УДК 624.042.5:624.454 DOI: 10.33622/0869-7019.2019.04.50-55

Огнестойкость бетонных конструкций с композитной стержневой арматурой

Сергей Иванович МЕРКУЛОВ, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой промышленного и гражданского строительства, e-mail: mersi.dom@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Курский государственный университет», 305000 Курск, ул. Радищева, 33

Владимир Иванович РИМШИН, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, руководитель Института развития города НИИСФ РААСН, e-mail: v.rimshin@niisf.ru

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН», 127238 Москва, Локомотивный проезд, 21

Эльзар Каныбекович АКИМОВ, аспирант, e-mail: elzarakimov@mail.ru

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», 308012 Белгород, ул. Костюкова, 46

***Аннотация**. Обеспечить долговечность железобетонных конструкций, эксплуатируемых в агрессивных условиях, позволяет применение композитной стержневой арматуры. Использование композитной арматуры в бетонных конструкциях требует решения проблемы огнестойкости данного класса конструкций. Огнестойкость композитной стержневой арматуры определяется моментом размягчения матрицы композитного стержня в результате нагрева в условиях пожара. Предельная температура для различных композитных материалов составляет 150...250 ˚С. При проектировании необходимо обеспечить нормативное значение предела огнестойкости конструкций. Для несущих конструкций каркаса предел огнестойкости соответствует моменту потери несущей способности, для междуэтажных перекрытий — потери несущей способности, целостности и теплоизолирующей способности. На огнестойкость бетонных конструкций со стержневой композитной арматурой влияет толщина защитного слоя бетона, которая обеспечивает совместную работу композитных стержней с бетоном. В статье приведены схемы изменения температуры по толщине бетонной конструкции, на основании которых предложена методика назначения толщины защитного слоя бетона для стержневой композитной арматуры для различных конструкций с учетом длительности огневого воздействия при пожаре. Определена номенклатура конструкций, в которых возможно применение стержневой композитной арматуры с обеспечением нормативных требований по пределу огнестойкости.*
***Ключевые слова**: композитная арматура, огнестойкость конструкции, предел огнестойкости, степень огнестойкости здания, защитный слой бетона.*

FIRE RESISTANCE OF CONCRETE STRUCTURES WITH COMPOSITE ROD REINFORCEMENT

Sergey I. MERKULOV, e-mail: mersi.dom@yandex.ru

Kursk State University, ul.Radishcheva, 33, Kursk 305000, Russian Federation

Vladimir I. RIMSHIN, e-mail: v.rimshin@niisf.ru

Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Locomotive proezd, 21, Moscow 127238, Russian Federation

Elzar K. AKIMOV, e-mail: elzarakimov@mail.ru

Belgorod state technological University. V. G. Shukhov,ul. Kostyukova, 46, Belgorod, 308012, Russian Federation

***Abstract**. The use of composite rod reinforcement makes it possible to ensure the durability of reinforced concrete structures, operated under aggressive conditions. The use of composite reinforcement in concrete structures requires solving the problem of fire resistance of this class of structures. The fire resistance of the composite rod reinforcement is determined by the moment of softening of the composite rod matrix as a result of heating under fire conditions. The maximum temperature for various composite materials is 150 ˚C — 250 ˚C. When designing, it is necessary to ensure the normative value of the limit of fire resistance of structures. For the bearing structures of the frame, the fire resistance limit corresponds to the moment of loss of the bearing capacity, for the intermediate floors — the loss of bearing capacity, integrity and thermal insulation ability. The main factor that provides the fire resistance of concrete structures with rod composite reinforcement is the thickness of the protective layer of concrete which ensures the joint operation of composite rods with concrete. Diagrams of the temperature change over the thickness of a concrete structure are presented, on the basis of them the methodology for the assignment of the value of the protective layer of concrete for the core composite reinforcement for different designs with due regard for the duration of fire effect in case of fire is proposed. The nomenclature of structures in which it is possible to use the rod composite reinforcement with the provision of regulatory requirements for the limit of fire resistance is determined.*
***Key words**: composite reinforcement, fire resistance of the structure, fire resistance, fire resistance of the building, protective layer of concrete.*

© МЕРКУЛОВ С. И., РИМШИН В. И., АКИМОВ Э. К., 2019

В настоящее время накоплен значительный опыт производства бетонных конструкций с композитной арматурой. Применение стержневой композитной арматуры обеспечивает долговечность железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных условиях. Неметаллическая стержневая композитная арматура обладает абсолютной стойкостью к агрессивной среде (хлоридной, сульфатной), высокой прочностью, также она неэлектропроводна и диамагнитна [1—4]. Однако на сегодняшний день остаются малоизученными свойства бетонных конструкций со стержневой композитной арматурой при действии высоких температур [2, 5].

