УДК 519.85:669.9.031

Е.Г. КАРПИКОВ, инженер (johnjk@mail.ru), В.С. ЯНЧЕНКО, канд. техн. наук (vsy50@mail.ru),
Е.Л. КОРОЛЕВА, канд. техн. наук (korolewael@yandex.ru), С.М. СЕМИЧЕВ, инженер (s.semichev@bk.ru),
В.И. НОВИКОВА, магистрант (nviktorya@rambler.ru), А.С. ПАТУГИН, магистрант (mr.patugin@mail.ru)
Брянский государственный инженерно-технологический университет (241037, г. Брянск, пр-т Станке Димитрова, 3)

Экстремальное моделирование оптимального состава и содержания микронаполнителя в бетоне

На базе среды инженерных и научных вычислений Scilab разработаны программы экстремального моделирования экспериментальных данных Extr.sce и Interp.sce. Программа Extr.sce позволяет оптимизировать исходные составы микронаполнителей, используя данные центрального композиционного ортогонального плана полного факторного эксперимента. На основе результатов экспериментальных данных по определению физико-механических характеристик МЗБ, модифицированного микронаполнителями оптимального состава, программа Interp.sce позволяет определить наиболее рациональное содержание наполнителей в составе мелкозернистого бетона. Решение оптимизационных задач осуществляется при помощи алгоритма поиска максимальных элементов Max_z массива интерполяционных данных с получением их координат, соответствующих содержанию исходных компонентов микронаполнителя max_x и max_y, и выводом визуальных моделей обработки данных в виде контурных графиков и 3d-графиков интерполяционной поверхности для программы Extr.sce, а также поиска максимальных элементов Max_y с получением координат, соответствующих содержанию микронаполнителя в составе МЗБ max_x, с выводом графиков интерполяционной поверхности для программы Interp.sce. В результате применения микронаполнителя состава, оптимизированного при помощи разработанной программы Extr.sce, основываясь на результатах экстремального моделирования в программе Interp.sce, возможно получение мелкозернистого бетона с пределом прочности при изгибе 10,5 МПа при содержании наполнителя 10,3% от массы цемента; пределом прочности при сжатии 47,37 МПа – 11,82%; плотностью 2300,36 кг/м^3 – 9,24%. Наиболее оптимальное содержание микронаполнителя на основе волластонита для получения эффективного мелкозернистого бетона с высокими физико-механическими характеристиками составляет 10%.

Ключевые слова: экстремальное моделирование, оптимизация, микронаполнитель, волластонит, мелкозернистый бетон.

E.G. KARPIKOV, Engineer (johnjk@mail.ru), V.S. YANCHENKO, Candidate of Sciences (Engineering) (vsy50@mail.ru),
E.L. KOROLEVA, Candidate of Sciences (Engineering) (korolewael@yandex.ru), S.M. SEMICHEV, Engineer (s.semichev@bk.ru),
V.I. NOVIKOVA, Master student (nviktorya@rambler.ru), A.S. PATUGIN, Master student (mr.patugin@mail.ru)
Bryansk State Engineering-Technological University (3, Stanke Dimitrova Avenue, Bryansk, 241037, Russian Federation)

Extreme Simulation of Optimal Composition and Content of Micro-Filler in Concrete

On the basis of the environment of engineering and scientific computations Scilab, the programs of extreme simulation of experimental data Extr.sce and Interp.sce have been developed. The program Extr.sce makes it possible to optimize the initial compositions of micro-fillers with the use of data of the central composite orthogonal design of the full factorial experiment. On the basis of results of experimental data on determining physical-mechanical characteristics of fine concrete modified with micro-fillers of an optimal composition, the program Interp.sce makes it possible to define the optimal content of fillers in the composition of fine concrete. The solution of optimization problems is performed with the help of the search algorithm of maximal elements Max_z of interpolation data massive with obtaining their coordinates corresponding to the content of primary components of the micro-filler max_x and max_y, and plotting of visual models of data processing in the form of contour plots and 3d-plots of the interpolation surface for the program Extr.sce, as well as the search for maximal elements Max_y with obtaining coordinates corresponding to the content of the micro-filler in the composition of МЗБ max_x, with plotting of interpolation surface plots for the program Interp.sce. As a result of the use of the micro-filler content of which is optimized with the help of the developed program Extr.scr, on the basis of the extreme simulation in the program Interp.sce, it is possible to obtain the fine concrete with flexural strength 10,5 MPa at the filler content 10.3% of cement mass, compressive strength 47.37 MPa – 11.82%, density 2300.36 kg/m^3 – 9.24%. The most optimal content of the micro-filler on the basis of wollastonite for producing the efficient fine concrete with high physical-mechanical characteristics is 10%.

