УДК 666.97.620.1

© Р. О. Красновский, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник

(АО «Институт «Оргэнергострой»)

E-mail: krasnovskijro@ioes.ru

© Д. Е. Капустин, канд. техн. наук, доцент
(Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет)

E-mail: kde90@bk.ru

© П. С. Султыгова, канд. техн. наук, доцент
(Ингушский государственный университет)

E-mail: sultygova@yandex.ru

© П. В. Травкин, инженер
(АО «Институт «Оргэнергострой»)

E-mail: travnik2008@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-2-112-121

© R. O. Krasnovskij, PhD in Sci. Tech., senior research worker

(JSC «Institute «Orgenergostroy»)

E-mail: krasnovskijro@ioes.ru

© D. E. Kapustin, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Moscow State University of Civil Engineering (National Research University))

E-mail: kde90@bk.ru

© P. S. Sultygova, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Ingush State University)

E-mail: sultygova@yandex.ru

© P. V. Travkin, engineer
(JSC «Institute «Orgenergostroy»)

E-mail: travnik2008@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ИЗМЕНЕНИЕ ПЛОТНОСТИ, МАССЫ И ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ СТАЛЕФИБРОБЕТОНОВ

EFFECT OF HIGH TEMPERATURES ON CHANGES IN DENSITY, MASS AND LINEAR DIMENSIONS OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE

Рассматриваются результаты экспериментальных исследований по воздействию высоких температур при пожаре на изменение плотности, массы и линейных размеров сталефибробетонных с различным содержанием фибры разной прочности, вида и диаметра. Показано, что в диапазоне от 20 до 1100 °C плотность и масса линейно уменьшаются, и это изменение практически не зависит от наличия фибры и ее вида. Изменение линейных размеров незначительно. Полученные результаты позволяют выполнять экспресс-оценку степени повреждения сталефибробетона и бетона при пожаре, а также определять максимальную температуру в данной точке конструкции.

Ключевые слова: сталефибробетон, воздействие высоких температур, процент армирования по объему, изменение плотности, изменение линейных размеров.

The article discusses the results of experimental studies on the effect of high temperature in case of fire on the change of density, mass, and linear dimensions of steel fiber reinforced concrete with different contents of fibers of varying strength, type and diameter. It is shown that in the range from 20 °C to 1100 °C, density and mass are linearly reduced, and this change is almost independent of the presence of fibers and appearance. The change of linear dimensions is insignificant. The obtained results allow performing an express assessment of the damage degree to steel fiber reinforced concrete in case of fire, as well as determining the maximum temperature in this point of the construction.

Keywords: steel fiber reinforced concrete, high temperature impact, percentage of reinforcement by volume, change density change of the linear sizes.

При обследовании зданий (сооружений) после пожара важно оперативно оценить степень повреждения конструкций и определить значе-

ния температуры в различных точках огневого воздействия. Такие оценки делаются исходя из степени нарушения структуры материалов кон-

струкции. Одним из критериев оценки структурных изменений материала является его плотность.

Изменения структуры материалов железобетонных конструкций при воздействии высоких температур изучены достаточно хорошо [1–4, 6]. Известно, что при нагреве цемента и заполнителей в них проходят физические, физико-химические и механические процессы, приводящие к изменению их физико-механических и химических характеристик, в том числе и к изменению плотности.

Так, в диапазоне температур:

- от нормальной (20 ± 2 °С) до 100 °С из открытых пор цементно-песчаного раствора испаряется и выпаривается свободная вода;
- от 100 до 200 °С с поверхности пор цементного камня выпаривается адсорбционная вода до полного его обезвоживания;
- от 200 до 400 °С происходит потеря воды геля аморфной фазы гидрата силиката кальция;
- от 400 до 600 °С в стали одновременно проходят два процесса [6] — снижение до нуля модуля упругости с переходом металла в пластическое состояние и поверхностная температурная коррозия;
- от 400 до 800 °С удаляется химически связанная вода;
- от 550 до 600 °С происходит трансформация кварца мелкого заполнителя, сопровождающаяся увеличением его объема;
- от 800 до 1000 °С происходит механическое разрушение цементно-песчаного раствора.

Имеющаяся в литературе информация о влиянии нагрева на свойства сталефибробетона (СФБ) [5], как правило, получена из экспериментов на СФБ с малым процентом фибрового армирования (не более 1,5 % по объему) на каком-то одном виде фибры и с матрицей, имеющей прочность на сжатие не более В40.

