

## Жаростойкие фиброармированные композиты на основе вулканической пемзы

*Т.А. Хежсев, А.З. Жуков, А.В. Журтов, М.И. Гулиев, А.Л. Хежсев, А.Х. Глашев*  
*Кабардино-Балкарский государственный университет, Нальчик*

**Аннотация:** Представлены результаты исследований по разработке жаростойких фиброармированных композитов с применением вулканической пемзы. Применение базальтовых волокон в композитах позволяет повысить прочность, жаростойкие свойства композита и снизить усадочные деформации. Выявлены оптимальный процент армирования по объему фибрами бетонной матрицы и соотношение длины волокон к диаметру с применением метода математического планирования эксперимента. Получены математические модели прочностных свойств композита.

**Ключевые слова:** портландцемент, вулканическая пемза, базальтовое волокно, жаростойкие свойства, предел, предел прочности при сжатии и изгибе композита.

В качестве легких заполнителей в жаростойких композитах используют вспученный вермикулит, перлит, гранулированная минеральная вата, керамзит и другие [1, 2, 3, 4]. В Кабардино-Балкарской республике имеются запасы пемзовых песков с насыпной плотностью 600–700 кг/м<sup>3</sup> [5]. В работах [6, 7] были разработаны жаростойкие и огнезащитные вермикулитобетонные композиты с применением вулканических горных пород. Исследования жаростойких композитов с применением вулканической пемзы ранее не проводились. Вместе с тем характеристики пемзы могут позволить получать эффективные жаростойкие композиты с улучшенными физико-механическими свойствами.

В экспериментах использовались: вулканическая пемза фракции 0-1,25 мм Псыхурейского месторождения с насыпной плотностью 700 кг/м<sup>3</sup>; Белгородский портландцемент ПЦ500-ДО; базальтовое волокно марки РНБ-9-1200-4с производства ОАО «Ивотстекло».

Образцы размерами 4x4x16 см из смеси формовались на стандартной виброплощадке. Подвижность смеси определялась по погружению конуса

СтройЦНИЛ и составляла 3-5 см. Твердение образцов происходило в естественных условиях. Перед испытанием балочки высушивались до постоянной массы при  $t = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Результаты исследований образцов на портландцементе ПЦ500-ДО без добавок и с добавками вулканической пемзы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Жаростойкие свойства композита с применением вулканической пемзы

Количество добавки пемзы в % по массе от цемента	Свойства цементного камня (композита)								
	средняя плотность ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) , в возрасте, сут			предел прочности при изгибе (МПа) в возрасте, сут			предел прочности при сжатии (МПа) в возрасте, сут		
	28			28			28		
	температура нагрева, $^{\circ}\text{C}$			температура нагрева, $^{\circ}\text{C}$			температура нагрева, $^{\circ}\text{C}$		
	105	600	800	105	600	800	105	600	800
ПЦ500-ДО, без добавки									
0	1788	1769	1760	5,8	5,3	4,4	46,0	26,7	23,2
ПЦ500-ДО, добавка пемзы с размерами зерен $0 < d < 0,16\text{ мм}$									
30	1609	1538	1528	6,4	6,3	6,3	39,5	25,4	24,2
ПЦ500-ДО, добавка пемзы с размерами зерен $0 < d < 0,31\text{ мм}$									
20	1764	1746	1717	7,6	7,4	6,2	32,2	31,4	27,6
40	1787	1753	1733	5,4	5,0	3,6	28,5	24,0	23,3
60	1725	1700	1680	4,9	4,6	3,5	16,2	15,5	14,7
ПЦ500-ДО, добавка пемзы с размерами зерен $0 < d < 0,63\text{ мм}$									
20	1750	1692	1682	7,4	7,0	6,1	35,5	32,8	32,4
40	1656	1623	1606	6,8	6,3	6,2	25,1	23,1	21,7
60	1511	1490	1469	4,6	4,2	3,7	13,7	12,8	12,5
ПЦ500-ДО, добавка пемзы с размерами зерен $0 < d < 1,25\text{ мм}$									
20	1711	1684	1673	7,1	6,5	5,3	30,7	27,6	22,4
40	1630	1607	1534	7,4	6,6	6,1	20,8	18,9	15,6
60	1423	1392	1385	3,9	3,7	3,3	10,8	8,2	8,0

