

В. И. ГОЛОВАНОВ, д-р техн. наук, главный научный сотрудник ВНИИПО МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; e-mail: pavelgol1@yandex.ru)

Н. С. НОВИКОВ, адъюнкт, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: agps.nick182@gmail.com)

В. В. ПАВЛОВ, начальник сектора, ВНИИПО МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; e-mail: vv.pavlov@mail.ru)

Е. В. КУЗНЕЦОВА, старший научный сотрудник, ВНИИПО МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; e-mail: vniipo@mail.ru)

УДК 614.841.332.624.012.4

ПРОЧНОСТНЫЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОНА С ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ФИБРОЙ В УСЛОВИЯХ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА СТАНДАРТНОГО ПОЖАРА

Изучено влияние температуры на прочностные и теплотехнические характеристики бетона с добавкой полипропиленовых волокон. Получены аналитические зависимости прочности фибробетона на осевое сжатие в зависимости от температуры нагрева. Установлено, что при прогреве опытных образцов прочность бетона с добавкой фибры на 16 % ниже по сравнению с бетоном без добавки. Проведены эксперименты по определению теплофизических свойств бетона с добавкой полипропиленовой фибры при одностороннем нагреве опытных образцов плит по температурному режиму стандартного пожара. Получены зависимости теплофизических характеристик бетона с отечественной и импортной полипропиленовой фиброй при росте температуры, дающие возможность проводить расчет прогрева железобетонных конструкций с выбранным видом добавки. Показано, что с ростом температуры коэффициент теплопроводности бетона с добавкой полипропиленовой фибры снижается более интенсивно, чем бетона без добавки. Установлено, что добавка фибры не влияет на изменение коэффициента теплоемкости бетона при нагреве. В результате обработки экспериментальных данных получены аналитические зависимости для определения прочности бетона на сжатие и коэффициентов теплопроводности и теплоемкости в интервале температур 20–800 °С.

Ключевые слова: прочность бетона на сжатие; фибробетон; полипропиленовая фибра; температура; коэффициент теплопроводности; коэффициент теплоемкости; стандартный температурный режим пожара.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.37-44

Введение

Пожарная опасность автодорожных тоннелей глубокого заложения, железнодорожных и перегонных тоннелей метрополитена обусловлена высокой интенсивностью движения, широкой номенклатурой перевозимых пожароопасных грузов, большим количеством людей, одновременно находящихся в тоннеле. В ряде случаев пожары могут носить катастрофический характер, что приводит к массовой гибели людей, большим материальным потерям, а для их тушения требуется привлечение значительных сил и средств [1–3].

Основная цель защиты тоннелей состоит в том, чтобы сохранять несущую способность конструкций тоннеля во время и после пожара. В связи с этим при его строительстве следует использовать такие конструкции, которые позволят в случае пожара восстановить эксплуатационные возможности

тоннеля за минимальное время и с наименьшими техническими и финансовыми затратами. Растущие темпы строительства тоннелей обуславливают широкое применение в обделках тоннелей железобетонных тюбингов заводского изготовления.

В отличие от железобетонных конструкций надземных зданий и сооружений ограждающие железобетонные блоки тоннельных обделок имеют повышенную влажность (более 3,5 %), что при возникновении пожара на ранних стадиях может привести к хрупкому (взрывообразному) разрушению бетона [4–6] и преждевременной потере их несущей способности.

Для уменьшения последствий от хрупкого разрушения бетона в защитном слое строительных конструкций устанавливают противооткольные сетки либо используют огнезащитные покрытия для снижения интенсивности нагрева бетона при пожаре

[7–9]. Однако современные исследования показали, что наиболее эффективным способом защиты бетона от хрупкого разрушения с точки зрения трудоемкости и материальных затрат является введение в бетонную смесь добавки в виде полипропиленовой фибры. Рекомендации по применению бетонов с полипропиленовой фиброй содержатся в EN 1992-1-2 и ряде зарубежных публикаций [10, 11]. Добавка в бетон полипропиленовой фибры в количестве $1\text{--}2\text{ кг/м}^3$ позволяет снизить вероятность взрывообразного разрушения железобетонных конструкций, имеющих повышенную влажность.

