

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 691.32

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-215-228

Оригинальная статья /Original Paper

Строительно-технические свойства вермикулитобетона и фибровермикулитобетона с вулканической пемзой при воздействии повышенных температур

Т.А. Хежев¹, Г.Н. Хаджишалапов², А.В. Журтов¹, Ф.М. Шогенова¹, А.В. Калажоков¹

¹ Кабардино-Балкарский государственный университет,
¹360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173, Россия,

² Дагестанский государственный технический университет,
²367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка составов вермикулитобетона и фибровермикулитобетона с вулканической пемзой; исследование строительно-технических свойств разработанных составов с вулканической пемзой при воздействии повышенных температур. **Метод.** Рассмотрены методы повышения огнестойкости железобетонных конструкций. Исследования направлены на разработку вермикулитобетона и фибровермикулитобетона с вулканической пемзой для огнезащиты строительных конструкций и изготовления жаростойких изделий и конструкций. Для снижения стоимости вермикулитобетона предлагается его частичная замена вулканической пемзой. Для исследования вермикулитобетонов с вулканической пемзой, армированных базальтовой фиброй, использовался ротатбельный план второго порядка типа правильного шестиугольника. **Результат.** Замена части дорогостоящего заполнителя (вспученного вермикулита) пемзой приводит к незначительному повышению средней плотности композита, при этом предел прочности на изгиб и сжатие возрастают; повышаются жаростойкие свойства вермикулитобетона с вулканической пемзой, которая являясь гидравлически активной добавкой, способна вступать в реакцию гидратации с компонентами цемента, устраняя вредное влияние вторичной гидратации свободного оксида кальция. Исследовано влияние температуры нагрева на изменение строительно-технических свойств вермикулитобетонов и фибровермикулитобетонов, в том числе с добавкой пемзы. Выявлено, что дисперсное армирование базальтовыми фибрами снижает усадочные деформации, при нагреве до $t=800\text{ }^{\circ}\text{C}$ усадка уменьшается с 0,7 до 0,5 % в сравнении с исходной бетонной матрицей. **Вывод.** Зависимость «предел прочности на сжатие = f (средняя плотность бетона)» существенно зависит от наличия и соотношения пемзы в составе вермикулитобетона, при этом повышение температуры выдерживания до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ или $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к снижению предела прочности на сжатие от 15 до 25 %, причем основное снижение происходит при нагреве до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, дальнейший рост температуры оказывает незначительное влияние. Зависимость предела прочности при изгибе от предела прочности на сжатие в целом сохраняется независимо от температуры нагрева, причем нагрев бетона не снижает относительный предел прочности при изгибе, т.е. соотношение прочность при изгибе/прочность на сжатие не снижается. Дисперсное фибровое армирование повышает относительный предел прочности при изгибе примерно на 70% независимо от температуры нагрева.

Ключевые слова: портландцемент, вспученный вермикулит, пемза, базальтовое волокно, армоцемент, средняя плотность, предел прочности на сжатие и изгиб, процент армирования, план эксперимента, температура, стандартный пожар, огнестойкость

Для цитирования: Т.А. Хежев, Г.Н. Хаджишалапов, А.В. Журтов, Ф.М. Шогенова, А.В. Калажоков. Строительно-технические свойства вермикулитобетона и фибровермикулитобетона с вулканической пемзой при воздействии повышенных температур. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):215-228. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-215-228

Construction and technical properties of vermiculite concrete and fibro vermiculite concrete with volcanic pumice under the influence of elevated temperatures

T.A. Khezhev¹, G.N. Khadzhashalapov², A.V. Zhurlov¹, F.M. Shogenova¹,
A.V. Kalazhokov¹

¹H.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University,

¹173 Chernyshevsky Str., Nalchik 360004, Russia,

²Daghestan State Technical University,

²367026, Makhachkala, Imam Shamil Ave., 70, Russia

Abstract. Objective. Development of compositions of vermiculite concrete and fibro vermiculite concrete with volcanic pumice. Investigation of the construction and technical properties of the developed compositions of vermiculite concrete and fibrovermiculite concrete with volcanic pumice under the influence of elevated temperatures. **Method.** Methods of increasing the fire resistance of reinforced concrete structures are considered. The research is aimed at the development of vermiculite concrete and fibro vermiculite concrete with volcanic pumice for fire protection of building structures and the manufacture of heat-resistant products and structures. To reduce the cost of vermiculite concrete, its partial replacement with volcanic pumice is proposed. For the study of vermiculite concrete with volcanic pumice reinforced with basalt fiber, a rotatable plan of the second order of the regular hexagon type was used. **Result.** Replacing a part of an expensive aggregate (expanded vermiculite) with pumice leads to a slight increase in the average density of the composite, while the bending and compressive strength increases. In addition, the heat-resistant properties of vermiculite concrete with pumice are increased. This is due to the fact that volcanic pumice, being a hydraulically active additive, is able to react hydration with cement components, eliminating the harmful effect of secondary hydration of free calcium oxide. The influence of the heating temperature on the change in the construction and technical properties of vermiculite concrete and fibrovermiculite concrete, including with the addition of pumice, has been studied. It was found that dispersed reinforcement with basalt fibers reduces shrinkage deformations, when heated to $t = 800$, the shrinkage decreases from 0.7 to 0.5% compared to the original concrete matrix. **Conclusion.** The dependence "compressive strength = f (average concrete density)" significantly depends on the presence and ratio of pumice in the composition of vermiculite concrete, while an increase in the holding temperature to 600 °C or 800 °C leads to a decrease in the compressive strength from 15 to 25%, and the main decrease occurs when heated to 600 °C, further the increase in temperature has a negligible effect. The dependence of the bending strength on the compressive strength is generally maintained regardless of the heating temperature, and the heating of concrete does not reduce the relative bending strength, i.e. the ratio of bending strength / compressive strength is not reduced. Dispersed fiber reinforcement increases the relative bending strength by about 70% regardless of the heating temperature.

Keywords: portland cement, expanded vermiculite, pumice, basalt fiber, reinforced cement, average density, compressive and bending strength, percentage of reinforcement, experiment plan, temperature, standard fire, fire resistance

For citation: T.A. Khezhev, G.N. Khadzhashalapov, A.V. Zhurov, F.M. Shogenova, A.V. Kalazhokov. Construction and technical properties of vermiculite concrete and fibro vermiculite concrete with volcanic pumice under the influence of elevated temperatures. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023;50(1):215-228. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-215-228

Введение. Разработка и исследование жаростойких бетонов и огнезащитных составов является актуальной задачей. Это связано с ростом количества пожаров в нашей стране за последние годы. При этом обрушение строительных конструкций зданий и сооружений является главной причиной гибели людей и ущерба от пожаров. Поэтому исследования огнестойкости строительных конструкций и способов ее повышения прово-

дятся многими учеными [1- 7]. В нашей стране были разработаны различные виды жаростойких бетонов, исследованы их характеристики, созданы технологии их изготовления [8-11].