Из исследований следует, что добавление пемзового песка фракции  $d < 0,16\text{ мм}$  до 30 % от массы вяжущего значительно повышает жаростойкие свойства цементного камня, одновременно с этим предел прочности при изгибе возрастает, а при сжатии снижается незначительно. Это объясняется пуццолановыми свойствами мелкодисперсной фракции пемзового песка. Добавление в смесь пемзового песка большей фракции заметно снижает

предел прочности композита при сжатии, но при этом значительно улучшаются его жаростойкие характеристики, и снижается средняя плотность.

Таким образом, применение мелкодисперсных отходов пиления вулканической пемзы способствует снижению расхода вяжущего и повышению жаростойких характеристик бетонов на основе предложенных смесей.

Вместе с тем для отсева вулканической пемзы на фракции требуется специальное оборудование, это приводит к удорожанию композита, что эффективно при существенном повышении прочности фибробетона.

Из литературных источников следует, что для существенного улучшения физико-механических свойств бетона, в том числе жаростойких, эффективно использование дисперсное армирование волокнами [8].

Поэтому далее исследовалось влияние параметров армирования базальтовыми фибрами бетонной матрицы с применением вулканической пемзы на ее свойства.

Для определения влияния параметров армирования базальтовыми волокнами были проведены предварительные исследования, в результате выявлено, что при проценте дисперсного армирования  $\mu = 1,2\%$  по объему волокнами длиной 13 мм происходит максимальный прирост прочностных характеристик фибробетона.

Используя результаты предварительных исследований, был выполнен ротатбельный план эксперимента второго порядка типа правильного шестиугольника с центральными точками [9, 10]. Графическое представление такого плана показано на рис. 1.

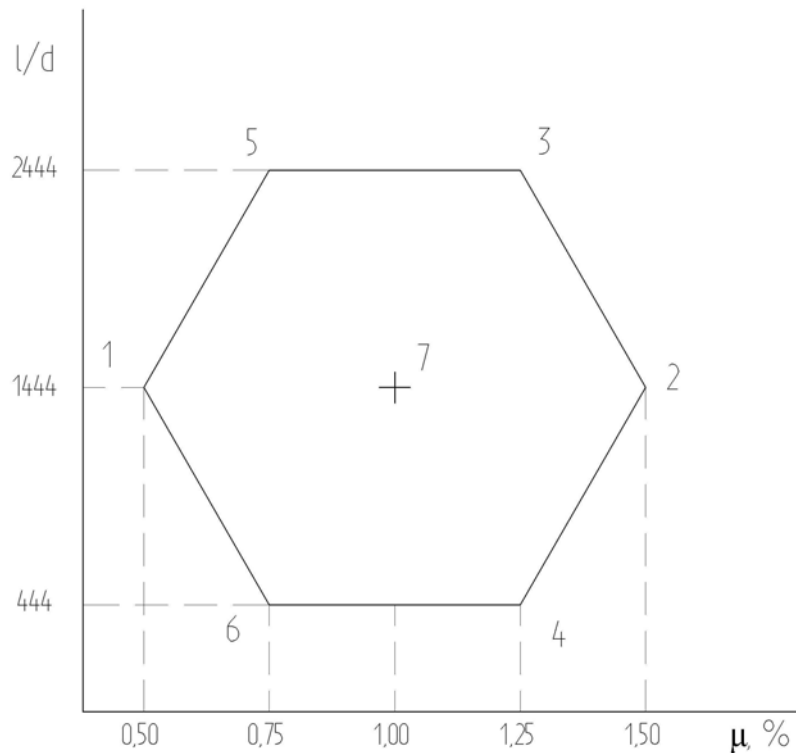


Рис. 1. План в виде правильного шестиугольника

Основные параметры фибрового армирования:

- $X_1$  – процент армирования по объему  $\mu_v$ ;
- $X_2$  – отношение длины волокон к их диаметру  $l/d$ .