Исследование огнестойкости железобетонных конструкций тоннельных несущих и ограждающих конструкций с добавкой в бетонную смесь полипропиленовой фибры является важной задачей в области повышения пожарной безопасности тоннельных несущих и ограждающих конструкций, так как это позволяет снизить вероятность взрывообразного разрушения железобетонных конструкций, имеющих повышенную влажность. Во ВНИИПО были проведены эксперименты [12, 13] по определению фактических пределов огнестойкости двух видов тубингов и влияния на огнестойкость добавки полипропиленовой фибры в бетонную смесь.

Однако экспериментальные исследования огнестойкости тубингов довольно трудоемки и связаны с большими материальными затратами, а по результатам экспериментов невозможно оценить огнестойкость конструкций при изменении таких факторов, как размер, нагрузка, класс бетона, класс арматуры и т. д.

В настоящее время разработан метод расчета фактических пределов огнестойкости железобетонных конструкций, который состоит из теплотехнической и статической частей. В теплотехнической части при расчете температуры по сечению конструкции необходимо иметь данные по теплофизическим свойствам бетона. В статической части при расчете несущей способности конструкции используют данные по изменению прочности бетона при нагреве. Таким образом, для оценки огнестойкости железобетонных конструкций из фибробетона расчетными методами необходимо иметь данные по прочностным и теплофизическим свойствам бетона с полипропиленовой фиброй при нагреве.

С этой целью для получения исходных данных для расчета предела огнестойкости железобетонных конструкций из данного вида фибробетона были проведены исследования по определению прочностных и теплофизических характеристик бетона с добавкой полипропиленовой фибры при воздействии температурных режимов пожара.

Материалы и методика проведения экспериментов

Для проведения экспериментов по определению прочностных и теплофизических характеристик на заводе ОАО “Моспромжелезобетон” изготавливали образцы в виде кубиков и плит из бетона на основе портландцемента ПЦ I-500-Н, мелкого заполнителя — кварцевого песка, крупного заполнителя — гранитного щебня (5–15 мм) и пластификатора Glepium 51. В бетонную смесь, помимо вышеприведенных ингредиентов, добавляли полипропиленовую фибру в количестве 1 кг/м^3 .

Исследования проводили с отечественной и импортной полипропиленовой фиброй. Волокна имели диаметр 18 мкм и длину соответственно 12 и 6 мм.

Для исследования предела прочности на сжатие бетона без добавки и с добавкой полипропиленовой фибры были изготовлены образцы в виде кубиков размером $100\times 100\times 100\text{ мм}$. Исследования прочности бетона с полипропиленовой фиброй на осевое сжатие при высоких температурах нагрева проводились по разработанной методике с учетом ГОСТ 10180–2012.

Теплофизические характеристики фибробетона определяли методом решения обратной задачи нестационарной теплопроводности [3]. Коэффициенты теплопроводности λ_i и теплоемкости c_i устанавливали путем сопоставления экспериментальных и расчетных кривых прогрева плит из фибробетона. Экспериментальные данные по прогреву плит получали в результате огневых испытаний в соответствии с ГОСТ 30247.0–94.

Прочность фибробетона на осевое сжатие при нагреве

Эксперименты по определению прочности кубиков бетона на осевое сжатие при нагреве проводили в Академии ГПС МЧС России. Перед испытанием образцы прогревали в диапазоне температур $20\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$. Затем нагретые образцы нагружали с постоянной скоростью на гидравлическом прессе до разрушения.

При проведении экспериментов выявлен характер разрушения бетонных образцов без добавки и с добавкой полипропиленовой фибры. Установлено, что в диапазоне температур $20\text{--}200\text{ }^\circ\text{C}$ для образца бетона без добавки фибры характерно разрушение с хлопком, откалыванием составных компонентов и разлетом их на 2–3 м (рис. 1,а). Разрушение же бетонных образцов с добавкой фибры в данном интервале температур было пластичным, практически без изменения формы (рис. 1,б).

При прогреве бетонных кубиков с добавкой фибры и без добавки в диапазоне $300\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$ под воздействием нагрузки образцы разрушались с рассы-



Рис. 1. Вид образцов бетона без добавки (а) и с добавкой фибры (б) после проведения эксперимента

панием составных компонентов бетона. Возможно, это происходило вследствие уменьшения сцепления между компонентами бетона в результате прогрева образцов до высоких температур. Результаты исследования влияния нагрева на прочность бетонных образцов без добавки и с добавкой фибры показаны на рис. 2.