С учетом анализа литературных данных и наших исследований СФБ, выполненных при нормальной температуре [12], было проведено исследование воздействия высоких температур при пожаре на СФБ с высокопрочной цементно-песчаной матрицей, различными видами стальной фибры и при различных процентах фибрового армирования.

Для исключения влияния характеристик матрицы эксперименты были выполнены на СФБ, имевших один и тот же состав высокопрочной самоуплотняющейся цементно-песчаной матрицы, такой же, как и при испытаниях при нормальной температуре (табл. 1).

Введение в состав матрицы микрокремнезема и гиперпластификатора приводит к тому, что в диапазоне температур 20–200 °С проходит реакция пуццоланизации, т. е. взаимодействие в присутствии влаги порошкообразных силикатных и алюмосиликатных веществ с гидроксидом кальция. Продукты реакции заполняют и коагулируют поры цементно-песчаной матрицы, повышая ее прочность [14, 15].

Для исследования было выбрано, как и в случае испытаний при нормальной температуре, пять видов фибры (табл. 2), различающихся длиной и диаметром волокон, наличием и отсутствием анкеров по их концам, значениями прочности стали.

Содержание по объему фибры в матрице варьировали от 0 до 6 %. Исключение составлял только СФБ с фиброй ФСПА 30'0,3, так как при содержании этой фибры более 1,5 % волокна при перемешивании сталефибробетонной смеси сцеплялись друг с другом, образуя «ежи».

Исследования проводили на образцах в форме пластин длиной 260 мм и шириной 60 мм при толщине 20 мм, что обеспечивало их равномерный прогрев. Каждая серия состояла не менее чем из трех образцов.

Образцы нагревали в муфельной электропечи до фиксированных значений температуры 110, 200, 400, 600, 800 и 1100 °С по стандартному для целлюлозного пожара режиму¹ при пределе огнестойкости R120, которому соответствует на-

¹ ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.

Таблица 1
Состав цементно-песчаной матрицы СФБ

Расход на 1 м ³ , кг				
Цемент	Песок	Вода	Микрокремнезем	Гиперпластификатор Sika 5-800
800	1250	260	45	8

Таблица 2

Характеристики фибры

Вид фибры	Описание фибры	Длина волокна, мм	Диаметр волокна, мм	Нормативное сопротивление растяжению, МПа
ФСПВ 30'0,8	Рубленая из проволоки волнистая	30	0,8	860
ФСПВ 15'0,3		15	0,3	2450
ФСПА 30'0,3	Рубленая из проволоки с анкерами по концам волокон	30	0,3	2650
Нарех 32'1,2	Фрезерованная из слябов с анкерами по концам волокон	32	1,2	600
ФСЛ 40'0,8	Резанная из стального листа переменного профиля	40	0,8	580

грев $(T - T_0) = 1029^\circ\text{C}$ в течение 120 мин со скоростью, описываемой зависимостью

$$T - T_0 = 345 \lg(8t + 1), \quad (1)$$

где T — температура в печи, соответствующая времени t , $^\circ\text{C}$; T_0 — температура в печи до начала теплового воздействия (принимается равной температуре окружающей среды), $^\circ\text{C}$; t — время, исчисляемое от начала испытания, мин.

До нагрева при нормальной температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ измеряли массу образцов и их геометрические размеры (толщину, ширину и длину), необходимые для определения плотности. Эти же характеристики образцов измеряли после их нагрева и остывания до нормальной температуры.

Изменение плотности

По результатам измерения плотности было определено ее относительное изменение $\delta\rho$ после нагрева до каждого из выбранных значений температуры:

$$\delta\rho = \frac{\rho_{Ti} - \rho_{T20}}{\rho_{T20}}, \quad (2)$$

где ρ_{Ti} — плотность, определенная при нормальной температуре после нагрева до температуры T_i ; ρ_{T20} — плотность ненагревавшегося образца, определенная при нормальной температуре.

Результаты приведены на рис. 1.

Анализ полученных диаграмм показывает, что плотность как матрицы, так и СФБ при возрастании температуры нагрева уменьшается (примерно на 12 %) практически по одному закону, причем характер изменения плотности СФБ не зависит от вида фибры и ее содержания. Но при температурах выше 400°C графики плотности СФБ располагаются выше графиков матри-

цы, что связано с наличием стальных волокон фибры.

При нагреве СФБ до 100°C в большинстве случаев диаграммы имеют максимум, определяемый степенью уплотнения СФБ [12].

