz-Forum, München, 21.06.2013. 47 p. (in German). Available at: <https://docplayer.org/2762246-Brandschutztechnische-bewertung-tragender-bauteile-im-bestand.html> (Accessed 15 May 2019).

Поступила 28.05.2019, после доработки 19.07.2019;
принята к публикации 25.08.2019

Received 28 May 2019; Received in revised form 19 July 2019;
Accepted 25 August 2019

Информация об авторах

ГОЛОВАНОВ Владимир Ильич, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха Московской обл., Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-6043-0537; e-mail: pavelgol1@yandex.ru

ПЕХОТИКОВ Андрей Владимирович, канд. техн. наук, начальник отдела, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха Московской обл., Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-2396-3136; e-mail: pekhotikov.a@mail.ru

НОВИКОВ Николай Сергеевич, научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха Московской обл., Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-2945-663X; e-mail: agps.nick182@gmail.com

ПАВЛОВ Владимир Валерьевич, начальник сектора, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха Московской обл., Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-5131-7401; e-mail: vv.pavlov@mail.ru

КУЗНЕЦОВА Елена Вячеславовна, старший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха Московской обл., Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-4711-0210; e-mail: lenkus01@mail.ru

Information about the authors

Vladimir I. GOLOVANOV, Dr. Sci. (Eng), Main Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6043-0537; e-mail: pavelgol1@yandex.ru

Andrey V. PEKHOTIKOV, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2396-3136; e-mail: pekhotikov.a@mail.ru

Nikolay S. NOVIKOV, Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow region, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2945-663X; e-mail: agps.nick182@gmail.com

Vladimir V. PAVLOV, Head of Sector, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow region, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-5131-7401; e-mail: vv.pavlov@mail.ru

Elena V. KUZNETSOVA, Senior Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow region, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-4711-0210; e-mail: lenkus01@mail.ru