Анализ способов повышения огнестойкости строительных конструкций показал, что тепло- и огнезащитное покрытие из легкого бетона на основе вспученного вермикулита является самым эффективным методом повышения предела огнестойкости тонкостенных железобетонных и армоцементных конструкций, так как они существенно не утяжеляют конструкцию и улучшают ее декоративные, акустические и теплозащитные свойства [4, 12-15].

Постановка задачи. Многочисленными исследованиями выявлено, что вермикулитобетоны на цементных вяжущих обладают высокими огнезащитными и эксплуатационными свойствами, что позволяет использовать их в различных областях строительства [4, 15].

Недостатками жаростойких и огнезащитных составов являются высокий расход портландцемента, относительно высокий коэффициент теплопроводности при высоких температурах и низкая термостойкость.

Одним из материалов, являющихся эффективной заменой части портландцемента и заполнителя для жаростойких и огнезащитных составов могут быть вулканический пепел и пемза [16].

Методы исследования. Исследования были направлены на изучение строительно-технических свойств разработанных составов вермикулитобетона и фибровермикулитобетона с вулканической пемзой при воздействии повышенных температур.

В экспериментах использовались: вулканическая пемза фракции 0,16-5 мм Псыхурейского месторождения; вспученный вермикулит Санкт-Петербургской слюдяной фабрики фракции 0,16-5 мм; Белгородский портландцемент ПЦ500-ДО; базальтовая фибра изготовления ОАО «Ивотстекло» марки РНБ-9-1200-4с. Армоцемент армировали тканой сеткой № 8-07 (ГОСТ 3826-82) с размером ячейки 8×8 мм, диаметром проволоки 0,7 мм.

Приготовление смеси производили в бетономешалке принудительного действия, в которой в воду с СДО последовательно загружали сухую смесь портландцемента, базальтового волокна, вулканической пемзы, затем – вспученного вермикулита, или предварительно перемешанную всухую смесь портландцемента, базальтового волокна, вулканической пемзы и вспученного вермикулита.

Перемешивание всех компонентов продолжали до получения однородной огнезащитной фибровермикулитобетонной сырьевой смеси. Продолжительность перемешивания смеси составляла 1,5 – 2 мин.

Образцы размерами 4х4х16 см из вермикулитобетонной и фибровермикулитобетонной смеси уплотняли на стандартной виброплощадке. Подвижность смеси составляла 3-5 см по погружению конуса СтройЦНИЛ. Образцы хранились в воздушно-сухих условиях. Перед испытанием балочки высушивались при $t = 105^{\circ}\text{C}$ до постоянной массы в сушильном шкафу.

В связи с высокой стоимостью вспученного вермикулита, исследовалась возможность его частичной замены вулканической пемзой (табл. 1, 2). Пемзой заменялся вермикулит с размерами зерен 0,16–5 мм.

В результате исследования выявлено, что замена части дорогостоящего заполнителя (вспученного вермикулита) пемзой приводит к незначительному повышению средней плотности композита, при этом предел прочности на изгиб и сжатие возрастают.

К недостаткам предложенных (табл. 1, 2) вермикулитобетонов можно отнести хрупкость, относительно небольшие пределы прочности при сжатии и изгибе. Преодоление многих недостатков жаростойких и огнезащитных бетонов и изделий возможно в результате создания фиброармированных бетонов [17, 18].

Таблица 1. Строительно-технические свойства огнезащитных и жаростойких композитов с применением вулканической пемзы

Table 1. Construction and technical properties of flame-retardant and heat-resistant composites using volcanic pumice

№№ составов	Строительно-технические свойства композита								
	средняя плотность, кг/м ³			предел прочности при изгибе (МПа) в возрасте 28 суток			предел прочности при сжатии (МПа) в возрасте 28 суток		
	температура нагрева, °C			температура нагрева, °C			температура нагрева, °C		
	105	600	800	105	600	800	105	600	800
Цемент : вермикулит по объему – 1:3									
1	720	715	710	1,6	1,3	1	2,9	2,2	2,1
Цемент : вермикулит по объему – 1:3 с добавкой пемзы фракции 0–0,16 мм по массе от цемента									
2	723	712	707	1,4	1,26	0,9	2,4	1,8	1,7
Цемент : пемза (фракции 0–1,25 мм) по объему – 1:3									
3	1461	1436	1426	3,2	2,2	1,9	11,9	7,4	6,7
Цемент : пемза (фракции 0,16–0,315 мм)+вермикулит фракции 0,315–5 мм вместо пемзы фракции 0,315–1,25 мм по объему – 1:3									
4	1676	1657	1650	3,6	2,9	1,9	14	10,7	8,5
Цемент : пемза (фракции 0,16–0,63 мм)+вермикулит фракции 0,63–5 мм вместо пемзы фракции 0,63–1,25 мм по объему – 1:3									
5	1303	1288	1280	2,1	1,9	1,9	8,8	6,5	6,4

Таблица 2. Строительно-технические свойства вермикулитобетонных огнезащитных и жаростойких композитов с применением вулканической пемзы

Table 2. Construction and technical properties of vermiculite concrete fire-resistant and heat-resistant composites using volcanic pumice

Цемент: вермикулит по объему Cement: vermiculite by volume	Замена части вермикулита пемзой по объему Replacing part of vermiculite with pumice by volume	Характеристики вермикулитобетонного композита Characteristics of vermiculite concrete composite								
		средняя плотность, average density кг/м ³			предел прочности при изгибе (МПа) в возрасте 28 сут flexural strength (MPa) at the age of 28 days			предел прочности при сжатии (МПа) в возрасте 28 сут compressive strength (MPa) at the age of 28 days		
		температура нагрева, °C temperature heating			температура нагрева, °C temperature heating			температура нагрева, °C temperature heating		
		105	600	800	105	600	800	105	600	800
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1:3	–	723	712	707	1,4	1,3	0,9	2,4	1,8	1,7
1:3	пемза фракции 0,16–0,315 мм	847	820	812	2,0	1,8	1,7	3,5	2,9	2,7
1:3	пемза фракции 0,16–0,63 мм	1068	1054	1031	2,4	2,1	2,0	3,6	3,2	3,1
1:4	–	684	643	525	1,6	1,3	1,2	3,4	2,6	2,3
1:4	пемза фракции 0,16–0,63 мм	855	832	828	1,9	1,5	1,3	3,5	2,8	2,6

Для повышения огнезащитных свойств вермикулитопемзобетонов исследовалось возможность применения поризующей добавки СДО (табл. 3).