Огнестойкость железобетонных конструкций обеспечивается защитным слоем бетона для рабочей стальной арматуры. В нормативных документах по проектированию железобетонных конструкций содержатся требования по назначению тощины защитного слоя бетона для стержневой стальной арматуры, в соответствии с которыми этот слой должен обеспечивать совместную работу арматуры с бетоном, анкеровку арматуры, защиту арматуры от внешних воздействий и огнестойкость конструкции. При этом основное назначение защитного слоя — обеспечение совместной работы стальной арматуры с бетоном и обеспечение качественной укладки бетонной смеси. В исследованиях [6] обоснованы требования к толщине защитного слоя бетона, необходимой для обеспечения надежной совместной работы арматуры с окружающим бетоном и его укладки. Толщина слоя бетона должна составлять не менее диаметра арматурного стержня и не менее размера наиболее крупного зерна заполнителя. Сводом правил СП 63.13330.2012 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» установлены минимальные значения толщины защитного слоя бетона рабочей арматуры. При назначении толщины защитного слоя из внешних факторов учитывается только влажность внутри помещений или внешней среды снаружи здания, указания по обеспечению огнестойкости конструкций отсутствуют.

1. Предел огнестойкости строительных конструкций

Степень огнестойкости зданий	Несущие стены, колонны	Наружные ненесущие стены	Междуэтажные перекрытия
I	R 120	E 30	REI 60
II	R 90	E 15	REI 45
III	R 45	E 15	REI 45
IV	R 15	E 15	REI 15

Огнестойкость строительных конструкций определяют как способность строительных конструкций сохранять в процессе пожара свои эксплуатационные функции в течение определенного промежутка времени. Для строительных конструкций нормируется значение предела огнестойкости, который измеряется промежутком времени от начала огневого воздействия до наступления одного из нормируемых для данных конструкций предельных состояний. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности (закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ) устанавливает пределы огнестойкости строительных конструкций, соответствующие степени огнестойкости зданий *(табл. 1)*.

В зависимости от степени огнестойкости зданий для железобетонных несущих конструкций каркаса установлены пределы огнестойкости по потере несущей способности от 15 до 120 мин (R 15 — R 120), для конструкций междуэтажных перекрытий определены пределы огнестойкости по потере несущей способности, целостности и теплоизолирующей способности от 15 до 60 мин (REI 15 — REI 60).

Для несущих железобетонных конструкций предельное состояние по огнестойкости — потеря несущей способности. Огнестойкость железобетонных конструкций определяется нагревом стальной рабочей стержневой арматуры в теле конструкции до 300...350 °С. При нагреве стальной арматуры до 350 °С и выше свойства арматуры резко снижаются [6, 7].

Аналогичные требования к огнестойкости бетонных конструкций предъявляются и в случае их армирования композитной стержневой арматурой. Ее основные физико-механические характеристики нормируются ГОСТ 31938—2012 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия». Композитная стержневая арматура состоит из волокон (стекловолокно, базальтовое волокно, углеродное волокно), которые определяют механические характеристики арматуры, и матрицы, обеспечивающей совместную работу волокон. За предельную температуру эксплуатации композитной стержневой арматуры назначается температура, при превышении которой происходит резкое снижение физико-механических характеристик арматуры вследствие размягчения матрицы полимерного композита. Стандартом ГОСТ 31938 для всех видов композитной арматуры установлено значение предельной температуры эксплуата-

