УДК 691.322.7

К.Н. Алексеев, А.С. Курилко, Е.В. Захаров

ВЛИЯНИЕ БАЗАЛЬТОВОГО ВОЛОКНА (ФИБРЫ) НА ВЯЗКОСТЬ И ЭНЕРГОЕМКОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА*

Проведены исследования и установлены закономерности изменения ударной вязкости и удельной энергоемкости разрушения мелкозернистого бетона в зависимости от содержания базальтового волокна (фибры). В качестве армирующей фазы использовалось базальтовое волокно различной длины и диаметра, изготовленное с применением различных типов замасливателя (крахмальный, силан № 76, водная эмульсия 61). Установлено, что существенного увеличения сопротивления дисперсно-фиброармированного мелкозернистого бетона динамическим изгибающим нагрузкам не наблюдается. Образцы армированные волокнами марки 13-р-13-к, ВС16-6-76, ВС16-24-76 при содержании фибры в количестве от 1 до 2% незначительно, но уступают в ударной вязкости образцам контрольной неармированной серии. При содержании волокна в количестве 4% ударная вязкость образцов всех дисперсно-армированных серий превосходит контрольную. Наибольшее увеличение вязкости разрушения наблюдается при введении волокон марки 13-р-13-к, ВС16-24-76 соответственно на 39 и 29%. При содержании волокна в количестве 1%, энергоемкость разрушения мелкозернистого бетона увеличивается на 85% от исходной. Максимальное увеличение энергоемкости разрушения мелкозернистого бетона (в 2,2 раза) наблюдается при содержании базальтового волокна в количестве 4%.

Ключевые слова: фибра, базальтовое волокно, мелкозернистый бетон, композит, ударная вязкость, удельная энергоемкость разрушения.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-56-63

Введение

Практика возведения бетонных крепей, фундаментов и др. бетонных конструкций в шахтах и рудниках свидетельствует о том, что их прочностные характеристики во многом определяют безопасность ведения горных работ, долговременную устойчивость и сохранность горных выработок.

В настоящее время, интенсивно ведется разработка новых высокопрочных и недорогих строительных материалов на цементном вяжущем. Одним из способов повышения прочностных показателей строительных материалов является введение в их состав различных армирующих наполнителей (фибры) [1—7], в том числе базальтового волокна и получения на этой основе дисперсно-армированного композиционного материала обладающего повышенными физико-механическими характеристиками,

* Результаты работы получены при поддержке проекта РФФИ № 15-45-05101 «Исследование удельной энергоемкости разрушения и ударной вязкости армированного базальтовой фиброй бетона при отрицательных температурах и после воздействия циклов замораживания-оттаивания».

© К.Н. Алексеев, А.С. Курилко, Е.В. Захаров. 2017.

такими как прочность при изгибе и растяжении, морозостойкость и т.д. [3—6].

Так, паспортными характеристиками бетонов являются прочность при изгибе и сжатии — при статических нагрузках, но в процессе эксплуатации бетонные объекты в шахтах и рудниках подвергаются не только статическим, но и динамическим воздействиям, которые характеризуются более высокой (мгновенной) скоростью выделения энергии, в результате которых происходит накопление дефектов структуры — снижающих прочностные характеристики конструкции. Работоспособность бетонных конструкций при таких воздействиях можно оценить по характеристикам вязкости и энергоемкости разрушения.

В ИГДС СО РАН были разработаны методики позволяющие оценить сопротивление строительного материала на цементном вяжущем динамической нагрузке — ударной вязкости [9, 10] и удельной энергоемкости разрушения материала [11, 12]. В статье изложены результаты исследования этих показателей мелкозернистого бетона в зависимости содержания базальтовой фибры. На рис. 1 приведен снимок разлома образца мелкозернистого бетона армированного базальтовой фиброй.