Основные параметры фибрового армирования базальтовыми волокнами (l/d и μ_v) и количество добавки СДО определялись по результатам ранее проведенных испытаний фибровермикулитопеппобетонов.

Таблица 3. Строительно-технические свойства фибровермикулитобетона
Table 3. Construction and technical properties of fibrovermiculite concrete

Цемент : вермикулит по объему	Замена части вермикулита пемзой по объему	СДО в % от массы цемента	Процент армирования волокнами по объему	Характеристики фибровермикулитобетонного композита								
				средняя плотность, кг/м ³			предел прочности при изгибе (МПа) в возрасте 28 суток			предел прочности при сжатии (МПа) в возрасте 28 суток		
				температура нагрева, °C								
				105	600	800	105	600	800	105	600	800
1:3	пемза фракции 0,16–0,315 мм	–	–	847	820	812	2,0	1,8	1,7	3,5	2,9	2,7
1:3	пемза фракции 0,16–0,315 мм	0,3	0,6	805	780	772	3,4	3,2	3,1	4,5	3,8	3,6
1:4	пемза фракции 0,16–0,63 мм	–	–	855	832	828	1,9	1,5	1,3	3,5	2,8	2,6
1:4	пемза фракции 0,16–0,63 мм	0,3	0,6	812	792	786	3,3	3,1	3,0	4,4	3,7	3,5

В результате предварительных исследований по определению параметров фибрового армирования выявлен процент армирования $\mu_v = 1,2\%$ базальтовыми фибрами ($l=13$ мм), обеспечивающий максимальные прочностные характеристики композита.

Учитывая результаты ранее проведенных экспериментальных исследований, был составлен ротатбельный план второго порядка типа правильного шестиугольника с центральными точками [19, 20].

На рис. 1 показана геометрическая интерпретация данного плана.

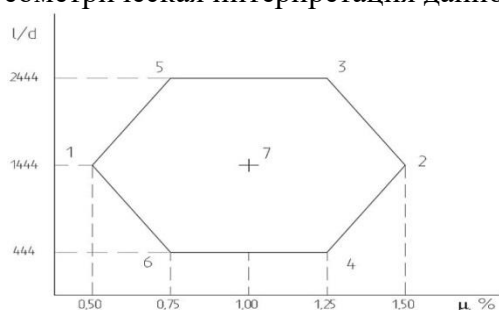


Рис. 1. План эксперимента типа правильного шестиугольника

Fig. 1. The plan of the experiment of the type of a regular hexagon

Варьируемыми факторами были основные параметры фибрового армирования:

X_1 – процент армирования по объему μ_v ;

X_2 – отношение длины волокон к их диаметру l/d .

Параметрами оптимизации являлись пределы прочности при сжатии и изгибе композита после 28 суток естественного твердения и нагрева при $t=105^{\circ}\text{C}$ и $t=800^{\circ}\text{C}$:

Y_1 – предел прочности при сжатии $R_{сж}$, МПа;

Y_2 – предел прочности при изгибе $R_{изг}$, МПа.

Основные уровни варьирования факторов определялись по результатам ранее проведенных экспериментов.

Матрица эксперимента показана в табл. 4.

Таблица 4. Матрица эксперимента

Table 4. Experiment matrix

N/N	Натуральные переменные		Матрица эксперимента				
	x_1	x_2	X_1	X_2	X_1^2	X_2^2	$X_1 * X_2$
1	0,5	1444	-1	0	+1	0	0
2	1,5	1444	+1	0	-1	0	0
3	1,25	2444	+0,5	+0,87	+0,25	+0,75	+0,43
4	1,25	444	+0,5	-0,87	+0,25	+0,75	-0,43
5	0,75	2444	-0,5	+0,87	+0,25	+0,75	-0,43
6	0,75	444	-0,5	-0,87	+0,25	+0,75	+0,43
7	1,0	1444	0	0	0	0	0

Параметры исходной бетонной матрицы для фибрового армирования базальтовыми волокнами приведены в табл. 5.

Таблица 5. Параметры исходной бетонной матрицы

Table 5. Parameters of the initial concrete matrix

№ состава	Соотношение компонентов в смеси, % по массе		Предел прочности при сжатии, МПа		Предел прочности при изгибе, МПа	
	портландцемент ПЦ500-ДО	пемза фракции 0-1,25 мм	температура нагрева, $^{\circ}\text{C}$		температура нагрева, $^{\circ}\text{C}$	
			105	800	105	800
1	60	40	20,8	15,6	7,4	6,1

В табл. 6 - 9 представлены результаты испытаний образцов на сжатие и изгиб в возрасте 28 суток естественного твердения и после нагрева до 105°C и 800°C .

Таблица 6. Экспериментальные данные испытания образцов на сжатие после нагрева до $t=105^{\circ}\text{C}$

Table 6. Experimental data of compression testing of samples after heating to $t = 105^{\circ}\text{C}$

N/N	Значения параллельных измерений функции отклика Y_1 , МПа						Среднее значение Y_1 , МПа	Дисперсия S_j^2	Коэффициент вариации, %
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6			
1	25,67	25,96	25,55	25,7	25,78	25,74	25,73	0,02	0,01
2	24,81	24,79	24,73	24,73	24,66	24,98	24,78	0,01	0,00
3	25,36	25,11	25,48	25,49	25,23	24,47	25,19	0,15	0,02
4	24,35	24,56	24,22	23,95	24,1	23,98	24,19	0,05	0,01
5	26,43	26,5	26,31	26,25	26,31	26,44	26,37	0,01	0,00
6	24,73	24,79	25,1	24,98	24,79	24,6	24,83	0,03	0,01
7	27,13	27,01	27,2	27,07	26,88	26,94	27,04	0,01	0,00

Таблица 7. Экспериментальные данные испытания образцов на изгиб после нагрева до $t=105^{\circ}\text{C}$

Table 7. Experimental data of bending test samples after heating to $t = 105^{\circ}\text{C}$

N/N	Значения параллельных измерений функции отклика Y_1 , МПа						Среднее значение Y_2 , МПа	Дисперсия S_j^2	Коэффициент вариации, %
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6			
1	12,24	12,37	11,98	12,37	12,05	11,98	12,17	0,03	0,02
2	12,88	13,19	13,2	12,75	12,87	13,07	12,99	0,03	0,01
3	12,62	12,75	12,75	12,5	12,56	12,62	12,63	0,01	0,01
4	12,24	12,49	11,98	12,11	12,24	12,37	12,24	0,03	0,01
5	12,37	12,5	12,56	12,24	12,3	12,37	12,39	0,01	0,01
6	12,05	12,18	12,31	11,92	11,86	11,98	12,05	0,03	0,01
7	13,32	13,45	13,2	13,31	13,36	13,26	13,31	0,01	0,01