Прочностные характеристики композита в возрасте 28 суток естественного твердения и нагрева до температуры 105 °С и 800 °С использовались как параметры оптимизации:

- $Y_1$  – предел прочности при сжатии  $R_{сж}$ , МПа;
- $Y_2$  – предел прочности при изгибе  $R_{изг}$ , МПа.

Из рис. 1 можно сделать вывод, что по плану для фактора  $X_1$  требуется пять уровней варьирования переменных, а для фактора  $X_2$  – всего три уровня:

- для  $X_1$  – (-1; -0.5; 0; +0.5; +1);
- для  $X_2$  – (-0,87; 0; +0,87).

Матрица эксперимента представлена в табл. 2. За основные уровни варьирования для факторов выбраны значения величин, которые получены в ходе предварительных исследований.

Таблица 2

Матрица эксперимента

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

Соотношение компонентов в смеси и прочностные свойства бетонной матрицы для армирования базальтовыми фибрами приведены в табл. 3.

Таблица 3

Соотношение компонентов в смеси и свойства бетонной матрицы

№ состава	Соотношение компонентов в смеси, мас. %		предел прочности при сжатии (МПа)		предел прочности при изгибе (МПа)	
	портландцемент ПЦ500-ДО	пемза фракции 0–1,25 мм	температура нагрева, °С		температура нагрева, °С	
			105	800	105	800
1	2	3	4	5	6	7
1	60	40	20,8	15,6	7,4	6,1

Результаты экспериментов приведены в табл. 4, 5, 6 и 7.

Таблица 4

Результаты испытания образцов на сжатие в возрасте  
28 суток естественного твердения и нагрева до температуры 105 °С

N/N	Значения параллельных измерений функции отклика $Y_1$ , МПа						Сред. знач. $Y_1$ , МПа	Диспер- сия $S_j^2$	Коэф. вариации, %	Ошибка $S_j$
	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$				
1	25,67	25,96	25,55	25,70	25,78	25,74	25,73	0,02	0,01	0,14
2	24,81	24,79	24,73	24,73	24,66	24,98	24,78	0,01	0,00	0,11
3	25,36	25,11	25,48	25,49	25,23	24,47	25,19	0,15	0,02	0,38
4	24,35	24,56	24,22	23,95	24,10	23,98	24,19	0,05	0,01	0,23
5	26,43	26,50	26,31	26,25	26,31	26,44	26,37	0,01	0,00	0,10
6	24,73	24,79	25,10	24,98	24,79	24,60	24,83	0,03	0,01	0,18
7	27,13	27,01	27,20	27,07	26,88	26,94	27,04	0,01	0,00	0,12

Таблица 5

Результаты испытания образцов на изгиб в возрасте  
28 суток естественного твердения и нагрева до температуры 105 °С

N/N	Значения параллельных измерений функции отклика $Y_1$ , МПа						Сред. знач. $Y_1$ , МПа	Диспер- сия $S_j^2$	Коэф. вариации, %	Ошибка $S_j$
	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$				
1	12,24	12,37	11,98	12,37	12,05	11,98	12,17	0,03	0,02	0,19
2	12,88	13,19	13,20	12,75	12,87	13,07	12,99	0,03	0,01	0,19
3	12,62	12,75	12,75	12,50	12,56	12,62	12,63	0,01	0,01	0,10
4	12,24	12,49	11,98	12,11	12,24	12,37	12,24	0,03	0,01	0,18
5	12,37	12,50	12,56	12,24	12,30	12,37	12,39	0,01	0,01	0,12
6	12,05	12,18	12,31	11,92	11,86	11,98	12,05	0,03	0,01	0,17
7	13,32	13,45	13,20	13,31	13,36	13,26	13,31	0,01	0,01	0,09

Таблица 6

Результаты испытания образцов на сжатие в возрасте  
28 суток естественного твердения и нагрева до температуры 800 °С