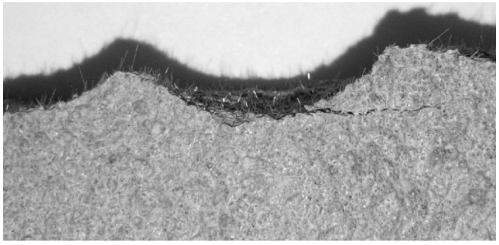

Рис. 1. Хаотичное распределение базальтовой фибры в среде мелкозернистого бетона. Излом в возрасте 2 суток

Методика проведения испытаний

Динамическую вязкость мелкозернистого бетона определяли по методу Шарпи, в основном, применяемом для металлов (ГОСТ 9454-78) и пластмасс (ГОСТ 4647-80). Сущность испытаний заключалась в том, что лежащий на двух опорах образец подвергался удару маятника, причем линия удара находилась посередине между опорами.

Ударная вязкость образцов (Дж/м^2) определялась как отношение работы, затраченной на его разрушение, к площади образца в плоскости удара (рис. 2). Испытания проводились на маятниковом копре БКМ-5-2 с максимальным запасом энергии 5 Дж.

Ввиду отсутствия, каких либо стандартов для исследования образцов бетона на маятниковых копрах, размеры образцов подбирались опытным путем. Оптимальные для испытаний геометрические размеры исследуемых образцов составили 25×25×100 мм. Для более точного разлома образца, в плоскости удара с противоположной стороны наносился U-образный пропил, играющий роль концентратора напряжений глубиной 2 мм (рис. 3).

После разрушения исследуемых образцов на маятниковом копре, подсчитывалась площадь поверхности образованная в месте среза S_0, затем зная потраченную на разлом образца работу W, вычисляли ударную вязкость разрушения K_{CU} по формуле:

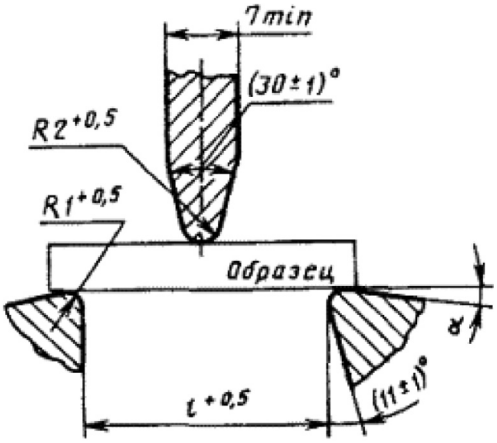

Рис. 2. Испытание образца по методу Шарпи

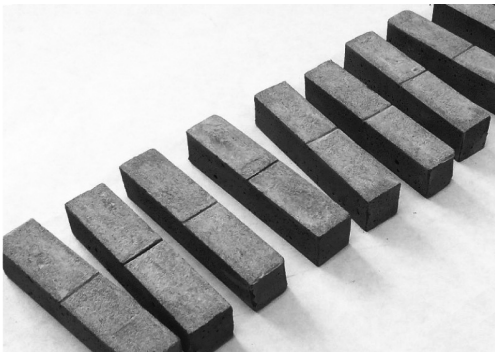

Рис. 3. Исследуемые образцы размерами 25×25×100 мм с U-образным концентратором напряжений

$$K_{CU} = \frac{W}{S_0}, \text{ Дж/м}^2 \qquad (1)$$

где W — затраты энергии на разрушение образца по маятнику, Дж; S_0 — площадь образованной поверхности в месте разлома образца, м^2 [9].

Удельная энергоемкость разрушения определялась на вертикальном копре К.И. Сыскова. По классификации Л.И. Барона данный метод относится к объемному разрушению материала.

Для определения удельной энергоемкости разрушения мелкозернистого бетона изготавливалось по 5 навесок образцов, каждая массой около 50 г, и состоящая из образцов правильной формы размерами 24×24×14 мм, которые в дальнейшем подвергались дроблению на вертикальном копре. Каждая навеска испытуемого материала помещалась в загрузочный стакан копра и измельчалась путем пятикратного сбрасывания ударника массой 2,4 кг с постоянной высоты 0,6 м.