Таблица 8. Экспериментальные данные испытания образцов на сжатие после нагрева до $t=800^{\circ}\text{C}$

Table 8. Experimental data of compression testing of samples after heating to $t = 800^{\circ}\text{C}$

N/N	Значения параллельных измерений функции отклика Y_1 , МПа						Среднее значение Y_1 , МПа	Дисперсия S_j^2	Коэффициент вариации, %
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6			
1	20,88	21,01	20,75	20,75	20,95	20,43	20,8	0,04	0,01
2	20,04	19,91	20,3	20,11	19,98	19,85	20,03	0,03	0,01
3	20,43	20,24	20,5	20,56	20,3	20,36	20,4	0,01	0,01
4	20,11	19,56	19,65	20,13	19,86	19,98	19,88	0,06	0,01
5	20,84	21,02	20,83	21,27	20,86	20,75	20,93	0,04	0,01
6	20,11	20,3	20,11	19,91	19,98	19,79	20,03	0,03	0,01
7	21,2	21,03	21,53	21,23	21,13	21,31	21,24	0,03	0,01

Таблица 9. Экспериментальные данные испытания образцов на изгиб после нагрева до $t=800^{\circ}\text{C}$

Table 9. Experimental data of bending test samples after heating to $t = 800^{\circ}\text{C}$

N/N	Значения параллельных измерений функции отклика Y_1 , МПа						Среднее значение Y_2 , МПа	Дисперсия S_j^2	Коэффициент вариации, %
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6			
1	11,16	11,03	11,09	10,97	11,14	11,36	11,13	0,02	0,01
2	11,94	11,88	12,07	11,66	11,81	12	11,89	0,02	0,01
3	11,55	11,42	11,62	11,61	11,55	11,62	11,56	0,01	0,01
4	11,23	11,36	11,29	11,09	11,04	11,16	11,2	0,01	0,01
5	11,36	11,49	11,55	11,23	11,16	11,22	11,34	0,03	0,01
6	11,03	10,97	11,03	11,14	10,99	11,03	11,03	0,00	0,01
7	12,2	12,33	12,07	12,27	12,14	12,1	12,2	0,01	0,01

Уравнения регрессии в кодированном виде были составлены по результатам экспериментальных исследований композита после нагрева до $t=105^{\circ}\text{C}$:

$$Y_1 = 27,04 - 0,92 X_1 + 0,73 X_2 - 1,32 X_1^2 - 2,08 X_2^2 - 0,32 X_1 X_2 ;$$

$$Y_2 = 13,3 + 0,42 X_1 + 0,21 X_2 - 0,94 X_1^2 - 0,99 X_2^2 + 0,32 X_1 X_2 ;$$

Поверхности отклика построены исходя из уравнений регрессии, представленных выше (рис. 2).

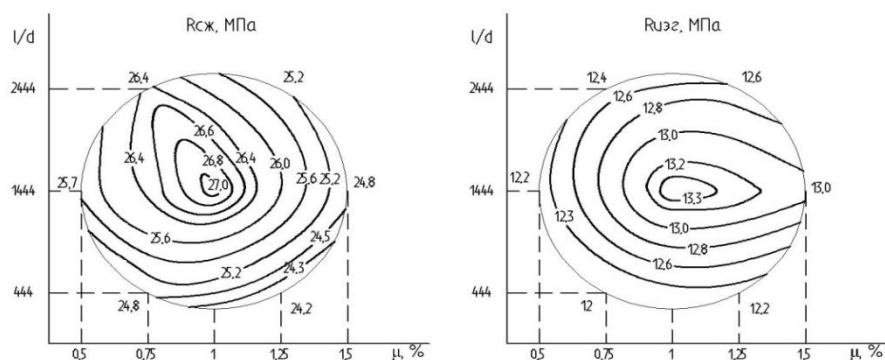


Рис. 2. Поверхности отклика: $R_{сж}$ – предел прочности при сжатии, МПа; $R_{изг}$ – предел прочности при изгибе, МПа; l/d – отношение длины волокон к их диаметру; μ – процент армирования по объему

Fig. 2. Response surfaces: R_b – compressive strength, MPa; R_f – bending strength, MPa; l/d – the ratio of the length of the fibers to their diameter; μ – the percentage of reinforcement by volume

Уравнения регрессии в кодированном виде были составлены по результатам экспериментальных исследований композита после нагрева до $t=800^\circ\text{C}$:

$$Y_1 = 21,23 - 0,48X_1 + 0,4X_2 - 0,58X_1^2 - 1,04X_2^2 - 0,22X_1X_2;$$

$$Y_2 = 12,2 + 0,39X_1 + 0,19X_2 - 0,88X_1^2 - 0,93X_2^2 + 0,04X_1X_2;$$

Поверхности отклика построены исходя из уравнений регрессии, представленных выше (рис. 3).

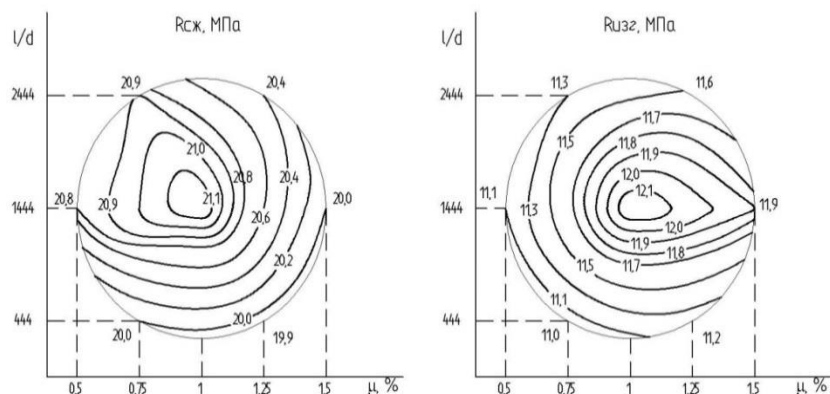


Рис. 3. Поверхности отклика: $R_{сж}$ – предел прочности при сжатии, МПа; $R_{изг}$ – предел прочности при изгибе, МПа; l/d – отношение длины волокон к их диаметру; μ – процент армирования по объему

Fig. 3. Response surfaces: R_b – compressive strength, MPa; R_f – bending strength, MPa; l/d – the ratio of the length of the fibers to their diameter; μ – the percentage of reinforcement by volume

В ходе исследования выявлено, что при проценте армирования по объему $\mu_v \approx 0,35 - 0,65\%$ и отношении длины волокон к их диаметру $l/d = 1444$ композит имеет максимальную прочность на изгиб и сжатие.