N/N	Значения параллельных измерений функции отклика $Y_1$ , МПа						Сред. знач. $Y_1$ , МПа	Дисперсия $S_j^2$	Коэф. вариации, %	Ошибка $S_j$
	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$				
1	20,88	21,01	20,75	20,75	20,95	20,43	20,80	0,04	0,01	0,21
2	20,04	19,91	20,30	20,11	19,98	19,85	20,03	0,03	0,01	0,16
3	20,43	20,24	20,50	20,56	20,30	20,36	20,40	0,01	0,01	0,12
4	20,11	19,56	19,65	20,13	19,86	19,98	19,88	0,06	0,01	0,24
5	20,84	21,02	20,83	21,27	20,86	20,75	20,93	0,04	0,01	0,19
6	20,11	20,30	20,11	19,91	19,98	19,79	20,03	0,03	0,01	0,18
7	21,20	21,03	21,53	21,23	21,13	21,31	21,24	0,03	0,01	0,17

Таблица 7

Результаты испытания образцов на изгиб в возрасте  
28 суток естественного твердения и нагрева до температуры 800 °С

N/N	Значения параллельных измерений функции отклика $Y_1$ , МПа						Сред. знач. $Y_1$ , МПа	Дисперсия $S_j^2$	Коэф. вариации, %	Ошибка $S_j$
	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$				
1	11,16	11,03	11,09	10,97	11,14	11,36	11,13	0,02	0,01	0,13
2	11,94	11,88	12,07	11,66	11,81	12,00	11,89	0,02	0,01	0,15
3	11,55	11,42	11,62	11,61	11,55	11,62	11,56	0,01	0,01	0,08
4	11,23	11,36	11,29	11,09	11,04	11,16	11,20	0,01	0,01	0,12
5	11,36	11,49	11,55	11,23	11,16	11,22	11,34	0,03	0,01	0,16
6	11,03	10,97	11,03	11,14	10,99	11,03	11,03	0,00	0,01	0,06
7	12,20	12,33	12,07	12,27	12,14	12,10	12,20	0,01	0,01	0,10

В результате проведенного исследования и обработки полученных результатов были выведены следующие уравнения регрессии фибробетонного композита в возрасте 28 суток, в условиях естественного твердения и нагрева до температуры 105 °С в кодированном виде:

$$Y_1 = 27,04 - 0,92X_1 + 0,73X_2 - 1,32X_1^2 - 2,08X_2^2 - 0,32X_1X_2;$$

$$Y_2 = 13,3 + 0,42X_1 + 0,21X_2 - 0,94X_1^2 - 0,99X_2^2 + 0,32X_1X_2;$$

На основе представленных выше зависимостей были построены поверхности отклика (рис. 2).