Keywords: extreme simulation, optimization, micro-filler, wollastonite, fine concrete.

В процессе оптимизации получения эффективного мелкозернистого бетона (МЗБ), модифицированного микронаполнителями различного состава, исследователь, как правило, получает большой объем данных зависимости целевых функций от входных параметров. Для отыскания оптимальных входных параметров, способствующих получению наиболее продуктивной целевой функции, исследователю необходим эффективный инструмент поиска, основанный на получении экстремумов из массивов выходных данных математического планирования эксперимента на основе современных интеллектуальных систем на базе высокопроизводительных средств вычисления [1–3].

Целью работы является разработка программного комплекса экстремального моделирования экспериментальных данных на базе среды инженерных и научных вычислений Scilab.

Scilab – одна из самых интересных свободных математических программ. Это система компьютерной математики, которая предназначена для выполнения инженерных и научных вычислений. По возможностям пакет Scilab практически не уступает Mathcad, а по интерфейсу близок к Matlab. В Scilab реализованы численные методы решения следующих задач вычислительной математики [4, 5].

Для достижения поставленной цели при получении матриц исходных данных использовался центральный композиционный ортогональный план полного факторного эксперимента с целью определить оптимальное соотношение исходных сырьевых компонентов микронаполнителя на основе волластонита, а также их влияние на физико-механические и технологические характеристики МЗБ.

Исследуемый микронаполнитель получен путем совместного помола в шаровой мельнице в течение 60 мин суперпластификатора С-3 и волластонита в различных соотношениях соответственно.

Математической моделью процесса является функция, связывающая параметры оптимизации: предел прочности при изгибе и сжатии через 3 и 28 сут тверде-