Изменение прочности бетона с увеличением температуры характеризуется коэффициентом $\gamma_{b,tem}$:

$$\gamma_{b,tem} = R_{tem} / R_{20},$$

где R_{tem} — временное сопротивление бетона сжатию при соответствующей температуре нагрева, МПа; R_{20} — временное сопротивление бетона сжатию при температуре 20 °С, МПа.

Можно предположить, что добавление полипропиленовой фибры в бетон в количестве 1 кг/м³ приводит к вытеснению из него такого же количества цемента и мелкого наполнителя и, как следствие, к снижению его прочности при нормальной температуре. При нагреве до 200–300 °С предел прочности бетона на сжатие без добавки фибры и с добавкой увеличивается благодаря уплотнению структуры цемент-

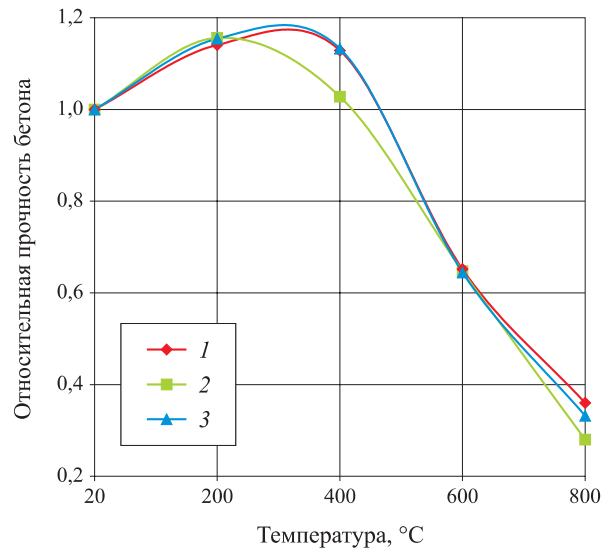


Рис. 2. Относительная прочность бетона без добавки (1) и с добавкой отечественной (2) и импортной (3) полипропиленовой фибры

ного камня, которое происходит вследствие удаления воды из геля двухкальциевого силиката, и плавлению полипропиленовой фибры при температуре 140–160 °С.

При температуре свыше 300 °С происходит резкое снижение предела прочности опытных образцов бетона на сжатие. Основной причиной этого в данном случае является различие температурных деформаций в цементном камне и в заполнителях под воздействием высоких температур.

В результате обработки экспериментальных данных методом регрессионного анализа получены аналитические зависимости для определения коэффициента $\gamma_{b,tem}$ для бетона без добавки и с добавкой фибры:

- без добавки фибры:

$$\gamma_{b,tem} = -0,0000024314t^2 + 0,0010800881t + 1,00359;$$

- с добавкой отечественной полипропиленовой фибры:

$$\gamma_{b,tem} = -0,0000023626t^2 + 0,00093184t + 1,0131;$$

- с добавкой импортной полипропиленовой фибры:

$$\gamma_{b,tem} = -0,000002561t^2 + 0,0011462t + 1,004413,$$

где t — температура бетона, °С.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что добавка полипропиленовой фибры снижает прочность бетона на сжатие в среднем на 16 % как при нормальной температуре, так и при повышенной.

В ходе исследований сравнивались два вида бетона, с добавкой отечественной и импортной полипропиленовой фибры. Так, в диапазоне 20–300 °С прочность на осевое сжатие бетона с добавкой оте-

чественной полипропиленовой фибры выше по сравнению с импортной на 12 %. В диапазоне 300–800 °С бетон с добавкой отечественной полипропиленовой фибры по прочности уступает бетону с добавкой импортной фибры.

Теплопроводность и теплоемкость фибробетона при нагреве

Для исследования теплофизических характеристик бетона без добавки и с добавкой полипропиленовой фибры были изготовлены опытные образцы в виде бетонных плит из того же состава бетона, что и кубики, размером 110×110 см и толщиной 11 см.

Перед бетонированием опытных образцов в опалубку устанавливали рамки-держатели (рис. 3) с закрепленными на них термоэлектрическими преобразователями — термопарами (ТП). Общий вид исследуемых образцов плит представлен на рис. 4.