Влияние содержания в СФБ фибры на изменение плотности СФБ после нагрева показано на диаграммах рис. 2.

На этих диаграммах можно выделить два участка, отличающихся характером изменения плотности. На первом участке, соответствующем содержанию фибры (по объему) до 1,5 %, диаграммы имеют максимумы и минимумы, определяемые влиянием вида фибры на степень уплотнения сталефибробетонной смеси. На втором (при содержании фибры от 1,5 до 6,0 %) в зависимости от вида фибры плотность СФБ изменяется монотонно, и при этом либо растет, либо остается постоянной, либо уменьшается, что можно объяснить недостаточным сцеплением волокон данного вида фибры с матрицей.

Поскольку плотность была определена по результатам прямых измерений массы и линейных размеров образцов, то это позволило оценить влияние изменения каждого из этих показателей на изменение плотности.

Изменение массы

По результатам измерения массы образцов после их нагрева было определено относительное изменение массы δm после нагрева до каждого из выбранных значений температуры:

$$\delta m = (m_{Ti} - m_{T20}) / m_{T20}, \quad (3)$$

где m_{Ti} — масса, измеренная при нормальной температуре после нагрева до температуры T_i ;

Рис. 1. Зависимость от температуры нагрева относительного изменения плотности матрицы и СФБ при содержании фибры по объему:
а — 0,5 %; б — 1,0 %; в — 1,5 %; г — 3,0 %; д — 6,0 %

m_{T20} — масса ненагревавшегося образца, измеренная при нормальной температуре.

На рис. 3 показано изменение величины Δm матрицы и СФБ при нагревании до 1100 °C.

Характер диаграмм относительного изменения массы матрицы и СФБ после нагрева до температур от 100 до 1100 °C мало отличается от характера изменения плотности (см. рис. 1). После нагрева масса уменьшалась, как и плотность, на 12 %.

Сравнение диаграмм для СФБ и матрицы показывает, что потеря массы, в основном, определяется содержанием фибры.

При содержании фибры до 0,5 % потери массы СФБ и матрицы невелики, мало зависят от вида фибры и могут объясняться разбросом экспериментальных данных.

При содержании фибры 1,0 и 1,5 % диаграммы СФБ расположены как выше, так и ниже диа-

Рис. 2. Зависимость плотности СФБ от содержания фибры при нормальной температуре (а) и после нагрева до температуры: б — 110 °C; в — 200 °C; г — 400 °C; д — 600 °C; е — 800 °C; ж — 1100 °C

Рис. 3. Зависимость от температуры нагрева относительного изменения массы δm матрицы и СФБ при содержании фибры по объему:
 а — 0,5 %; б — 1,0 %; в — 1,5 %; г — 3,0 %; д — 6,0 %

граммы матрицы, и наибольший разброс данных имеет место в диапазоне температуры от 200 до 800 °С.

При содержании фибры 3,0 и 6,0 % диаграммы СФБ расположены выше диаграммы матрицы, т. е. потери массы у СФБ меньше. Это можно объяснить тем, что при больших процентах армирования проявляется разница значений

объемной массы стали и продуктов ее коррозии (в 4–5 раз).

Изменение линейных размеров

По результатам измерения после нагрева линейных размеров (длины, ширины и толщины) образцов по формуле (3) было подсчитано относительное изменение после нагрева каждой из этих величин (δl_i) и по формуле (4) определено

среднее относительное изменение после нагрева линейных размеров (δl).

$$\delta l_i = \frac{l_{Ti} - l_{T20}}{l_{T20}}, \quad (3)$$

где l_{Ti} — среднее значение размера (длины, ширины или толщины) после нагрева до температуры T_i ; l_{T20} — среднее значение размера (длины, ширины или толщины) не нагревавшегося образца.

$$\delta l = (\delta l_1 + \delta l_2 + \delta l_3) / 3, \quad (4)$$

где δl_1 , δl_2 , δl_3 — относительное изменение после нагрева, соответственно, длины, ширины и толщины образца.

Диаграммы относительного изменения средних линейных размеров приведены на рис. 4.

Изменение вследствие нагрева линейных размеров (рис. 4) отражает одновременно структурные изменения в матрице и в стальной фибре с учетом их взаимодействия.