а *б*

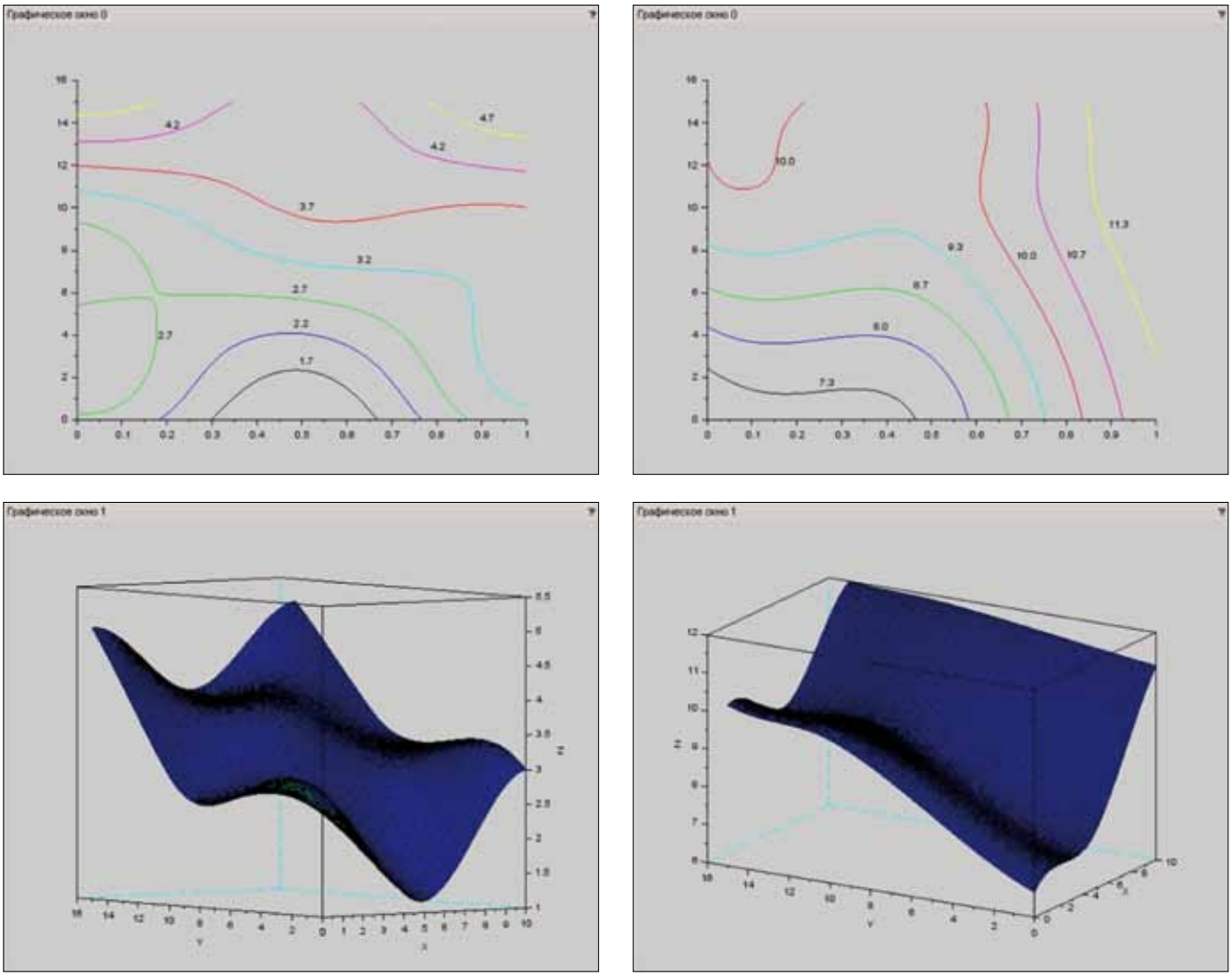

Рис. 1. Графики моделей зависимостей пределов прочности МЗБ от содержания волластонита и С-3 через 28 сут твердения при содержании цемента 0,5 кг: *а* – предел прочности при изгибе; *б* – предел прочности при сжатии

ния с переменными факторами содержания цемента, суперпластификатора С-3 и волластонита. При проведении эксперимента интервалы варьировались в следующих пределах: цемент – от 200 до 500 г; суперпластификатор С-3 – от 0 до 1%; волластонит – от 0 до 15%.

Функции отклика выходных параметров МЗБ от влияющих факторов описываются следующими уравнениями [6]:

$$y_1(R^3_{из})=0{,}405+0{,}586x_1+0{,}235x_2-0{,}234x_3+0{,}256x_1^2+ +0{,}049x_2^2+0{,}328x_3^2+0{,}174x_1x_2-0{,}234x_1x_3-0{,}176x_2x_3; \quad (1)$$

$$y_2(R^{28}_{из})=0{,}809+1{,}336x_1+0{,}562x_2-0{,}235x_3+0{,}728x_1^2- -0{,}046x_2^2+0{,}797x_3^2+0{,}585x_1x_2-0{,}235x_1x_3+0{,}06x_2x_3; \quad (2)$$

$$y_3(R^3_{сж})=0{,}496+2{,}932x_1+0{,}484x_2-1{,}832x_3+1{,}356x_1^2+ +0{,}3x_2^2+1{,}752x_3^2+0{,}575x_1x_2-1{,}505x_1x_3-0{,}282x_2x_3; \quad (3)$$

$$y_4(R^{28}_{сж})=3{,}38+4{,}308x_1+0{,}644x_2-0{,}704x_3+1{,}176x_1^2- -0{,}348x_2^2+1{,}932x_3^2+0{,}378x_1x_2-0{,}327x_1x_3+0{,}618x_2x_3. \quad (4)$$

Для обработки и анализа экспериментальных данных разработана программа экстремального моделирования Extr.sce на базе среды инженерных и научных вычислений Scilab. Ввод исходных данных для обработки в программной среде осуществляется при помощи матриц зависимостей переменных, заданных функцией вида:

$$z = f(x, y, w), \quad (5)$$

где z – искомая величина; x – содержание суперпластификатора С-3, %; y – содержание волластонита, %; w – содержание цемента, кг.