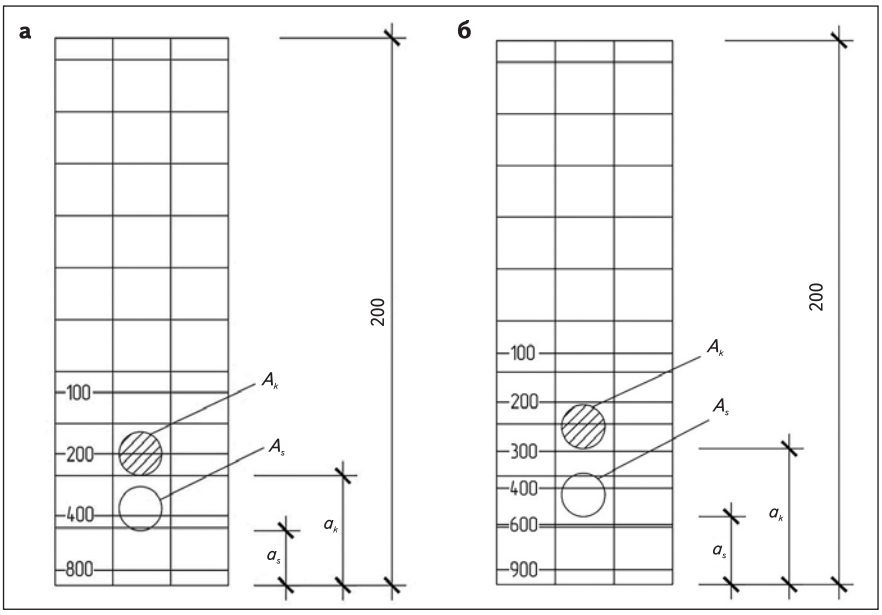

Рис. 1. ***Распределение температуры в сечении плиты из тяжелого бетона толщиной 200 мм при одностороннем нагреве при длительности пожара 60 мин (а) и 90 мин (б)***

ции 60 °С. При действии высокой температуры полимерная матрица в композитном стержне переходит из стеклообразного состояния в эластичное, происходит размягчение полимера матрицы. После достижения температуры стеклования полимера матрицы прочностные и деформационные свойства композитной арматуры резко снижаются, нарушается сцепление композитного стержня с бетоном. Кроме того, из-за значительного поперечного расширения композитных полимерных стержней при нагреве возможно откалывание бетона защитного слоя в конструкции. Предельная температура для композитного материала на основе полиэфирных смол составляет 150 °С, эпоксидных — 200 °С, фенолформальдегидных — 250 °С. При достижении предельной температуры целостность композитной стержневой арматуры полностью нарушается [8].

Для обеспечения огнестойкости бетонных конструкций с композитной арматурой необходимо установить требования к назначению толщины защитного слоя для предотвращения нагрева стержней до температуры размягчения полимерной матрицы стержневой арматуры.

СП 295.1325800.2017 «Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования» предписывает назначать толщину защитного слоя бетона рабочей арматуры из условия, что он должен обеспечить совместную работу стержневой композитной арматуры с бетоном, анкеровку рабочей арматуры в бетоне, возможность устройства стыков арматурных элементов, огнестойкость конструкций. Из этих условий толщину защитного слоя бетона рабочей арматуры следует принимать не менее 20 мм для сборных бетонных, не менее 25 мм для монолитных конструкций и во всех случаях не менее диаметра стержня арматуры. Аналогичные положения по назначению толщины защитного слоя бетона содержатся в нормах Канады, США, Италии [9—11]. Механизм сцепления композитной стержневой арматуры с бетоном изучен достаточно подробно, что позволяет установить толщину защитного слоя из условия совместной работы арматуры с бетоном и анкеровку рабочей арматуры в бетоне [12—15]. Исследования влияния температуры нагрева композитного материала на его механические свойства определяют подходы к назначению защитного слоя бетона с целью обеспечения огнестойкости конструкций [16, 17].

Несмотря на то, что СП 295.1325800 указывает на назначение толщины защитного слоя бетона с целью обеспечения огнестойкости конструкций, в документе отсутствуют рекомендации по учету степени огнестойкости здания при проектировании конструкций. Температура нагрева рабочей арматуры, определяющая огнестойкость конструкции, зависит от длительности действия открытого огня на конструкцию и схемы температурного воздействия. Для оценки огнестойкости железобетонных конструкций приняты схемы температурного воздействия при пожаре: для междуэтажных перекрытий рассматривалось воздействие снизу, для балок — с трех сторон, для каркаса — с четырех сторон.

Огнестойкость конструкций с композитной арматурой обеспечивается толщиной защитного слоя бетона, назначенной с учетом изменения температуры в теле конструкции при пожаре. Для оценки возможной температуры нагрева арматуры в теле конструкции применимы схемы распределения температуры в поперечном сечении железобетонных конструкций из тяжелого бетона [18].