Полученный таким образом дробленый материал просеивался на ситах с размерами ячеек 25; 20; 15; 10; 8; 5; 2; 1; 0,5; 0,25 мм и по данным гранулометрического анализа рассчитывалась площадь вновь образованной поверхности. Для упрощения расчетов форма частиц принималась шарообразной. Расчет производился по формуле:

$$\Delta S = \frac{6}{\rho_0} \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{M_i}{d_i} - 6 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{M_n}{\rho_0}\right)^2}, \text{ м}^2 \qquad (2)$$

где $d_i = 0{,}5*(d_i + d_{i+1})$ — средний размер класса массой M_i, мм; ρ_0 — плотность породы, кг/м^3; M_n — масса исходного образца породы, кг.

Удельная энергоемкость разрушения W цементного камня определялась отношением затраченной на механическое дробление энергии E к площади вновь образованной поверхности ΔS:

$$E = \eta \cdot m \cdot g \cdot H \cdot k, \text{ Дж} \qquad (3)$$

$$W = E/\Delta S, \text{ Дж/м}^2 \qquad (4)$$

где η = 0,95 — потери энергии на трение; m — масса груза, кг; g — ускорение свободного падения м/с^2; H — высота сбрасывания груза, м; k — количество сбрасываний [12].

Описание исследуемых материалов

Для изготовления образцов были использованы следующие материалы:

- цемент М400 производства ОАО ПО «Якутцемент»;
- песок речной, карьер «Пригородный» (г. Якутск), сод. ГИП = 0,39%, насыпная плотность 1417,9 кг/м^3, $M_к$ = 1,2;
- рубленное базальтовое волокно (табл. 1).

Содержание базальтового волокна варьировало от 1 до 4% от общей массы цемента и песка в сухом состоянии (табл. 2). Смешение компонентов смеси производилось при помощи миксера, уплотнение на виброплощадке СМЖ-539. Образцы выдерживались в эксикаторах при 100% влажности среды и температуре 20±1 °С в течение 28 суток.

Результаты проведенных исследований представлены в табл. 3 и на рис. 4—6.

Как видно из данных представленных в табл. 3 и на рис. 4 существенного увеличения сопротивления дисперсно-

Таблица 1

Характеристики базальтовых волокон применяемых в качестве дисперсно-армированной фазы исследуемого состава мелкозернистого бетона

№	Тип волокна	Производитель	Длина, мм	Диаметр, мкм	Тип замасливателя
1	13-р-13-к	ОАО «Ивотстекло»	13	13	крахмальный
2	ВС16-6-76	ООО «ТД «Русский базальт»	6	16	силан № 76
3	ВС16-24-76		24	16	силан № 76
4	ВС23-6-61		6	23	водная эмульсия № 61
5	ВС23-12-61		12	23	водная эмульсия № 61

Таблица 2

Расход компонентов смеси Цемент/Песок = 1/1 (по объему), Вода/Цемент = 0,5

Содержание базальтового волокна (БВ), %	Расход, кг/м³			
	цемент	песок	вода	БВ
0	792,1	940,3	396	0
1				17,3
2				34,6
4				69,3

Таблица 3

Влияние различных типов базальтового волокна на энергетические параметры разрушения мелкозернистого бетона.