Перед проведением огневых испытаний плотность бетона составляла:

- без добавки — 2405 кг/м³;
- с добавкой отечественной полипропиленовой фибры — 2365 кг/м³;
- с добавкой импортной полипропиленовой фибры — 2380 кг/м³.

Весовая влажность бетона в опытных образцах плит составила в среднем 4 %. Испытания проводились в малой горизонтальной огневой печи по стандартному температурному режиму, который описывается следующей зависимостью:

$$t_b = 345 \lg(0,133\tau + 1) + t_n,$$

где t_b — температура в огневой камере печи, соответствующая времени τ , °С;

t_n — начальная температура окружающей среды, °С;

τ — время нагрева образца, с.

Во время огневых испытаний температура в плитах замерялась с помощью трех термопар, установленных на расстоянии 25, 55 и 85 мм от обогреваемой поверхности, и трех термопар — на необогреваемой поверхности. Результаты прогрева плит представлены на рис. 5. Из рисунка видно, что при достижении температуры 100 °С кривые прогрева имеют явно выраженный пологий участок (площадку выпаривания), а скорость прогрева бетона с добавкой полипропиленовой фибры снижается по сравнению с бетоном без добавки. Возможно, при прогреве опытных образцов с добавкой фибры происходит плавление полипропилена и его выпаривание из состава бетона совместно с водой. В результате пористость материала увеличивается. В порах бетона после этого процесса остается воздушное пространство, что приводит к снижению теплопередачи в его структуре.

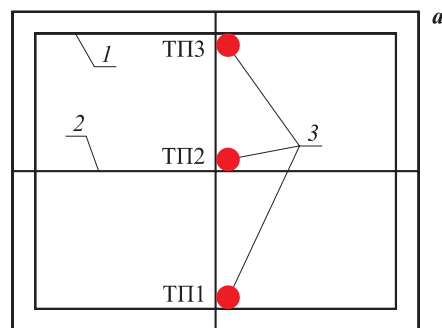


Рис. 3. Схема (а) и общий вид (б) рамки-держателя для термопар: 1 — металлическая рамка; 2 — металлическая проволока; 3 — термопары



Рис. 4. Плиты для исследования теплофизических характеристик

Если проанализировать графики прогрева бетонов с добавкой импортной и отечественной полипропиленовой фибры, то можно увидеть, что бетон с добавкой импортной фибры прогревается более интенсивно, чем с отечественной. В данном случае