Изменение температуры в теле железобетонной плиты сплошного сечения толщиной 200 мм из тяжелого бетона при одностороннем нагреве в условиях пожара показано на *рис. 1*. Толщина защитного слоя бетона для

стальной арматуры A_s и композитной арматуры A_k определяется глубиной прогрева бетона до критической температуры. Для рассматриваемых конструкций применение композитной стержневой арматуры на основе полиэфирных смол, температура стеклования полимерной матрицы которых составляет 150 °С, нецелесообразно. Возможно использование композитной арматуры на основе фенолформальдегидных смол, при этом толщина защитного слоя бетона увеличивается в два раза по сравнению с аналогичными конструкциями со стальной арматурой. При продолжительности пожара 60 мин защитный слой бетона должен составлять для стальной арматуры A_s – 20 мм, для композитной арматуры A_k – 40 мм, при продолжительности пожара 90 мин соответственно 25 и 50 мм.

Распределение температуры в теле железобетонной колонны сплошного сечения 300×300 мм из тяжелого бетона приведено на *рис. 2*. При действии открытого огня на колонну каркаса с четырех сторон в течение 45 мин и более зона критичных температур в отношении композитной арматуры распространяется до центра сечения конструкции. В этом случае толщина защитного слоя должна составлять: при длительности пожара 45 мин A_s = 27 мм, A_k = 45 мм, при продолжительности пожара 60 мин соответственно 40 и 60 мм.

Таким образом, влияние высокой температуры на физико-механические характеристики стержневой композитной арматуры накладывает определенные ограничения на ее применение в качестве рабочей арматуры бетонных конструкций. Использование стержневой композитной арматуры ограничивается температурой стеклования полимерной матрицы стержней. При проектировании бетонных конструкций со стержневой композитной арматурой за предельно допустимую температуру нагрева арматурных стержней в теле конструкции предлагается принимать значение на 50 °С ниже температуры стеклования полимера матрицы.

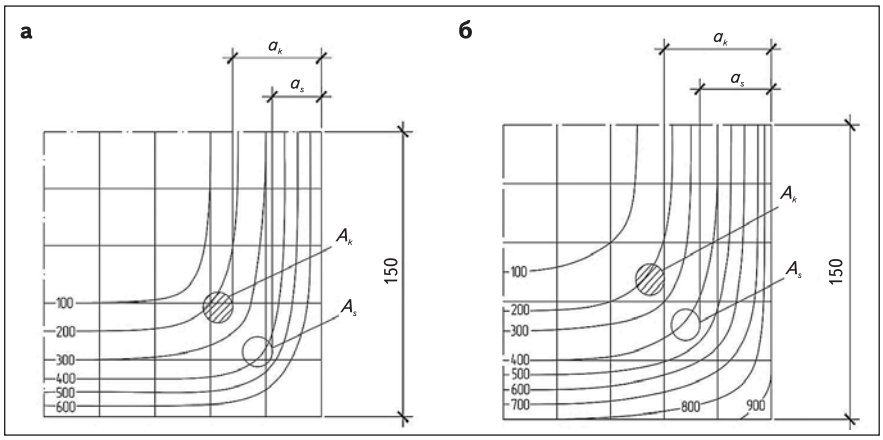

Рис. 2. ***Распределение температуры в колонне из тяжелого бетона сечением 300×300 мм при продолжительности пожара 45 мин (а) и 60 мин (б)***

2. Рекомендации по применению композитной стержневой арматуры

Степень огнестойкости конструкций	Материал матрицы композитного стержня конструкций/толщина защитного слоя бетона, мм								
	каркаса			наружных стен			междуэтажных перекрытий		
	ПЭС	ЭПС	ФФС	ПЭС	ЭПС	ФФС	ПЭС	ЭПС	ФФС
I	–	–	–	–	–	–	–	–	+/40
II	–	–	+/60	+/20	+/20	+/20	–	+/25	+/20
III	–	–	+/45	+/20	+/20	+/20	–	+/25	+/20

Проектирование бетонных конструкций с композитной полимерной арматурой следует выполнять с учетом требований к огнестойкости проектируемого объекта и материалу матрицы арматурного стержня: полиэфирная смола (ПЭС), эпоксидная смола (ЭПС), фенолформальдегидная смола (ФФС). С учетом схем распределения температуры в поперечном сечении железобетонных конструкций из тяжелого бетона при пожаре [18] и материала матрицы арматурного стержня можно определить толщину бетона защитного слоя *(табл. 2)*.