Тип волокна	Содержание базальтового волокна, %	Ударная вязкость			Удельная энергоемкость разрушения	
		Дж/м²	%	V_m, %*	Дж/м²	%
Контрольная серия	0	714	100	14,1	1560	100
(1) 13-р-13-к	1	619	87	4,6	2658	170
	2	657	92	7,8	3016	193
	4	990	139	30,9	2073	133
(2) ВС16-6-76	1	622	87	10,4	2439	156
	2	603	85	4,3	2733	175
	4	750	105	13,8	1880	120
(3) ВС16-24-76	1	647	91	10,0	2054	132
	2	637	89	9,3	2002	128
	4	918	129	22,1	2098	134
(4) ВС23-6-61	1	658	105	5,3	2887	185
	2	668	106	8,7	2661	171
	4	740	118	7,2	3446	221
(5) ВС23-12-61	1	668	106	5,8	2493	160
	2	657	105	4,8	3088	198
	4	693	110	7,0	3196	205

*V_m — коэффициент вариации ГОСТ 53231-2008
*V_m — coefficient of variation GOST 53231-2008

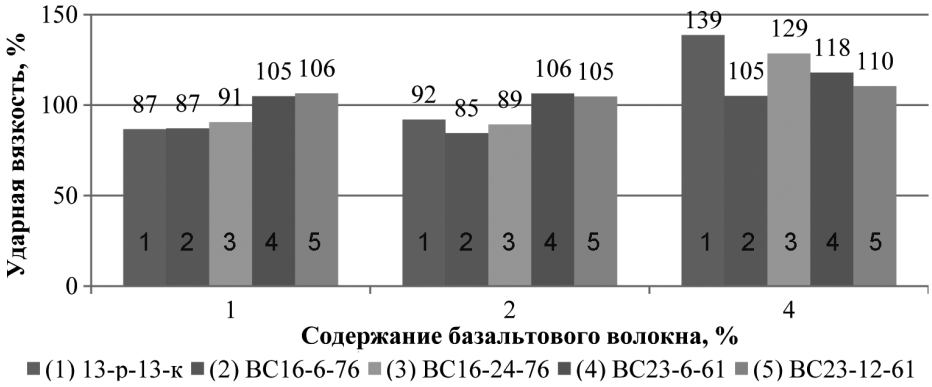

Рис. 4. Изменение вязкости разрушения образцов армированной серии относительно контрольной серии (100%)

фиброармированного мелкозернистого бетона динамическим изгибающим нагрузкам не наблюдается. Более того, образцы армированные волокнами серий 1—3 при содержании фибры в количестве от 1 до 2% незначительно, но уступают в ударной вязкости образцам контрольной неармированной серии. При содержании волокна в количестве 4% ударная вязкость всех образцов фиброармированных серий превосходит контрольную.

Наибольшее увеличение (на 39 и 29%) наблюдается у волокон марок 13-р-13-к и ВС16-24-76 соответственно. Однако необходимо отметить (табл. 3) высокий коэффициент вариации данных серий — 31 и 22%.

Как видно из графиков представленных на рис. 5 линии тренда у серий образов 4 и 5 армированных базальтовой фиброй длиной 6 и 12 мм замасливатель «водная эмульсия № 61» заметно отличаются от линий других серий, что возможно связано с влиянием типа замасливателя. У армированных образцов серии 1—2 локальный максимум энергоемкости разрушения превосходящий не армированные образцы на 70—90% расположен в диапазоне содержания волокна от 1 до 2%. Из диаграмм представленных на рис. 6 видно, что уже при