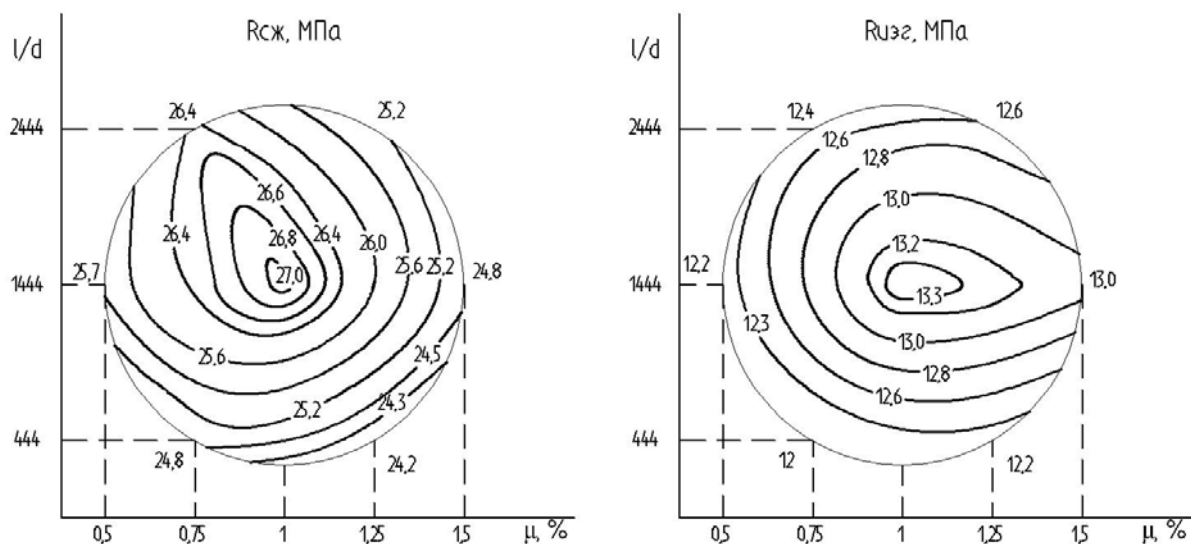


Рис. 2. Поверхности отклика. Здесь:  $R_{сж}$  – предел прочности при сжатии, МПа;  $R_{изг}$  – предел прочности при изгибе, МПа;  $l/d$  – отношение длины волокон к их диаметру;  $\mu$  – процент армирования по объему

В результате проведенного исследования и обработки полученных результатов были выведены следующие уравнения регрессии фибробетонного композита в возрасте 28 суток, в условиях естественного твердения и нагрева до температуры 800 °С в кодированном виде:

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

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

На основе представленных выше зависимостей были построены поверхности отклика (рис. 3).



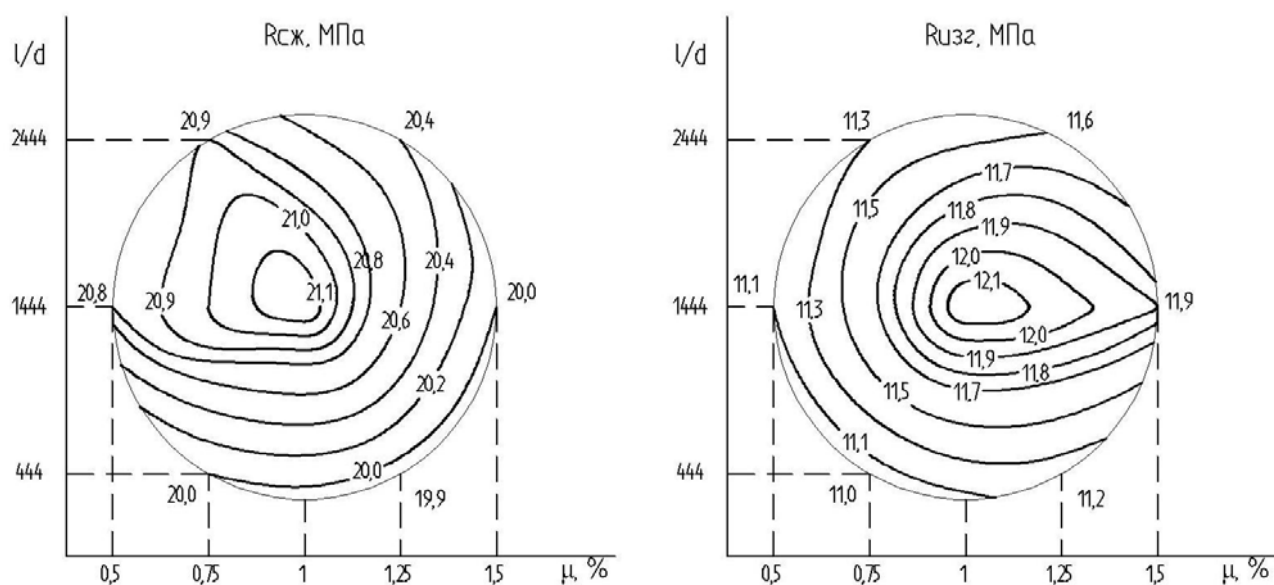


Рис. 3. Поверхности отклика. Здесь:  $R_{сж}$  – предел прочности при сжатии, МПа;  $R_{изг}$  – предел прочности при изгибе, МПа;  $l/d$  – отношение длины волокон к их диаметру;  $\mu$  – процент армирования по объему

Результаты исследований показали, что в области плана с  $\mu_v = 0,85...1,15\%$  и  $l/d = 1444$  отмечаются наибольшие значения предела прочности на сжатие и изгиб. Увеличение процента армирования базальтовыми волокнами матрицы приводит к уменьшению прочностных характеристик композита, что обусловлено ухудшением их структуры.