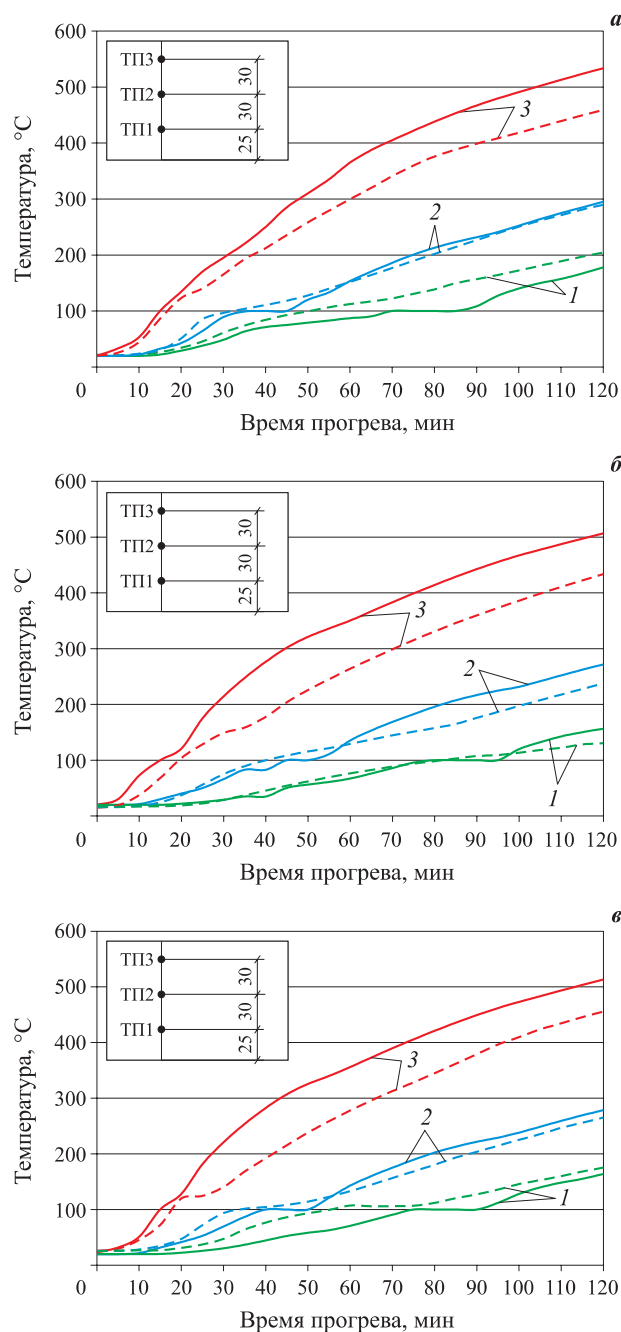


Рис. 5. Расчетные (—) и экспериментальные (---) кривые прогрева бетонных плит без добавки (а) и с добавкой отечественной (б) и импортной (в) фибры: 1–3 — температура в местах установки термодпар соответственно ТП1–ТП3

основное влияние на разницу в прогреве оказывают размеры волокон фибры. Длина волокон отечественной фибры больше, чем импортной, что увеличивает размер пор и их количество в бетоне.

Для определения коэффициентов теплопроводности λ_t и теплоемкости c_t использовали линейные зависимости от температуры t :

$$\lambda_t = A + Bt; \quad c_t = C + Dt.$$

Начальные коэффициенты теплопроводности A и теплоемкости C , соответствующие данной плот-

ности бетона, взяты из соответствующей справочной литературы. При наличии экспериментальных данных путем решения обратной задачи теплопроводности с помощью ранее разработанной компьютерной программы были определены теплофизические характеристики (коэффициенты теплопроводности и теплоемкости) фибробетона при повышенных температурах.

В результате исследований получены следующие зависимости:

- для бетона без добавки фибры:

$$\lambda_t = 1,3 - 0,0005t; \quad c_t = 481 + 0,9t;$$

- для бетона с добавкой отечественной и импортной полипропиленовой фибры:

$$\lambda_t = 1,3 - 0,0006t; \quad c_t = 481 + 0,92t.$$

Полученные зависимости наглядно показывают, что при введении в состав бетона полипропиленовой фибры при нагреве наблюдается более интенсивное снижение коэффициента теплопроводности λ_t фибробетона по сравнению с бетоном без добавки. В то же время при нагреве увеличение коэффициента теплоемкости c_t фибробетона происходит более высоким темпом по сравнению с бетоном без добавки.

Заключение

Установлено влияние нагрева в интервале температур 20–800 °С на прочностные и теплофизические характеристики бетона с добавкой отечественной и импортной полипропиленовой фибры в количестве 1 кг/м³.

В результате обработки экспериментальных данных методом регрессионного анализа получены аналитические зависимости для определения прочностных характеристик исследуемого фибробетона на осевое сжатие при воздействии высоких температур.

Эксперименты по определению теплофизических свойств (коэффициенты теплопроводности и теплоемкости) фибробетона проводили при одностороннем нагреве опытных образцов плит по температурному режиму стандартного пожара. Полученные зависимости теплофизических характеристик бетона с отечественной и импортной полипропиленовой фиброй при росте температуры дают возможность проводить расчеты прогрева железобетонных конструкций с выбранным видом добавки при температурном режиме стандартного пожара.