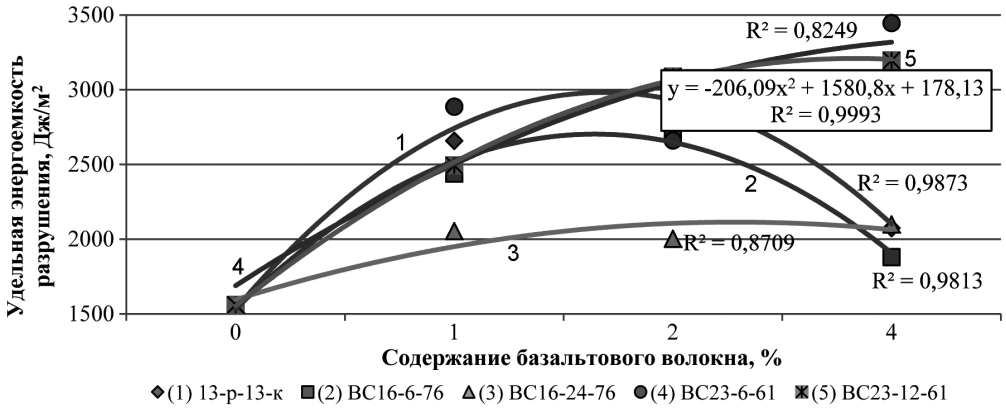

Рис. 5. Влияние различных типов базальтового волокна (фибры) на энергоемкость разрушения мелкозернистого бетона

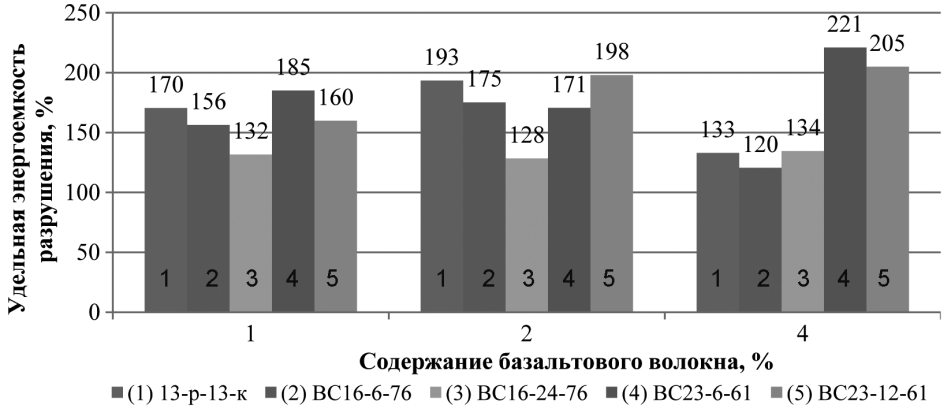

Рис. 6. Изменение энергоемкости разрушения образцов армированной серии относительно контрольной серии (100%)

содержании волокна в количестве 1%, энергоемкость разрушения мелкозернистого бетона увеличивается до 85% от исходной. Максимальное увеличение энергоемкости разрушения в 2—2,2 раза наблюдается у образцов содержащих 4% базальтовой фибры марок ВС23-12-61 и ВС23-6-61. Образцы серии армированной наиболее длинными волокнами серии ВС16-24-76 длиной 24 мм показали меньший прирост энергоемкости разрушения на 20÷32%.

Заключение

Проведенные исследования показали, что базальтовая фибра существенно увеличивает энергоемкость разрушения мелкозернистого бетона до 2,2 раз.

По нашему мнению волокна марок 13-р-13-к, ВС16-6-76, ВС23-12-61 и ВС23-6-61 могут быть рекомендованы в качестве армирующей добавки в смеси мелкозернистого бетона для торкретирования горных выработок и возведения конструкций на их основе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рабинович Ф. М.* Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технологии и конструкции. — М.: Изд-во АСВ, 2004. — 560 с.

2. *Saber F., Mahdi N.* Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume // Construction and Building Materials, 2017, Vol. 132, Pp. 170—187.

3. *Cory H., Hatem M. Seliem, Adel El-Safty, Sami H. Rizkalla* Use of basalt fibers for concrete structures // Construction and Building Materials, 2015, Vol. 96, Pp. 37—46.

4. *Боровских И. В., Морозов Н. М., Галеев А. Ф.* Влияние базальтовой фибры на долговечность бетона / Инновационное развитие современной науки. Материалы международной научно-практической конференции. — Уфа: Изд-во ООО «ОМЕГА САЙНС», 2015. — С. 25—27.