Для построения трехмерной модели функции содержание цемента было принято за постоянную величину $w = const$.

В результате прогонки загруженных моделей в разработанной программе Extr.sce получены экстремумы искомых характеристик мелкозернистого бетона *Max_z* и их координаты *max_x*; *max_y*, соответствующие содержанию суперпластификатора С-3 (x) и волластонита (y), представленные в табл. 1.

Основываясь на результатах экстремального моделирования экспериментальных данных, наиболее оптимальным для получения эффективного микронаполнителя является состав: суперпластификатор С-3 – 1% и волластонит – 15%, молотые совместно в шаровой мельнице в течение 60 мин. Разработанный микронаполнитель оптимального состава при содержании цемента 0,5 кг позволяет получить мелкозернистый бетон с прочностью при изгибе 5,18 МПа, при сжатии –

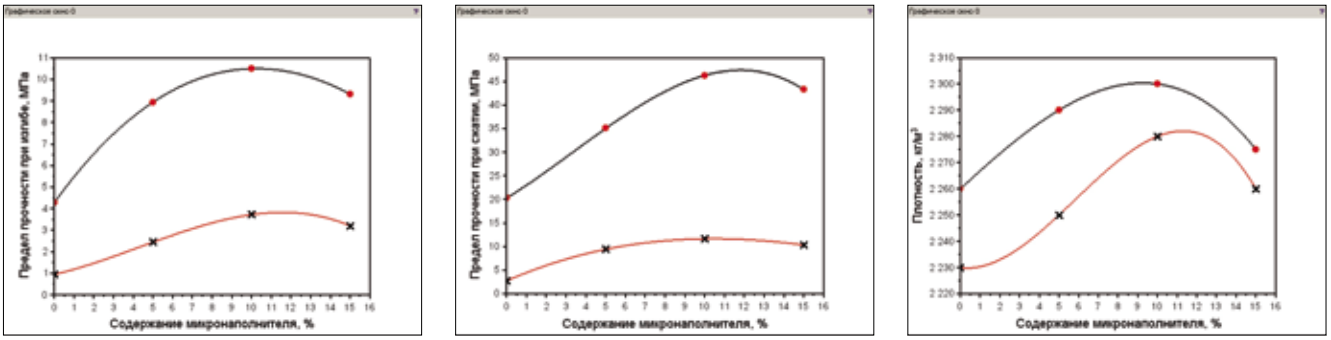

Рис. 2. Графики интерполяционной поверхности зависимости физико-механических характеристик МЗБ от содержания микронаполнителя на основе волластонита: *а* – предел прочности при сжатии; *б* – предел прочности при изгибе; *в* – плотность; – 3 сут; – 28 сут

Таблица 1

Экстремумы искомых характеристик мелкозернистого бетона

Характеристика	Максимальное значение *Max_z*	Координаты (содержание)		
		w (цемент), кг	*max_x* (С-3), %	*max_y* (волластонит), %
Предел прочности при изгибе через 3 сут, МПа	0,68	0,2	1	15
	1,43	0,35	1	15
	2,8	0,5	1	15
Предел прочности при изгибе через 28 сут, МПа	1,47	0,2	1	15
	2,3	0,35	1	10,8
	5,18	0,5	1	15
Предел прочности при сжатии через 3 сут, МПа	1,02	0,2	1	15
	5,4	0,35	1	10,4
	11,5	0,5	1	15
Предел прочности при сжатии через 28 сут, МПа	2,56	0,2	1	15
	9,5	0,35	1	15
	12	0,5	1	15

Таблица 2

Результаты моделирования в программе Interp.sce

Характеристика	Максимальный элемент интерполяционного массива *Max_z*	Координата максимального элемента массива *max_x*, содержание микронаполнителя, %
Прочность при изгибе через 3 сут, МПа	3,83	11,52
Прочность при изгибе через 28 сут, МПа	10,5	10,3
Прочность при сжатии через 3 сут, МПа	11,65	10,45
Прочность при сжатии через 28 сут, МПа	47,37	11,82
Плотность через 3 сут, кг/м^3	2282,03	11,36
Плотность через 28 сут, кг/м^3	2300,36	9,24

12 МПа, что подтверждает результаты, полученные с помощью математического планирования эксперимента. Модели обработки данных в разработанной программе Extr.sce представлены на рис. 1 в виде контурных графиков и 3d-графиков интерполяционной поверхности.