Дальнейшее повышение процента фибрового армирования бетонной матрицы ведет к снижению прочности композита на сжатие и изгиб, что объясняется ухудшением их структуры. Выявлено, что дисперсное армирование базальтовыми фибрами снижает усадочные деформации, при нагреве до $t=800^\circ\text{C}$ усадка уменьшается с 0,7 до 0,5 % в сравнении с исходной бетонной матрицей.

Анализ влияния температуры нагрева на изменение строительно-технических свойств вермикулитобетонов, в т.ч. фиброармированных, представлен на рис. 4 – 6. На рис. 4 представлена зависимость предела прочности исследованных (табл. 1 – 3) вермикулитобетонов на сжатие от средней плотности бетонов.

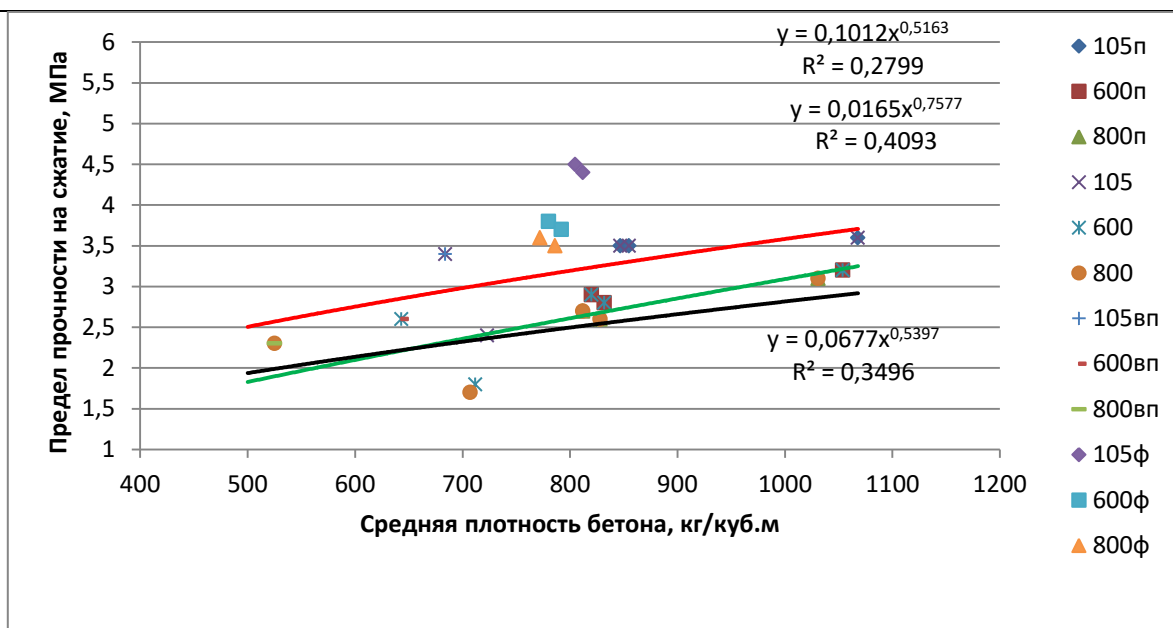


Рис. 4. Зависимость предела прочности на сжатие от средней плотности вермикулитобетонов 105, 600, 800 – температура выдерживания бетона перед испытанием, °С; п – с добавлением пемзы; ф – с фибровым армированием

Fig. 4. Dependence of the compressive strength on the average density of vermiculite concrete 105, 600, 800 – the holding temperature of concrete before testing, °C; p – with the addition of pumice; f – with fiber reinforcement

Из представленных на рис. 4 данных следует:

– зависимость «предел прочности на сжатие = f (средняя плотность бетона)» существенно зависит от наличия и соотношения пемзы в составе вермикулитобетона, при этом повышение температуры выдерживания до 600 или 800 °С приводит к снижению предела прочности на сжатие от 15 до 25 %, причем основное снижение происходит при нагреве до 600 °С, дальнейший рост температуры оказывает незначительное влияние;

– повышение предела прочности на сжатие в бетонах с фибровым армированием составляет примерно 40 % относительно неармированных бетонов независимо от температуры выдерживания.

На рис. 5 приведены для сравнения данные о снижении предела прочности на сжатие при кратковременном нагреве в сравнении с СП 27.13330, табл. 5.2, состав 24, класс И10 (данных о вермикулитобетоне в СП 27.13330 нет).

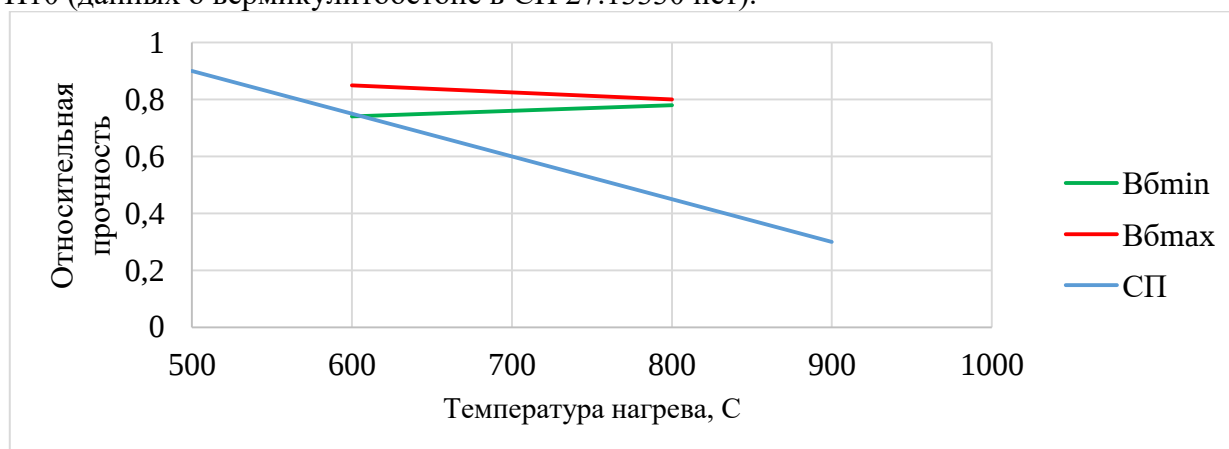


Рис. 5. Относительная прочность бетона на сжатие в зависимости от температуры кратковременного нагрева

Fig. 5. Relative compressive strength of concrete depending on the temperature of short-term heating

На рис. 6 представлена зависимость предела прочности исследованных бетонов на изгиб от предела прочности на сжатие и температуры нагрева.