5. *Боровских И. В.* Высокопрочный тонкозернистый базальтофибробетон. Автореферат дисс... канд. техн. наук. — Казань, 2009. — 21 с.

6. *Зимин Д. Е., Татаринцева О. С.* Армирование цементных бетонов дисперсными материалами из базальта // Ползуновский вестник. — 2013. — № 3. — С. 286—289.

7. *Afroughsabet V., Ozbakkaloglu T.* Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers // Construction and Building Materials, 2015, Vol. 94, Pp. 73—82.

8. *Boulekbache B., Hamrat M., Chemrouk M., Amziane S.* Flexural behaviour of steel fibre-reinforced concrete under cyclic loading // Construction and Building Materials, 2016, Vol. 126, Pp. 253—262.

9. *Курилко А.С., Алексеев К.Н., Захаров Е.В., Свинобоев А.К.* Исследование удельной энергоемкости разрушения и ударной вязкости армированного базальтовой фиброй бетона при отрицательных температурах и после воздействия циклов замораживания-оттаивания: отчет о НИР по проекту РФФИ № 15-45-05101 «р_восток_а» (этап I). — Якутск: ИГДС им. Н.В. Черского СО РАН, 2016. — 24 с.

10. *Алексеев К.Н., Захаров Е.В.* Некоторые особенности влияния базальтовой фибры (диам. 13 мкм) на ударную вязкость мелкозернистого бетона // Молодой ученый. — 2015. — № 22. — С. 118—121.

11. *Захаров Е.В.* Определение энергоемкости разрушения известняков на маятниковом копре / «ЭРЭЛ-2011»: Материалы Всероссийской конференции научной молодежи. Т. 1. — Якутск: Изд-во «Цумори Пресс», 2011. — С. 83—86.

12. *Алексеев К.Н., Курилко А.С.* Влияние циклов замораживания оттаивания на энергоемкость разрушения цементного камня армированного базальтовой фиброй // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 10. — С. 150—157. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Алексеев Константин Николачевич[1] — младший научный сотрудник,
e-mail: const1711@mail.ru,
Курилко Александр Сардокович[1] — доктор технических наук,
зав. лабораторией, заместитель директора ИГДС СО РАН,
e-mail: a.s.kurilko@igds.ysn.ru,
Захаров Евгений Васильевич[1] — кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, e-mail: zaharoff@igds.ysn.ru
[1] Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН,
лаборатория горной теплофизики.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 12, pp. 56–63.

UDC 691.322.7

K.N. Alekseev, A.S. Kurilko, E.V. Zakharov

INFLUENCE OF BASALT FIBER ON VISCOSITY AND RUPTURE ENERGY OF FINELY GRAINED CONCRETE

On the basis of previously developed methods, studies have been carried out and the regularities of the change in the toughness and specific energy intensity of the destruction of fine-grained concrete depending on the content of basalt fiber (fiber) have been established. As a reinforcing phase, basalt fiber of various lengths (6, 12–13, 24 mm) and diameter (13, 16, 23 μm) was used, made using various types of lubricant (starch, silane No. 76, water emulsion 61).

It has been established that a substantial increase in the resistance of dispersed fibrous reinforced fine-grained concrete to dynamic bending loads is not observed. Samples fiber reinforced with grades 13-r-13-k, BC16-6-76, BC16-24-76 at a fiber content of 1 to 2% are insignificant, but inferior in impact strength to the samples of the control non-reinforced series. When the fiber content is 4%, the impact strength of the samples of all dispersed-reinforced series exceeds the control one. The greatest increase in the fracture toughness is observed with the introduction of fibers 13-r-13-k, BC16-24-76, respectively, by 39 and 29%.