Проведенный анализ позволяет установить номенклатуру конструкций с учетом предела их огнестойкости, в которых возможно применение композитной арматуры. В строительных конструкциях зданий первой степени огнестойкости не допускается применение композитной стержневой арматуры. В несущих конструкциях каркаса допускается применение композитной стержневой арматуры, изготовленной с применением фенолформальдегидной смолы, только для зданий второй степени огнестойкости и ниже. При этом толщина бетона защитного слоя увеличивается в два раза по сравнению с требованиями СП 295.1325800.2017. В наружных стенах и междуэтажных перекрытиях зданий второй степени огнестойкости и ниже допускается применение композитной стержневой арматуры, толщина бетона

защитного слоя назначается по СП 295.1325800 с учетом рекомендаций *табл. 2*. В сборных пустотных и ребристых плитах, в плоских плитах толщиной менее 80 мм для зданий второй степени огнестойкости и ниже применение композитной стержневой арматуры не допускается.

Выводы

1. Проектирование бетонных конструкций с композитной полимерной арматурой следует выполнять с учетом требований к степени огнестойкости проектируемого объекта. Температура нагрева рабочей арматуры, определяющая огнестойкость конструкции, зависит от длительности действия открытого огня на конструкцию и схемы температурного воздействия.

2. Применение стержневой композитной арматуры ограничивается температурой стеклования полимерной матрицы стержней. За предельно допустимую температуру нагрева арматурных стержней в теле бетонной конструкции предлагается принимать значение на 50 °С ниже, чем температура стеклования полимера матрицы.

3. Толщину защитного слоя бетона рабочей стержневой композитной арматуры необходимо назначать из условий обеспечения совместной работы арматуры с бетоном, анкеровки рабочей арматуры в бетоне, возможности устройства стыков арматурных элементов, а в отдельных случаях, оговоренных заданием на проектирование, — из условия обеспечения огнестойкости конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Римшин В. И., Меркулов С. И.* Элементы теории развития бетонных конструкций с неметаллической композитной арматурой // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 5. С. 38–42.
2. *Римшин В. И., Меркулов С. И.* О нормировании характеристик стержневой неметаллической композитной арматуры // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 5. С. 22–26.
3. *Мадатян С. А.* Перспективы развития стальной и неметаллической арматуры железобетонных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2002. № 9. С. 16–19.
4. *Степанова В. Ф., Степанов А. Ю., Жирков Е. П.* Арматура композитная полимерная. М. : АСВ, 2013. 200 с.
5. *Меркулова Е. В., Акимов Э. К.* Обеспечение огнестойкости бетонных конструкций с композитной арматурой // Бюллетень строительной техники. 2018. № 8. С. 22–26.
6. *Холмянский М. М.* Контакт арматуры с бетоном. М. : Стройиздат, 1981. 184 с.
7. *Федоров В. С., Левитский В. Е., Молчадский И. С., Александров А. В.* Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций. М. : АСВ, 2009. 408 с.
8. *Ширко А. В., Камлюк А. Н., Спиглазов А. В., Дробыш А. С.* Определение механических свойств композитной арматуры с учетом температурного воздействия // Механика машин, механизмов и материалов. 2015. № 2(31). С. 59–65.
9. ACI 440.1R-06. Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars [Руководство по проектированию и конструированию бетона, армированного фиброкомпозитными стержнями]. American Concrete Institute, 2006. 44 p.
10. CAN/CSA-S6-02. Design and construction of building components with diber-reinforced polymers [Проектирование и строительство строительных компонентов с армированием волоконными полимерами]. Canadian Standards Association, 2002. 187 p.
11. CNR-DT 203/2006. Guide for the design and construction of concrete structures reinforced with fiber-reinforced polymer bars [Руководство по проектированию и строительству бетонных конструкций с полимерной стержневой арматурой]. Italy, Rome, 2006. 39 p.
12. *Римшин В. И., Кустикова Ю. О.* Теоретические основы расчета сцепления базальтопластиковой арматуры с бетоном // Известия Орловского ГТУ. 2009. № 2(22). С. 29–33.
13. *Хозин В. Г., Гизатуллин А. Р., Пискунов А. А.* Сцепление полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном // Известия КГАСУ. 2013. № 1(23). С. 211–213.
14. *Бенин А. В., Семенов С. Г.* Экспериментальные исследования сцепления композитной арматуры с плоской навивкой с бетоном // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 9. С. 74–76.
15. *Богданова Е. Р.* Изменение свойств сцепления композитной полимерной арматуры с бетоном в условиях воздействия различных сред // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 2. С. 39–43.
16. *Karbhari V. M., Chin J. W., Dunston D. et al.* Durability gap analysis for fiber-reinforced polymer composites in civil infrastructure [Анализ прочности армированных волокном полимерных композитов в строительных конструкциях] // Journal of Composites for Construction. 2003. No. 7(3). Pp. 238–247.
17. *Салия Г. Ш., Шагин А. Л.* Бетонные конструкции с неметаллическим армированием. М. : Стройиздат, 2007. 144 с.
18. Рекомендации по обследованию зданий и сооружений, поврежденных пожаром / НИИЖБ. М. : Стройиздат, 1987. 80 с.