Рис. 4. Зависимость от температуры нагрева относительного изменения средних размеров образцов матрицы и СФБ при содержании фибры по объему:
а — 0,5 %; б — 1,0 %; в — 1,5 %; г — 3,0 %; д — 6,0 %

Анализ диаграммы матрицы показывает, что ее линейные размеры после нагрева уменьшаются, т. е. имеет место температурная усадка до 0,17 %, что вдвое больше влажностной усадки, равной 0,084 % по [13]. Уменьшение размеров адекватно отображает структурные изменения в матрице, аналогичные происходящим при нагреве бетонов:

- после нагрева до 100 °С за счет испарения свободной воды относительное изменение линейных размеров примерно на 12 % больше деформаций влажностной усадки при нормальной температуре;

- после нагрева от 110 до 200 °С за счет выпаривания свободной воды из пор матрицы линейные размеры уменьшаются менее интенсивно, и при этом эффект пуццоланизации, приводящий к росту прочности, не сказывается на изменении линейных размеров;

- после нагрева от 200 до 400 °С в результате выпаривания адсорбционной воды геля линейные размеры уменьшаются примерно с той же интенсивностью, как и при выпаривании свободной воды, и деформации температурной усадки достигают максимума;

- после нагрева от 550 до 600 °С объем матрицы увеличивается примерно на 9 % вследствие трансформации кварца, сопровождающейся увеличением его объема, и деструкции цементного камня из-за потери химически связанной воды;

- после нагрева от 600 до 1100 °С изменения линейных размеров практически не происходит.

Изменение после нагрева линейных размеров СФБ связано как с видом фибры, так и с ее содержанием:

- при нагреве до 600 °С линейные размеры монотонно уменьшаются;

- при нагреве от 600 до 800 °С у СФБ с некоторыми видами фибры имеет место эффект температурного расширения вследствие того, что до этого упруго сжатые (вследствие температурной усадки матрицы) волокна фибры начинают удлиняться, растягивая потерявшую прочность матрицу [16];

- при нагреве от 800 до 1100 °С существенного изменения линейных размеров не происходит, поскольку матрица практически полностью потеряла прочность, а волокна фибры в результате

температурной коррозии [6] полностью разрушены.

Следует обратить внимание на то, что в наших экспериментах эффект увеличения объема был зафиксирован в диапазоне от 600 до 800 °С (рис. 4, в, з, д), хотя сталь теряет упругость уже в диапазоне температур от 500 до 600 °С [6]. Из этого можно сделать вывод, что температура волокон фибры была ниже температуры на поверхности образцов. Это объясняется относительно низкой теплопроводностью цементно-песчаной матрицы, уменьшающейся по мере уменьшения ее плотности [17].

Выводы

На основании результатов проведенных экспериментальных исследований и анализа литературных данных можно сделать следующие основные выводы.

Изменения после нагрева плотности, линейных размеров и массы матрицы и СФБ являются следствием структурных изменений, происходящих под воздействием повышенных температур в матрице и стальной фибре. Изменения структуры матрицы, в основном, аналогичны имеющим место при воздействии повышенных температур на бетоны железобетонных конструкций и связаны с потерями воды и деструкционным разрушением входящих в ее состав материалов. Характерные точки на диаграммах изменения свойств СФБ в зависимости от температуры нагрева соответствуют тем же физико-химическим процессам, которые проходят при нагреве бетона железобетонных конструкций, но с некоторой поправкой на наличие в структуре СФБ стальной фибры.

Диаграммы изменения после нагрева линейных размеров (температурной усадки) существенно отличаются от диаграмм изменения массы и плотности. До температур в диапазоне от 400 до 600 °С (в зависимости от вида фибры) имеет место усадка, составляющая в среднем 22 % для СФБ и 17 % для матрицы. А при более высоких температурах нагрева линейные размеры либо не изменяются, либо имеет место температурное расширение.

Диаграммы изменения после нагрева плотности и массы (как матрицы, так и СФБ) имеют одинаковый характер, практически линейны, и, независимо от наличия и вида фибры, после на-

грева до 1100 °С масса и плотность снижаются на 12 %. Это говорит о том, что изменение плотности определяется в основном изменением массы.

В связи с тем что изменение линейных размеров после нагрева существенно меньше, чем изменения массы, оценка изменения плотности СФБ после пожара может выполняться только на основе измерения потери массы.

При проведении расчета распределения температур в сталефибробетонных конструкциях и железобетонных конструкциях со сталефибробетонными элементами следует учитывать, что теплопроводность сталефибробетона уменьшается с ростом процента фибрового армирования.