The maximum increase in the energy intensity of destruction of fine-grained concrete, 2.2 times, is observed when the content of basalt fiber is 4%. With a fiber content of 1%, the energy intensity of the destruction of fine-grained concrete is increased by 85% of the original. The trend lines of specimens reinforced with fiber VS23-6-61 and VS23-12-61 on the water emulsion No. 61 lubricant differ markedly from the lines of other series, which indicates the possible influence of the type of lubricant on the specific energy intensity of the destruction.

Samples of the series reinforced with the longest fibers BC16-24-76 with a length of 24 mm — showed a smaller increase in the energy intensity of fracture by 20 ÷ 32%.

Key words: fiber, basalt fiber, fine-grained concrete, composite, impact strength, specific energy consumption of fracture.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-56-63

AUTHORS

Alekseev K.N.[1], Junior Researcher, e-mail: const1711@mail.ru,
Kurilko A.S.[1], Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory,
Deputy Director, e-mail: a.s.kurilko@igds.ysn.ru,
Zakharov E.V.[1], Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher, e-mail: zaharoff@igds.ysn.ru,
[1] Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, 677980, Yakutsk, Russia.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study has been supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 15-45-05101: Analysis of Specific Energy of Failure and Impact Strength of Basalt Fiber-Reinforced Concrete under Negative Temperature and after Cyclical Freezing-and-Thawing.

REFERENCES

1. Rabinovich F. M. *Kompozity na osnove dispersno-armirovannykh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologii i konstruktsii* (Composites based on fiber-reinforced concretes. Theory, design, technology and structure), Moscow, Izd-vo ASV, 2004, 560 p.

2. Saber F., Mahdi N. Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. *Construction and Building Materials*, 2017, Vol. 132, Pp. 170—187.

3. Cory H., Hatem M. Seliem, Adel El-Safty, Sami H. Rizkalla Use of basalt fibers for concrete structures. *Construction and Building Materials*, Vol. 96, 2015, Pp. 37—46.

4. Borovskikh I. V., Morozov N. M., Galeev A. F. *Innovatsionnoe razvitie sovremennoy nauki. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* (Innovative Development of the Modern Science: International Scientific-Practical Conference Proceedings), Ufa, Izd-vo OOO «Omega Sayns», 2015, pp. 25—27.

5. Borovskikh I. V. *Vysokoprochnyy tonkozernistyy bazal'tofibrobeton* (High-strength fine-grained basalt fiber-reinforced concrete), Candidate's thesis, Kazan, 2009, 21 p.

6. Zimin D. E., Tatarintseva O. S. *Polzunovskiy vestnik*. 2013, no 3, pp. 286—289.

7. Afroughsabet V., Ozbakkaloglu T. Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 2015, Vol. 94, Pp. 73—82.

8. Boulekbache B., Hamrat M., Chemrouk M., Amziane S. Flexural behaviour of steel fibre-reinforced concrete under cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 2016, Vol. 126, Pp. 253—262.

9. Kurilko A. S., Alekseev K. N., Zakharov E. V., Svinoboev A. K. *Issledovanie udel'noy energoemkosti razrusheniya i udarnoy vyazkosti armirovannogo bazal'tovoy fibroy betona pri otritsatel'nykh temperaturakh i posle vozdeystviya tsiklov zamorazhivaniya-ottaivaniya*: otchet o NIR (Analysis of specific energy of failure and impact strength of basalt fiber-reinforced concrete under negative temperature and after cyclical freezing-and-thawing. Research report), Yakutsk, IGDS im. N.V. Cherskogo SO RAN, 2016, 24 p.

10. Alekseev K. N., Zakharov E. V. *Molodoy uchenyy*. 2015, no 22, pp. 118—121.

11. Zakharov E. V. *«EREL-2011». Materialy Vserossiyskoy konferentsii nauchnoy molodezhi*. T. 1 (EREL-2011: All-Russian Scientific Youth Conference Proceedings, vol. 1), Yakutsk, Izd-vo «Tsumori Press», 2011, pp. 83—86.

12. Alekseev K. N., Kurilko A. S. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 10, pp. 150—157.