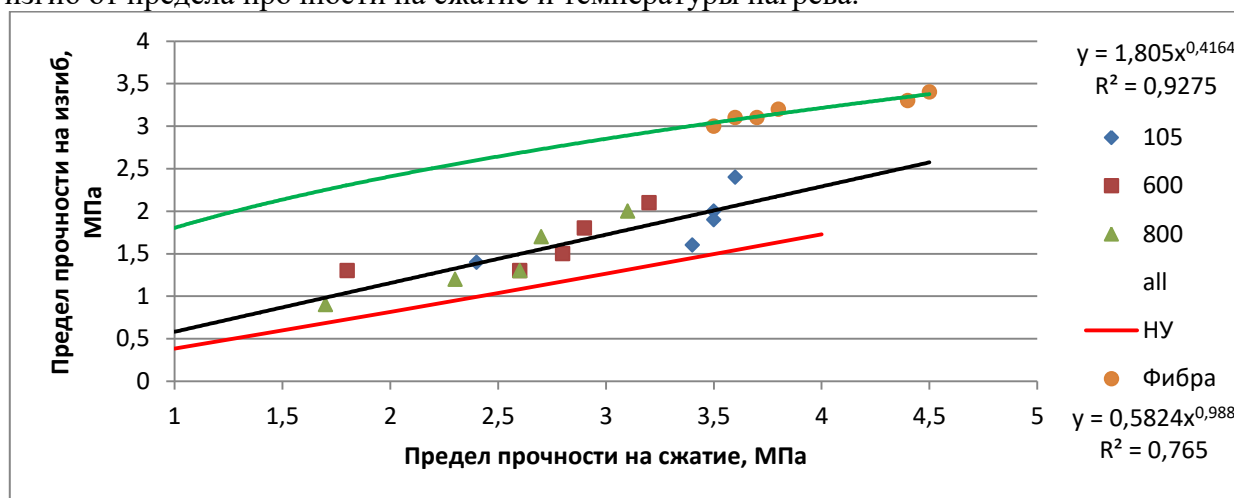


Рис. 6. Зависимость предела прочности при изгибе от предела прочности на сжатие: 105, 600, 800 – температура нагрева; НУ – нормальные условия твердения; фибра – фибровермикулитобетоны

Fig. 6. Dependence of the bending strength on the compressive strength: 105, 600, 800 – heating temperature; WELL – normal hardening conditions; fiber – fibrovermiculite concrete

Из приведенных на рис. 6 данных следует:

- зависимость предела прочности при изгибе от предела прочности на сжатие в целом сохраняется независимо от температуры нагрева, причем нагрев бетона не снижает относительный предел прочности при изгибе (соотношение прочность при растяжении/прочность на сжатие не снижается);
- дисперсное фибровое армирование повышает относительный предел прочности при изгибе примерно на 70% независимо от температуры нагрева.

Проведены исследования огнезащитных свойств разработанных огнезащитных композитов. Испытания по определению огнестойкости двухслойных армоцементных элементов проводились нами на образцах 19х19 см в горизонтальном положении на электрической муфельной печи по температурному режиму «стандартного» пожара, в соответствии с ГОСТ 30247.1–94.

За наступление предела огнестойкости по несущей способности (R) образцов условно принимали момент достижения тканой сеткой, расположенной в армоцементном слое, температуры 300 °С.

В соответствии с ГОСТ 30247.1–94, за наступление предела огнестойкости по теплоизолирующей способности (I) образцов принимали момент повышения температуры на необогреваемой поверхности образца в среднем более чем на 140 °С в сравнении с температурой образца до испытания. В момент испытания влажность мелкозернистого бетона была 3–4 %, а для вермикулитобетона – 8–10 %.

Нарушение целостности двухслойных армоцементных образцов при проведении испытаний на огнестойкость не наблюдалось. Экспериментальные данные испытаний огнестойкости двухслойных армоцементных плит с использованием пемзы в огнезащитном слое (толщины конструкционного и огнезащитного слоев 20 мм) приведены в табл.10.

Предложенные вермикулитобетоны с применением вулканической пемзы, воздухововлекающей добавки СДО и базальтовых фибр, обладая большей плотностью в сравнении с эталонным вермикулитобетоном, имеют более высокие показатели огнезащиты из-за лучшей сохранности вермикулитобетонного слоя при нагреве благодаря фибровому армированию и дополнительной поризации СДО.

С применением разработанного ПО выполнены вычисления с точностью, равной 0,001 и, получены коэффициенты k_1, k_2, k_3, k_4 , показывающие хорошую сходимость теоретических и экспериментальных данных [21].

Таблица 10. Экспериментальные данные результатов испытаний по определению пределов огнестойкости двухслойных армоцементных плит
Table 10. Experimental data of the test results for determining the limits of fire resistance of double-layer reinforced cement slabs

№.№ составов	Состав огнезащитного слоя				Средняя плотность, кг/м ³	Предел огнестойкости плит, мин	
	Цемент : вермикулит по объему	Замена части вермикулита пемзой по объему	СДО в % от массы цемента	Процент армирования волокнами по объему		по несущей способности (R)	по теплоизолирующей способности (E)
1	1:2	–	–	–	750	82	57
2	1:3	пемза фракции 0,16–0,315 мм	–	–	847	68	44
3	1:3	пемза фракции 0,16–0,315 мм	0,3	0,6	805	73	48
4	1:4	пемза фракции 0,16–0,63 мм	–	–	855	66	43
5	1:4	пемза фракции 0,16–0,63 мм	0,3	0,6	812	65	46

В итоге расчетов на разработанном ПО определены теплотехнические характеристики предложенного фибровермикулито-пемзобетона ($\rho_{cp} = 810 \text{ кг} / \text{м}^3$):

$$\lambda_o(t) = 0,180 + 0,00003 \cdot t, \quad c_o(t) = 920 + 0,63 \cdot t ;$$

По результатам теплотехнического расчета построены графики влияния толщины огнезащитного слоя на пределы огнестойкости двухслойных армоцементных элементов (рис. 7 и 8).