Библиографический список

1. Некрасов К. Д., Жуков В. В., Гуляева В. Ф. Тяжелый бетон в условиях повышенных температур. М.: Стройиздат, 1972. 128 с.
2. Жуков В. В. Основы стойкости бетонов при действии повышенных и высоких температурах: дис. ... д-ра техн. наук. М., 1981. 437 с.
3. Милованов А. Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. М.: Стройиздат, 1998. 296 с.
4. Пушенко А. С. Высокопрочный бетон в условиях воздействия высоких температур при пожаре: дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 2008. 217 с.
5. Lau A. Effect of high temperatures on normal strength concrete and high performance concrete containing steel fibers: Dissertation theses, The Hongkong polytechnic university, 2003. URL: <http://hdl.handle.net/10397/3456>
6. Колбасников Н. Г. Физические основы прочности и пластичности металлов. СПб.: СПбГПУ, 2004. 266 с. URL: http://scask.ru/htm/book_rbt/1/146.gif
7. Горб А. М., Войлоков И. А. Применение композитов на основе дисперсно-армированных бетонов при устройстве полов в зданиях производственно-складского назначения // Мир строительства и недвижимости. 2009. № 33. С. 27–33.
8. Талантова К. В., Мухеев Н. М. Исследование влияния свойств стальных фибр на эксплуатационные характеристики сталефибробетонных конструкций // Ползуновский вестник. 2011. № 1. С. 194–198.
9. Gutierrez R. M. de, Diaz L. N., Delvasto S. Effect of pozzolans on the performance of fiber-reinforced mortars // Cement and Concrete Composites. 2005. Vol. 27 (5). Pp. 593–598.
10. Neville A. M. Properties of concrete. 4th and final ed. Harlow: Longman, 1995. 844 p.

11. Капустин Д. Е. Несъемная сталефибробетонная опалубка как несущий конструктивный элемент железобетонных конструкций зданий и сооружений АЭС: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 282 с.

12. Дорф В. А., Красновский Р. О., Капустин Д. Е., Рогачев К. В., Горбунов И. А., Денисов А. В. Влияние типа и содержания стальной фибры на прочностные характеристики сталефибробетонов с цементно-песчаной матрицей // Сб. науч. тр. III Всерос. (II Междунар.) конф. по бетону и железобетону «Бетон и железобетон — взгляд в будущее» (12–16 мая 2014 г.): в 7 т. Т. III. М.: НИУ МГСУ, 2014. С. 140–150.

13. Литвиновский Д. А. Вязкость разрушения высокопрочного бетона после воздействия высоких температур: дис. ... канд. техн. наук. Брест, 2017. 182 с.

14. Леонович С. Н., Литвиновский Д. А. Вязкость разрушения высокопрочного бетона после воздействия высокой температуры // Строительные материалы. 2017. № 11. С. 12–17.

15. Дорф В. А., Красновский Р. О., Капустин Д. Е., Султыгова П. С. Эффект пуццоланизации при высоких температурах высокопрочной цементно-песчаной матрицы сталефибробетонов // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2 (61). С. 178–183.

16. Dorf V., Krasnovskiy R., Kapustin D., Sulytygova P., Umnyakova N. Influence of Fiber Content on the Conductivity of Steel Fiber-reinforced Concrete // Durability and Sustainability of Concrete Structures (DSCS-2018). Proceedings 2nd International Workshop. June 6–7. 2018. Moscow, Russia / American Concrete Institute. ACI Special Publication 2018–June (SP-326-62). Pp. 62.1–62.8.

17. Мухеев М. А., Мухеева И. М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.

References

1. Nekrasov K. D., Zhukov V. V., Gulyaeva V. F. *Tyazhelyy beton v usloviyakh povyshennykh temperatur* [Heavy weight concrete in condition of elevated temperatures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972, 128 p.
2. Zhukov V. V. *Osnovy stoykosti betonov pri deystvii povyshennykh i vysokikh temperaturakh*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Fundamentals of concrete resistance under the action of elevated and high temperatures. Dr. Sci. Tech. diss.]. Moscow, 1981, 437 p.
3. Milovanov A. F. *Stoykost' zhelezobetonnykh konstruktсий pri pozhare* [Resistance of reinforced concrete structures in case of fire]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1998, 296 p.
4. Pushenko A. S. *Vysokoprochnyy beton v usloviyakh vozdeystviya vysokikh temperatur pri pozhare*. Diss. kand. tekhn. nauk [High-strength concrete under the

influence of high temperatures in case of fire. PhD in Sci. Tech. diss.]. Rostov-on-Don, 2008, 217 p.