Проведенные исследования влияния температуры на прочностные и теплофизические свойства бетона с добавкой полипропиленовой фибры могут быть использованы при расчете предела огнестойкости несущих и ограждающих конструкций, изготовленных из данного вида фибробетона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *Kordina K.* Brände in unterirdischen Verkehrsanlagen // Bautechnik. — 2003. — Vol. 80, No. 5. — P. 327–338 (in German). DOI: 10.1002/bate.200302620.
3. *Яковлев А. И.* Расчет огнестойкости строительных конструкций. — М. : Стройиздат, 1988. — 144 с.
4. *Moore D. B., Lennon T.* Fire engineering design of steel structures // Progress in Structural Engineering and Materials. — 1997. — Vol. 1, No. 1. — P. 4–9. DOI: 10.1002/pse.2260010104.
5. *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.
6. *Бартелеми Б., Крюнна Ж.* Огнестойкость строительных конструкций / Пер. с фр. — М. : Стройиздат, 1985. — 216 с.
7. *Фёдоров В. С., Левитский В. Е., Молчадский И. С., Александров А. В.* Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций. — М. : Изд-во АСВ, 2009. — 408 с.
8. *Леннон Т., Мур Д. Б., Ван Ю. К., Бейли К. Г.* Руководство для проектировщиков к EN 1991-1-2, 1992-1-2, 1993-1-2 и 1994-1-2. Справочник по проектированию противопожарной защиты стальных, сталежелезобетонных и бетонных конструкций зданий и сооружений в соответствии с еврокодами. — М. : МГСУ, 2013. — 196 с.
9. *Голованов В. И., Кузнецова Е. В.* Эффективные средства огнезащиты для стальных и железобетонных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. — 2015. — № 9. — С. 82–90.
10. *Young-Sun Heo, Jay G. Sanjayan, Cheon-Goo Han, Min-Cheol Han.* 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.
11. *Werther N.* Brandversuche an Tunnelinnenschalenbetonen für den M 30-Nordtunnel in Madrid // Beton- und Stahlbetonbau. — 2006. — Vol. 101, Issue 9. — P. 729–731 (in German). DOI: 10.1002/best.200608187.
12. *Голованов В. И., Павлов В. В., Пехотилов А. В.* Защита железобетонных тубингов автодорожных тоннелей от хрупкого разрушения при пожаре // Пожарная безопасность. — 2008. — № 2. — С. 50–55.
13. *Голованов В. И., Павлов В. В.* Экспериментальные исследования огнестойкости блоков обделки тоннельных коллекторов // Пожарная безопасность. — 2011. — № 4. — С. 81–89.

Материал поступил в редакцию 15 марта 2017 г.

Для цитирования: 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. — 2017. — Т. 26, № 5. — С. 37–44. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.37-44.

English

STRENGTH AND THERMO-PHYSICAL PROPERTIES OF CONCRETE WITH POLYPROPYLENE FIBER UNDER STANDARD TEMPERATURE REGIMES

GOLOVANOV V. I., Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIIPPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; e-mail: pavelgol1@yandex.ru)

NOVIKOV N. S., Postgraduate Student, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: agps.nick182@gmail.com)

PAVLOV V. V., Head of Sector, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; e-mail: vv.pavlov@mail.ru)

KUZNETSOVA E. V., Senior Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; e-mail: vniipo@mail.ru)

ABSTRACT

The paper discusses the problems of protection of reinforced concrete tunnel structures from brittle (explosive) destruction of concrete tubing lining of the tunnel. The relevance of the research is attributed to increasing pace of construction of deep-level tunnels. Fires in such facilities could be catastrophic, often resulting in massive loss of life and great material losses, and their suppression requires involvement of considerable forces and assets.

During the construction and operation of road and subway tunnels, the protecting structures — reinforced concrete lining blocks have a higher moisture content, which in the event of fire in the early stages can lead to brittle failure of concrete tubing and the premature loss of their load-bearing capacity.

To reduce the effects of brittle fracture of concrete in the protective layer of concrete structures anti-spall mesh is installed, or fire retardant coating is used which reduces the intensity of heating of concrete during fire. However, recent studies have shown that the most effective way of protecting against brittle fracture of concrete from the point of view of labor and material cost is the use of additives in the concrete mixture in the form of polypropylene fibers. Earlier, experiments were carried out in VNIPO to determine the actual limits of fire resistance of tunnel tubing and the influence of polypropylene fibers additives in concrete mix on the likelihood of brittle fracture of concrete. However it seems impossible to assess the fire resistance of similar structures using numerical methods due to the lack of baseline data on the strength and thermo-physical properties of concrete with polypropylene fibers.

To achieve this goal, studies were conducted of concrete strength under axial compression with the addition of polypropylene fibers in the amount of 1 kg/m^3 and experimental data of thermal characteristics of fiber-reinforced concrete at high temperatures were obtained. The paper presents the results of experiments on the samples of fiber concrete under axial compression when exposed to temperature in the range $20\text{--}800^\circ\text{C}$. Graphics show the process of the strength change of concrete with and without additives during heating.