Эксперименты показали, что разработанные композиты имеют меньшую усадку при воздействии температуры  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  по сравнению с исходной бетонной матрицей, усадка снижается с  $0,7$  до  $0,5\%$ . Кроме того, дисперсное армирование бетонной матрицы базальтовыми волокнами обеспечивает меньшее снижение прочностных характеристик при воздействии высоких температур, т.е. лучшую сохранность композита.

## Литература

1. Руководство по выполнению огнезащитных и теплоизоляционных штукатурок механизированным способом. М.: Стройиздат, 1977. 46 с.
2. Journal of Materials Science Letters. 1987. Vol. 6. № 5. PP. 562–564.
3. Steel Strategy and Fire Protection. International Construction. 1972. Vol. 11. № 1. PP. 13 – 15.
4. Некрасов К.Д., Масленникова М.Г. Легкие жаростойкие бетоны на пористых заполнителях. М.: Стройиздат, 1982. 152 с.
5. Ахматов М.А. Эффективность применения местных строительных материалов и бетона. Нальчик: Эльбрус, 1986. 160 с.
6. Хежев Х.А., Хежев Т.А., Кимов У.З., Думанов К.Х. Огнезащитные и жаростойкие композиты с применением вулканических горных пород // Инженерный вестник Дона, 2011. №4 URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/710](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/710).
7. Хежев Т.А., Жуков А.З., Хежев Х.А. Огнезащитные и жаростойкие вермикулитобетонные композиты с применением вулканического пепла и пемзы // Инженерный вестник Дона, 2015. №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2902](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2902)
8. Перфилов В.А. Легкий жаростойкий фибробетон // Известия вузов. Строительство. 2008. № 9. С. 23–25.
9. Карпов В.В. Математическая обработка эксперимента и его планирование. М.: АСВ; СПб.: СПбГАСУ, 1998. 100 с.
10. Налимов В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука, 1965. 340 с.

## References

1. Rukovodstvo po vypolneniyu ognezashchitnykh i teploizolyatsionnykh shtukaturok mekhanizirovannym sposobom [Management on the fulfillment of
-



fire-retardant and thermal insulation plasterings in a mechanized manner]. М.: Stroyizdat, 1977. 46 p.

2. Journal of Materials Science Letters. 1987. Vol. 6. № 5. PP. 562–564.

3. Steel Strategy and Fire Protection. International Construction. 1972. Vol. 11. № 1. PP. 13 – 15.

4. Nekrasov K.D., Maslennikova M.G. Legkie zharostoykie betony na poristykh zapolnitelyakh [Light heat-resistant concrete on the porous fillers]. М.: Stroyizdat, 1982. 152 p.

5. Akhmatov M.A. Effektivnost' primeneniya mestnykh stroitel'nykh materialov i betona [The effectiveness of the use of local building materials and concrete]. Nal'chik: El'brus, 1986. 160 p.

6. Khezhev Kh.A., Khezhev T.A., Kimov U.Z., Dumanov K.Kh. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2011. №4 URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/710](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/710).

7. Khezhev T.A., Zhukov A.Z., Khezhev Kh.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2015. №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2902](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2902).

8. Perfilov V.A. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. 2008. № 9. pp. 23–25.

9. Karpov V.V. Matematicheskaya obrabotka eksperimenta i ego planirovanie [The mathematical processing of the experimental and planning]. М.: ASV; SPbGASU, 1998. 100 p.

10. Nalimov V.V. Statisticheskie metody planirovaniya ekstremal'nykh eksperimentov [Statistical methods of planning of extreme experiments]. М.: Nauka, 1965. 340 p.