5. Lau A. *Effect of high temperatures on normal strength concrete and high performance concrete containing steel fibers*. Dissertation theses, Hong Kong Polytechnic University, 2003. Available at: <http://hdl.handle.net/10397/3456>

6. Kolbasnikov N. G. *Fizicheskie osnovy prochnosti i plastichnosti metallov* [Physical basis of strength and plasticity of metals]. St. Petersburg, SPbGPU Publ., 2004, 266 p. Available at: http://scask.ru/htm/book_rbt/1/146.gif

7. Gorb A. M., Voylov I. A. *Primenenie kompozitov na osnove dispersno-armirovannykh betonov pri ustroystve polov v zdaniyakh proizvodstvenno-skladskogo naznacheniya* [Using of composites based on dispersion-reinforced concrete at arrangement of floors in buildings for industrial and storage purposes]. *Mir stroitel'stva i nedvizhimosti – World of construction and real estate*, 2009, no. 33, pp. 27–33.

8. Talantova K. V., Mikheev N. M. *Issledovanie vliyaniya svoystv stal'nykh fibr na ehkspluatatsionnye kharakteristiki stalefibrobetonnykh konstruktsey* [Investigation of the effect of the properties of steel fibers on the behavior of steel-fiber-concrete constructions]. *Polzunovskiy vestnik – Polzunov Bulletin*, 2011, no. 1, pp. 194–198.

9. Gutierrez R. M. de, Diaz L. N., Delvasto S. Effect of pozzolans on the performance of fiber-reinforced mortars. *Cement and Concrete Composites*, 2005, vol. 27 (5), pp. 593–598.

10. Neville A. M. *Properties of concrete*. 4th and final ed. Harlow, Longman Publ., 1995. 844 p.

11. Kapustin D. E. *Nesemnaya stalefibrobetonnyaya opalubka kak nesushchiy konstruktivnyy ehlement zhelezobetonnykh konstruktsey zdaniy i sooruzheniy AEhS*. Diss. kand.tekhn.nauk [Fixed steel-fiber concrete formwork as a structural element of reinforced concrete structures of Atomic Power Station buildings and structures. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2016, 282 p.

12. Dorf V. A., et al. *Vliyanie tipa i sodержaniya stal'noy fibry na prochnostnye kharakteristiki stalefibrobetonov s tsementno-peschanoy matritsey* [Influence of the type and content of steel fiber on the strength characteristics of steel fiber reinforced concrete with cement-sand matrix]. *Trudy III Vseros. (II Mezhdunar.) konf. po betonu i zhelezobetonu «Beton i zhelezobeton — vzglyad v budushchee»* (12–16 maya 2014 g.) [Proc. of the III All-Russian (II International) conf. on concrete and reinforced concrete “Concrete and reinforced concrete – a look at the future” May 12–16, 2014]. In 7 vols. Vol. III. Moscow, NIU MGSU Publ., 2014, pp. 140–150.

13. Litvinovskiy D. A. *Vyazkost' razrusheniya vysokoprochnogo betona posle vozdeystviya vysokikh temperatur*. Diss. kand.tekhn.nauk [Fracture toughness of high-strength concrete after exposure to high temperatures. PhD in Sci. Tech. diss.]. Brest, 2017, 182 p.

14. Leonovich S. N., Litvinovskiy D. A. *Vyazkost' razrusheniya vysokoprochnogo betona posle vozdeystviya vysokoy temperatury* [Fracture toughness of high-strength concrete after exposure to high temperature]. *Stroitel'nye materialy – Building materials*, 2017, no. 11, pp. 12–17.

15. Dorf V. A., Krasnovskiy R. O., Kapustin D. E., Sulygova P. S. *Ehffekt puttsolanizatsii pri vysokikh temperaturakh vysokoprochnoy tsementno-peschanoy matritsy stalefibrobetonov* [Pozzolanic effect at high temperatures of high strength cement-sand matrix of steel-fiber concrete]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 2 (61), pp. 178–183.

16. Dorf V., et al. Influence of fiber content on the conductivity of steel fiber-reinforced concrete. Durability and sustainability of concrete structures (DSCS-2018). Proc. 2-nd International Workshop, June 6–7, 2018. Moscow, American Concrete Institute, *ACI Special Publication*, 2018–June (SP-326-62), pp. 62.1–62.8.

17. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of heat transfer]. Moscow, Ehnergiya Publ., 1977, 344 p.