Для проверки расчетных данных изготавливали образцы мелкозернистого бетона размером 4×4×16 см, модифицированного микронаполнителем состава волластонит (15%) + суперпластификатор С-3 (1%), которые твердели в нормальных условиях. Содержание микронаполнителя в мелкозернистом бетоне варьировалось от 0 до 15% [7–10].

На базе среды инженерных и научных вычислений Scilab разработана программа Interp.sce для поиска наиболее оптимального содержания микронаполнителя на основе волластонита состава, определенного программой Extr.sce.

Ввод исходных данных для обработки в программной среде осуществляется при помощи матриц зависимостей переменных, заданных функцией вида:

$$z = \varphi\,(x, y), \qquad (6)$$

где z – искомая величина; x – содержание микронаполнителя расчетного состава, %; y – матрица экспериментальных значений искомой величины.

В результате прогонки загруженных моделей в разработанной программе Interp.sce получен максимальный элемент интерполяционного массива *Max_y* и его координата *max_x*, соответствующая оптимальному содержанию микронаполнителя (X).

Модели обработки данных в разработанной программе Interp.sce представлены на рис. 2.

Таким образом, для получения МЗБ с наиболее высокими физико-механическими характеристиками целесообразно применять микронаполнитель на основе волластонита в количестве 10% от массы цемента.

В ходе проведенной работы решены следующие задачи.

1. На базе среды инженерных и научных вычислений Scilab разработаны программы экстремального моделирования экспериментальных данных Extr.sce и Interp.sce. Программа Extr.sce позволяет оптимизировать исходные составы микронаполнителей, используя данные центрального композиционного ортогонального плана полного факторного эксперимента. На основе результатов экспериментальных данных по определению физико-механических характеристик МЗБ, модифицированного микронаполнителями оптимального состава, программа Interp.sce позволяет определить наиболее рациональное содержание наполнителей в составе мелкозернистого бетона. Решение оптимизационных задач осуществляется при помощи алгоритма поиска максимальных элементов *Max_z* массива интерполяционных данных с получением их координат, соответствующих содержанию исходных компонентов микронаполнителя *max*_x и *max_y*, и выводом визуальных моделей обработки данных в виде контурных графиков и 3d-графиков интерполяционной поверхности для программы Extr.sce, а также поиска максимальных элементов *Max_y* с получением координат, соответствующих содержанию микронаполнителя в составе МЗБ *max_x* с выводом графиков интерполяционной поверхности для программы Interp.sce.

2. Основываясь на результатах экстремального моделирования экспериментальных данных при помощи разработанной программы Extr.sce, наиболее оптимальным для получения эффективного микронаполнителя является состав: суперпластификатор С-3 – 1% и волластонит – 15%, молотые совместно в шаровой мельнице в течение 60 мин. Разработанный микронаполнитель оптимального состава при содержании цемента 0,5 кг позволяет получить мелкозернистый бетон с прочностью при изгибе 5,18 МПа, при сжатии – 12 МПа.

3. В результате применения микронаполнителя состава, оптимизированного при помощи разработанной программы Extr.sce, основываясь на результатах экстремального моделирования в программе Interp.sce, возможно получение мелкозернистого бетона с пределом прочности при изгибе 10,5 МПа при содержании наполнителя 10,3% от массы цемента; пределом прочности при сжатии 47,37 МПа – 11,82%; плотностью 2300,36 кг/м^3 – 9,24%. Наиболее оптимальное содержание микронаполнителя на основе волластонита для получения эффективного мелкозернистого бетона с высокими физико-механическими характеристиками составляет 10%.