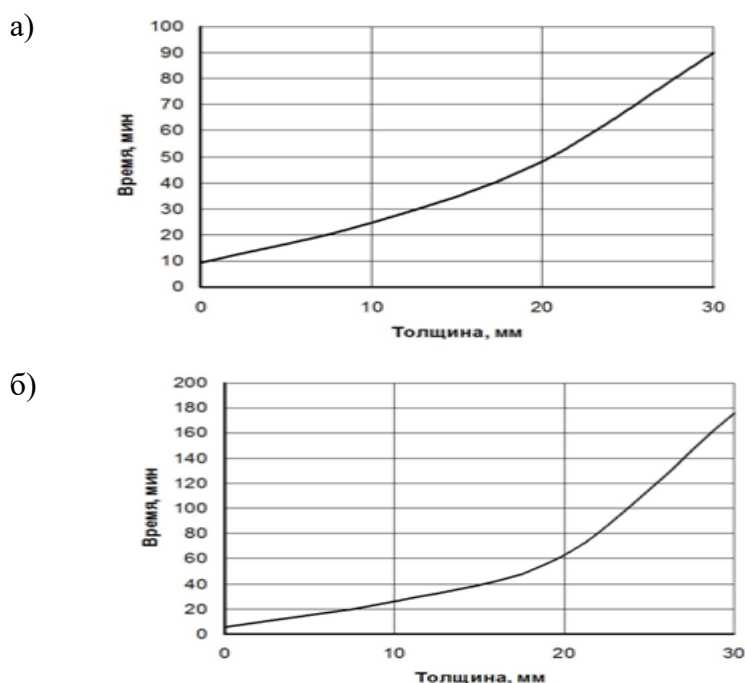


Рис. 7. Влияния толщины фибровермикулитопемзобетонного слоя на предел огнестойкости двухслойных армоцементных элементов по признаку: потери теплоизолирующей способности (а); потери несущей способности (б)

Fig. 7. The influence of the thickness of the fibrovermiculite-cement layer on the fire resistance limit of two-layer reinforced cement elements on the basis of: loss of thermal insulation ability (a); loss of load-bearing capacity (b)

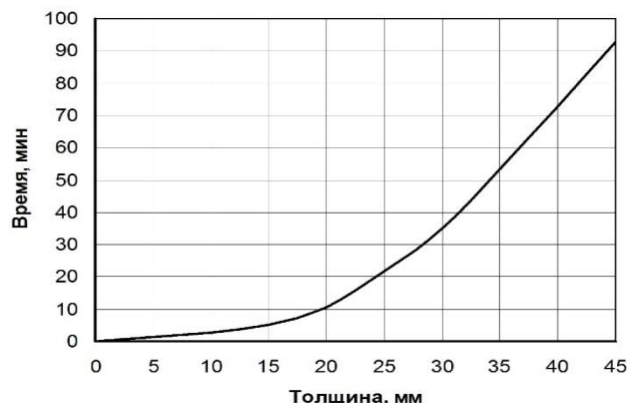


Рис. 8. Зависимость огнестойкости фибровермикулитопемзобетонных плит по признаку потери теплоизолирующей способности от толщины слоя
Fig. 8. The dependence of the fire resistance of fibro vermiculite pumice concrete slabs on the basis of the loss of thermal insulation ability on the thickness of the layer

На основе полученных зависимостей теплотехнических характеристик фибровермикулитобетонных композитов, с использованием предложенного программного обеспечения можно определять пределы огнестойкости двухслойных конструкций. Выявлено, что предложенные фибровермикулитопемзобетоны отличаются повышенными огнезащитными и прочностными характеристиками при пониженном расходе вяжущего.

Вывод. Определены конструкционные свойства разработанных вермикулитобетон с частичной заменой вермикулита пемзой, получены зависимости свойств от рецептурных факторов и температуры нагрева, доказана эффективность фибрового армирования с целью повышения предела прочности при изгибе до 70 %, в том числе после нагрева до 800 °С.

Зависимость «предел прочности на сжатие = f (средняя плотность бетона)» существенно зависит от наличия и соотношения пемзы в составе вермикулитобетона, при этом повышение температуры выдерживания до 600 °С или 800 °С приводит к снижению предела прочности на сжатие от 15 до 25 %, причем основное снижение происходит при нагреве до 600 °С, дальнейший рост температуры оказывает незначительное влияние.

Зависимость предела прочности при изгибе от предела прочности на сжатие в целом сохраняется независимо от температуры нагрева, причем нагрев бетона не снижает относительный предел прочности при изгибе, т.е. соотношение прочность при изгибе/прочность на сжатие не снижается.

Получены значения коэффициентов теплопроводности и теплоемкости фибровермикулитопемзобетона на основе анализа результатов экспериментально-теоретических исследований их огнезащитных свойств.

Библиографический список:

1. Милованов А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций. М.: Стройиздат. 1986. 225 с.
2. Ильин Н.А. Последствия огневого воздействия на железобетонные конструкции. М.: Стройиздат. 1979. 128 с.
3. Милованов А.Ф. Огнесохранность железобетонных конструкций после пожара. М.: 2005. 122 с.
4. Хежев Т.А. Технология армоцементных конструкций высокой огнестойкости с теплозащитным слоем из эффективного легкого бетона: дисс. ... д-ра техн. наук. Ростов-на-Дону. 2007. 304 с.
5. Милованов А.Ф. Железобетонные температуростойкие конструкции. М.: 2005. 234 с.
6. Романенков И.Г., Зигерн-Корн В.Н. Огнестойкость строительных конструкций из эффективных материалов. М.: Стройиздат. 1984. 240 с.
7. Бушев З.П., Пчелинцев В.А., Федоренко В.С., Яковлев А.И. Огнестойкость зданий. М.: Стройиздат. 1970. 260 с.
8. Некрасов К.Д., Масленникова М.Г. Легкие жаростойкие бетоны на пористых заполнителях. М.: Стройиздат. 1982. 152 с.
9. Хаджишалапов Г.Н. Технологические факторы легких жаростойких бетонов при применении в шахте ядерных реакторов нового поколения: дисс. ... д-ра техн. наук. Ростов-на-Дону. 2006. 377 с.