R E F E R E N C E S

1. Rimshin V. I., Merkulov S. I. Elements of theory of development of concrete structures with nonmetallic composite reinforcement. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel' stvo*, 2015, no. 5, pp. 38–42. (In Russian).
2. Rimshin V. I., Merkulov S. I. About normalization of characteristics of rod non-metallic composite reinforcement. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel' stvo*, 2016, no. 5, pp. 22–26. (In Russian).
3. Madatyan S. A. Development trends of steel and nonmetal reinforcing bars for r.c. structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel' stvo*, 2002, no. 9, pp. 16–19. (In Russian).
4. Stepanova V. F., Stepanov A. Yu., Zhirkov E. P. *Armatura kompozitnaya polimernaya* [Composite polymer reinforcement]. Moscow, ASV Publ.. 2013. 200 p. (In Russian).
5. Merkulova E. V., Akimov E. K. Fire resistance of concrete structures with composite reinforcement. *Byulleten stroitelnoy tekhniki, 2018, no. 8, pp. 22—26. (In Russian).*
6. Kholmyansky M. M. *Kontakt armatury s betonom* [Contact of reinforcement with concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1981. 184 p. (In Russian).
7. Fedorov V. S., Levitsky V. E., Molchadsky I. S., Alexandrov A. V. *Ognestoykost' i pozharnaya opasnost' stroitel'nykh konstruktsiy* [Fire resistance and fire danger of building structures]. Moscow, Publishing house of DIA, 2009. 408 p. (In Russian).
8. Shirko A. V., Kamluk A. N., Spiglazova A. V., Drobysh S. A. Determination of mechanical properties of composite rebar with the effects of temperature. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov*, 2015, no. 2(31), pp. 59–65. (In Russian).
9. ACI 440.1 R-06. *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars*. American Concrete Institute, 2006. 44 p.
10. CAN/CSA-S6-02. *Design and construction of building components with diber-reinforced polymers*. Canadian Standards Association, 2002. 187 p.
11. CNR-DT 203/2006. *Guide for the design and construction of concrete structures reinforced with fiber-reinforced polymer bars*. Italy, Rome, 2006. 39 p.
12. Rimshin V. I., Kustikova Yu. O. Theoretical bases of calculation of adhesion of basalt-plastic reinforcement with concrete. *Izvestiya Orlovskogo GTU*, 2009, no. 2(22), pp. 29–33. (In Russian).
13. Khozin V. G., Gizatullin A. R., Piskunov A. A. Adhesion of polymer composite reinforcement with cement concrete. *Izvestiya KGASU*, 2013, no. 1(23), pp. 211–213. (In Russian).
14. Benin A. V., Semenov S. G. Experimental studies of coupling of composite rebar with flat wound with concrete. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel' stvo*, 2013, no. 9, pp. 74–76. (In Russian).
15. Bogdanova E. R. Changing the properties of adhesion of composite polymer reinforcement with concrete under the influence of various media. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel' stvo*, 2016, no. 2, pp. 39–43. (In Russian).
16. Karbhari V. M., Chin J. W., Dunston D. et al. Durability gap analysis for fiber-reinforced polymer composites in civil infrastructure. *Journal of Composites for Construction*, 2003, no. 7(3), pp. 238–247.
17. Saliya G. Sh., Shagin A. L. *Betonnye konstruktsii s nemetallicheskim armirovaniem* [Concrete structures with non-metallic reinforcement]. Moscow, Stroyizdat Publ., 2007. 144 p. (In Russian).
18. *Rekomendatsii po obsledovaniyu zdaniy i sooruzheniy, povrezhdennykh pozharom* [Recommendations for inspection of buildings and structures damaged by fire]. NIIZHB. Moscow, Stroyizdat Publ., 1987. 80 p. (In Russian).

Для цитирования: *Меркулов С. И., Римшин В. И., Акимов Э. К.* Огнестойкость бетонных конструкций с композитной стержневой арматурой // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 4. С. 50—55. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.04.50-55.

For citation: Merkulov S. I., Rimshin V. I., Akimov E. K. Fire Resistance of Concrete Structures with Composite Rod Reinforcement. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2019, no. 4, pp. 50—55. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2019.04.50-55.