Список литературы

1. Бухановский А.Е., Иванов С.В., Нечаев Ю.И. Особенности планирования эксперимента при моделировании экстремальных ситуаций в интеллектуальной системе исследовательского проектирования // *Искусственный интеллект*. 2012. № 3. С. 228–240.
2. Емельянов, В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.Н. Теория и практика эволюционного моделирования. М.: Физматлит, 2003. 432 с.
3. Thom R. Catastrophe theory: Its present state and future perspectives // *Commutation on the ASM*. 1994. Vol. 37. No. 3, pp. 77–84.
4. Янченко В.С. Основы работы в математической среде Scilab. Брянск: БГИТА, 2013. 124 с.
5. Алексеев Е.Р. Scilab: решение инженерных и математических задач. М.: ALT Linux, 2008. 260 с.
6. Высокопрочный мелкозернистый бетон с нанодисперсной добавкой на основе волластонита. *Бетон и железобетон – взгляд в будущее: научн. труды III Всероссийской (II Международной) конф. по бетону и железобетону*. М.: МГСУ. 2014. С. 180–184.
7. Lukuttsova N., Luginina I., Karpikov E., Pykin A., Ystinov A., Pinchukova I. High-performance fine concrete modified with nano-dispersion additive // *International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)*. 2014. Vol. 9. No. 22, pp. 15825–15833.
8. Баженов Ю.М. Лукутцова Н.П., Карпиков Е.Г. Мелкозернистый бетон, модифицированный комплексной микродисперсной добавкой // *Вестник МГСУ*. 2013. № 2. С. 94–100.
9. Гегерь В.Я., Лукутцова Н.П., Карпиков Е.Г. и др. Повышение эффективности мелкозернистого бетона комплексной микродисперсной добавкой // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2013. № 3. С. 15–18.
10. Лукутцова Н.П., Карпиков Е.Г. Энергоэффективный мелкозернистый бетон с комплексным микронаполнителем // *Строительство и реконструкция*. 2014. № 5 (55). С. 94–100.

References

1. Bukhanovskii A.E., Ivanov S.V., Nechaev Yu.I. Characteristics of experimental design while simulating extreme situations in the intelligent system of design research. *Iskusstvennyi intellekt*. 2012. No. 3, pp. 228–240. (In Russian).
2. Emel'yanov V.V., Kureichik V.V., Kureichik V.N. Teoriya i praktika evolyutsionnogo modelirovaniya [Theory and practice of evolutionary modeling]. Moscow: Fizmatlit. 2003. 432 p.
3. Thom R. Catastrophe theory: Its present state and future perspectives. *Commutation on the ASM*. 1994. Vol. 37. No. 3, pp. 77–84.
4. Yanchenko V.S. Osnovy raboty v matematicheskoi srede Scilab [Basics of mathematical environment Scilab]. Bryansk: BGITA. 2013. 124 p.
5. Alekseev E.R. Scilab: Reshenie inzhenernykh i matematicheskikh zadach [Scilab: Solving engineering and mathematical problems]. Moscow: ALT Linux. 2008. 260 p.
6. Lukuttsova N.P., Karpikov E.G., Dyagterev E.V., Tuzhikova M.Yu. High-performance fine concrete modified with nano-disperse wollastonite-based additive. *Concrete and reinforced concrete – prospection: Materials of III All-Russian (II International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete*. Moscow: MGSU. 2014, pp. 180–184. (In Russian).
7. Lukuttsova N., Luginina I., Karpikov E., Pykin A., Ystinov A., Pinchukova I. High-performance fine concrete modified with nano-dispersion additive. *International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)*. 2014. Vol. 9. No. 22, pp. 15825–15833.
8. Bazhenov Yu.M., Lukuttsova N.P., Karpikov E.G. Fine concrete modified by complex micro-dispersed additive. *Vestnik MGSU*. 2013. No. 2, pp. 94–100. (In Russian).
9. Geger' V.Ya., Lukuttsova N.P., Karpikov E.G., Petrov R.O Improving the efficiency of fine concrete by complex micro-dispersed additive. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2013. No. 3, pp. 15–18. (In Russian).
10. Lukuttsova N.P., Karpikov E.G. Energy-efficient fine concrete with complex microfiller. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2014. No. 5 (55), pp. 94–100. (In Russian).