10. Майзель И.А., Сухарев М.Ф. Жароупорный теплоизоляционный перлитобетон. М.: Стройиздат. 1965. 127 с.
11. Денисов А.С., Швыряев В.А. Теплоизоляционные жаростойкие торкрет-массы на основе вермикулита. М.: Стройиздат. 1973. 104 с.
12. Страхов В.Л., Крутов А.М., Давыдкин А.М. Огнезащита строительных конструкций. М.: ТИМР. 2000. 433 с.
13. Ахтямов Р.Я. «Вермивол» – новое огнезащитное покрытие на основе вспученного вермикулита // Строительные материалы. 2002. № 6. С. 6–7.
14. Романенков И.Г., Левитес Ф.А. Огнезащита строительных конструкций. М.: Стройиздат. 1991. 320 с.
15. Руководство по составам и применению теплоизоляционных и огнестойких перлитовых штукатурок. М.: Стройиздат. 1975. 15 с.
16. Ахматов М.А. Применение отходов камнепиления туфкарьеров и рыхлых пористых пород в качестве заполнителей легких бетонов и конструкций из них. Нальчик. 1981. 128 с.
17. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов // Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: монография / 3-е изд., перераб. и доп. М.: АСВ. 2004. 560 с.
18. Волков И.В. Фибробетон: Состояние и перспективы применения / Промышленное и гражданское строительство. 2002. № 9. С. 37–38.
19. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука. 1965. 340 с.
20. Крыжановский И.И., Свицерская О.И. Методика планирования эксперимента при решении типовой задачи о выборе химических добавок к бетону // Математические методы в исследованиях технологии бетона: тр. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та водоснабжения, канализации, гидротехн. сооружений и инженер. гидрогеологии. Вып. 5. Харьков. 1971. С. 102–114.
21. Хежев Т.А., Культербаев Х.П. Теплотехнический расчет огнестойкости многослойных строительных конструкций // Вестник Кабардино-Балкарского гос. ун-та / Сер. «Технические науки». Вып. 4. Нальчик. КБГУ. 2000. С. 9–11.

References:

1. Milovanov A.F. Fire resistance of reinforced concrete structures. M.: *Stroyizdat*. 1986; 225.[In Russ]
2. Ilyin N.A. Consequences of fire impact on reinforced concrete structures. M.: *Stroyizdat*. 1979; 128. [In Russ]
3. Milovanov A.F. Fire safety of reinforced concrete structures after a fire. M.: 2005; 122.[In Russ]
4. Hezhev T.A. Technology of reinforced cement structures of high fire resistance with a heat-protective layer of effective lightweight concrete: diss. ... dr of technical sciences. Rostov-on-Don. 2007; 304. [In Russ]
5. Milovanov A.F. Reinforced concrete temperature-resistant structures. Moscow: 2005; 234.[In Russ].
6. Romanenkov I.G., Ziger-Korn V.N. Fire resistance of building structures made of effective materials. M.: *Stroyizdat*. 1984; 240 [In Russ].
7. Bushev Z.P., Pchelintsev V.A., Fedorenko V.S., Yakovlev A.I. Fire resistance of buildings. M.: *Stroyizdat*. 1970; 260 [In Russ].
8. Nekrasov K.D., Maslennikova M.G. Light heat-resistant concrete on porous aggregates. M.: *Stroyizdat*. 1982; 152 [In Russ].
9. Khadzhashalapov G.N. Technological factors of light heat-resistant concretes when using new generation nuclear reactors in a mine: diss. ... doctor of technical sciences. Rostov-on-Don. 2006;377.[In Russ].
10. Maisel I.A., Sukharev M.F. Heat-resistant heat-insulating perlite concrete. M.: *Stroyizdat*. 1965; 127[In Russ]
11. Denisov A.S., Shvyryaev V.A. Heat-insulating heat-resistant shotcrete masses based on vermiculite. M.: *Stroyizdat*. 1973; 104 [In Russ].
12. Strakhov V.L., Krutov A.M., Davydkin A.M. Fire protection of building structures. M.: *TIMR*. 2000;433.
13. Akhtyamov R.Ya. "Vermivol" – a new flame retardant coating based on expanded vermiculite. *Building materials*. 2002; 6: 6-7.[In Russ].
14. Romanenkov I.G., Levites F.A. Fire protection of building structures. M.: *Stroyizdat*. 1991;320 [In Russ].
15. Guidelines on the composition and application of heat-insulating and fire-resistant perlite plasters. Moscow: *Stroyizdat*. 1975;15.[In Russ]
16. Akhmatov M.A. The use of stone-sawing waste of tuff quarries and loose porous rocks as fillers of light concrete and structures made of them. Nalchik. 1981; 128.[In Russ]
17. Rabinovich F.N. Composites based on dispersed reinforced concrete. *Questions of theory and design, technology, constructions: monograph / 3rd ed., reprint. and additional M.: ASV*. 2004; 560.[In Russ]
18. Volkov I.V. Fibrobeton: State and prospects of application. *Industrial and civil construction*. 2002; 9: 37-38.[In Russ]
19. Nalimov V.V., Chernova N.A. Statistical methods of planning extreme experiments. M.: Nauka. 1965; 340.[In Russ]

20. Kryzhanovsky I.I., Sviderskaya O.I. Methodology of experiment planning when solving a typical problem of choosing chemical additives to concrete. *Mathematical methods in concrete technology research: tr. All-Union. scientific-research. in-ta water supply, sewerage, hydraulic engineering. structures and engineer. hydrogeology..* Kharkiv. 1971; 5:102-114.[In Russ]
21. Hezhev T.A., Kulterbaev H.P. Heat engineering calculation of fire resistance of multilayer building structures. *Bulletin of Kabardino-Balkarian State University. Ser. "Technical Sciences".* Vol. 4. Nalchik. KBGU. 2000; 4: 9-11.[In Russ]

Сведения об авторах:

Хежев Толя Амирович, доктор технических наук, профессор, директор института архитектуры, строительства и дизайна, профессор кафедры строительного производства; hejev_tolya@mail.ru

Хаджишалапов Гаджимагомед Нурмагомедович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и организации строительного производства; yarus-x@mail.ru

Журтов Артур Владимирович, кандидат технических наук, и.о. заведующего кафедрой строительного производства; zhurtovartur@mail.ru

Шогенова Фатима Мухамедовна, аспирант кафедры строительного производства; shogenova-1982@mail.ru

Калажиков Астемир Вячеславович, магистрант кафедры строительного производства

Information about the authors:

Tolya A. Khezhev, Dr. Sci. (Eng), Prof., Director of the Institute of Architecture, Construction and Design, Prof., Department of Construction Production; hejev_tolya@mail.ru

Gadzhimagomed N. Khadzhishalapov, Dr. Sci. (Eng), Prof., Head of the Department of Technology and Organization of Construction Production; yarus-x@mail.ru

Artur V. Zhurtov, Cand. Sci. (Eng), Acting Head of the Department of Construction Production; zhurtovartur@mail.ru

Fatima M. Shogenova, Post-graduate Student, Department of building production; shogenova-1982@mail.ru

Astemir V. Kalazhokov, Master's Student, Department of Construction Production

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 22.01.2023.

Одобрена после/рецензирования Revised 21.02.2023.

Принята в печать/ Accepted for publication 21.02.2023.