Analytical dependencies for determination of strength of concrete under compression were obtained with two types of polypropylene fibers at high temperatures. A comparison of the strength properties of the investigated concrete mixtures was carried out. It was established experimentally that when using the polypropylene fibers, the strength characteristics of fiber-concrete are reduced on average by 16 %, compared to the concrete without fiber additives, both at normal and high temperatures. As a result of processing of the experimental data by regression analysis the analytical dependencies were obtained for determination of strength characteristics of concrete under axial compression with the addition of domestic and imported fibers when exposed to high temperatures.

Experiments to determine the thermal properties of concrete with the addition of polypropylene fibers, were conducted during one-sided heating of board samples on the temperature regime of “standard fire”.

In the presence of experimental data, by solving the inverse heat conduction problem using the previously developed computer program, the thermophysical characteristics (thermal conductivity and heat capacity) of fiber-reinforced concrete at elevated temperatures were defined. With increasing temperature, the thermal conductivity decrease is more intensive in concrete with added polypropylene fibers than that of concrete without additives. At the same time, the addition of fiber does not affect the intensity of increase of the heat capacity of concrete. The obtained dependences of thermophysical properties of concrete with domestic and imported polypropylene fibers on temperature increase make it possible to carry out calculations of heating of concrete structures with selected additives on a temperature regime of “standard fire”.

The conducted studies on the effect of temperature on the strength and thermal properties of concrete with addition of polypropylene fiber reinforcement can be used in calculation of the fire resistance of load-bearing and enclosing structures made of this type of fiber-reinforced concrete.

Keywords: axial compression strength; concrete; fiber concrete; polypropylene fiber; temperature; coefficient of thermal conductivity; coefficient of heat capacity; temperature regime of “standard fire”.

REFERENCES

1. Dehn F., Werther N., Kniel J. Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig. *Beton- und Stahlbetonbau*, 2006, vol. 101, issue 8, pp. 631–636 (in German). DOI: 10.1002/best.200608186.
2. Kordina K. Brände in unterirdischen Verkehrsanlagen. *Bautechnik*, 2003, vol. 80, no. 5, pp. 327–338 (in German). DOI: 10.1002/bate.200302620.
3. Yakovlev A. I. *Raschet ognestoykosti stroitelnykh konstruktsiy* [Calculation of fire resistance of building structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 143 p. (in Russian).
4. Moore D. B., Lennon T. 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.
5. Maraveas C., Vrakas A. A. Design of concrete tunnel linings for fire safety. *Structural Engineering International*, 2014, vol. 24, no. 3, pp. 319–329. DOI: 10.2749/101686614X13830790993041.
6. Barthélémy B., Kruppa J. *Résistance au feu des structures béton — acier — bois*. Paris, Editions Eyrolles, 1978. 216 p. (in French) (Russ. ed.: Barthélémy B., Kruppa J. Ognestoykost stroitelnykh konstruktsiy. Moscow, Stroyizdat Publ., 1985. 216 p.).
7. Fedorov V. S., Levitskiy V. E., Molchadskiy I. S., Aleksandrov A. V. *Ognestoykost i pozharnaya opasnost stroitelnykh konstruktsiy* [Fire behavior and fire danger of building designs]. Moscow, ASV Publ., 2009. 408 p. (in Russian).
8. Lennon T., Moore D. B., Wang Yu. K., Bailey K. G. *Designers' Guide to EN 1991-1-2, 1992-1-2, 1993-1-2 and 1994-1-2. Handbook for the fire design of steel, composite and concrete structures to the Eurocodes*. Moscow, MGSU Publ., 2013. 196 p. (in Russian).
9. Golovanov V. I., Kuznetsova E. V. 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).
10. Young-Sun Heo, Jay G. Sanjayan, Cheon-Goo Han, Min-Cheol Han. Synergistic effect of combined fibers for spalling protection of concrete in fire. *Cement and Concrete Research*, 2010, vol. 40, no. 10, pp. 1547–1554. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.06.011.
11. Werther N. 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.
12. Golovanov V. I., Pavlov V. V., Pekhotikov A. V. Protection of concrete tubing highway tunnels by brittle fracture during a fire. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2008, no. 2, pp. 50–55 (in Russian).
13. Golovanov V. I., Pavlov V. V. Experimental research in fire resistance of liner blocks for tunnel collectors. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2011, no. 4, pp. 81–89 (in Russian).

For citation: Golovanov V. I., Novikov N. S., Pavlov V. V., Kuznetsova E. V. Strength and thermophysical 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.