

УДК 691.32

Смирнов Денис Сергеевич

кандидат технических наук, доцент

E-mail: denis27111974@yandex.ru

Гараев Тимур Раисович

ассистент

E-mail: svist_@list.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Сунгатуллин Тагир Зайнулович

генеральный директор

E-mail: tagirsun@yandex.ru

ООО «РБР16»

Адрес организации: 423820, Россия, г. Набережные Челны, ул. Магистральная, д. 12

Лобанова Ангелина Сергеевна

лаборант

E-mail: lobanova0998@mail.ru

АО «КВАРТ»

Адрес организации: 420054, Россия, г. Казань, ул. Техническая, д. 25

Разработка математической модели оптимизации состава бетона

Аннотация

Постановка задачи. Цель исследования – выявление оптимального зернового состава цементобетона и проведение экспериментальной проверки математического аппарата прогнозирования оптимальных зерновых составов.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в выборе технологических параметров и целевых функций. Были выделены семь составов бетонов с лучшими показателями, далее, по ним определялось изменение предела прочности при сжатии бетона для разного расхода цемента. Также оценивалось влияние цемента на структуру и свойства бетона. На основании сформированной экспериментальной базы механизм задания удельного веса значений в точках окружения обратно пропорционален расстояниям от точек окружения до требуемой точки, в которой прогнозируются функции. Предлагаемый механизм прогнозирования реализован в среде Mathcad.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в разработке математического аппарата прогнозирования и подбора состава цементобетона. Аппарат прогнозирования разработан с учетом особенностей зернового состава крупного и мелкого заполнителей, а так же их смесей для различных регионов, путем рационального подбора соотношения между крупным и мелким заполнителем, при котором достигается наилучшая структура смеси, обеспечивающая лучшие механические характеристики.

Ключевые слова: зерновой состав, аппарат прогнозирования, предел прочности, коэффициент детерминации, оптимизация.

Для цитирования: Смирнов Д. С., Гараев Т. Р., Сунгатуллин Т. З., Лобанова А. С. Разработка математической модели оптимизации состава бетона // Известия КГАСУ. 2020. № 4 (54). С. 72–84.

1. Введение

В настоящее время в целях решения материаловедческой задачи подбора технологических параметров, обеспечивающих оптимальное сочетание эксплуатационных характеристик, используется широкий спектр инструментов прикладной математики. Одним из направлений, обеспечивающих решение данной задачи – является разработка алгоритмов формирования и обработки статистических

данных в сочетании с учетом физико-механических процессов. В целом, задача данного направления разбивается на следующие этапы:

1. Этап формализации. Заключается в выборе технологических параметров и целевых функций. В процессе выбора, осуществляется качественная оценка влияния каждого из параметров на целевые функции;
2. Этап выбора математического аппарата прогнозирования значений целевых функций от выбранных технологических параметров;
3. Этап программирования выбранного математического аппарата. Результатом данного этапа должен являться алгоритм работы выбранного математического аппарата, реализованный в среде программирования;
4. Этап планирования эксперимента;
5. Этап формирования базы данных для работы алгоритма прогнозирования целевых функций. Должна появиться база экспериментальных данных, определяющих значения целевых функций в точках, определенных планом эксперимента;
6. Этап реализации алгоритма прогнозирования на сформированной экспериментальной базе данных;
7. Решение задачи подбора технологических параметров, определяющих оптимальное сочетание эксплуатационных характеристик (целевых функций) путем многократной прогонки алгоритма моделирования по различным сочетаниям параметров технологии.
8. Этап контрольного эксперимента для выбранных оптимальных точек.

Цель и задачи исследования:

Ключевыми критериями, определяющими выбор именно данных параметров в целях статистического прогнозирования, являются:

1. Существенное влияние различного фракционного состава на эксплуатационные характеристики;
2. Малая проработка методов анализа на базе коррелированных параметров, каковыми являются параметры фракционного состава (т.к. изменение одной фракции ведет к пропорциональному изменению остальных). В большинстве случаев, в качестве параметров, определяющих прочность, выбирается только соотношение гравий-песок, т.е. устанавливается оптимальное соотношение фракций песка и крупного заполнителя в отрыве друг от друга [1]. Соответственно, построенная модель не отражает значительного потенциала влияния вариативного подбора параметров зернового состава на эксплуатационные характеристики бетона.

Для прогнозирования эксплуатационных характеристик от выбранных в значительной степени коррелированных между собой параметров моделирования стандартные методы регрессионного анализа практически неприменимы – коэффициент детерминации не будет выше 0,5. Это означает, что расчетные параметры модели не более чем на 50 % объясняют зависимость между изучаемыми параметрами, (чем выше коэффициент детерминации, тем качественнее модель) [2].

2. Материалы и методы

В качестве целевой функции «Y» определена ключевая эксплуатационная характеристика:

- R – предел прочности при сжатии, кгс/см²;

В качестве варьируемых технологических параметров выбраны содержания фракций бетонного заполнителя:

- Фр1 – частный остаток на сите 20 мм;
- Фр2 – частный остаток на сите 15 мм;
- Фр3 – частный остаток на сите 10 мм;
- Фр4 – частный остаток на сите 5 мм;
- Фр5 – частный остаток на сите 2,5 мм;
- Фр6 – частный остаток на сите 1,25 мм;
- Фр7 – частный остаток на сите 0,63 мм;
- Фр8 – частный остаток на сите 0,315 мм;
- Фр9 – частный остаток на дне.

В данных условиях в качестве математического статистического аппарата прогнозирования предлагается за прогнозные значения целевых функций «Y» в требуемых точках прогнозирования принимать средневзвешенное по известным значениям целевых функций в смежных точках на основании сформированной экспериментальной базы. Механизм задания удельного веса значений в точках окружения – обратно пропорционален расстояниям от точек окружения до требуемой точки, функции в которой прогнозируются [3].

Предлагаемый механизм прогнозирования реализован в среде Mathcad. Ниже представлена апробация работоспособности аппарата прогнозирования для трех целевых функций Y_0 , Y_1 , Y_2 – предел прочности при сжатии ($R_{сж}$, кгс/см²). С параметрами 1 – содержание гравия в ПГС, и параметрами 2 – содержание песка в ПГС, в процентах по массе.

Задаются прогнозируемые функции, и варьируемые параметры 1 и 2. При содержании гравия в ПГС 30 % и содержании песка 70 %, предел прочности при сжатии $R_{сж} = 199$ кгс/см², при содержании гравия в ПГС 60 % и содержании песка 40 %, предел прочности при сжатии $R_{сж} = 301$ кгс/см², при содержании гравия в ПГС 90 % и содержании песка 10 %, предел прочности при сжатии $R_{сж} = 162$ кгс/см²:

Прогнозируемая функция	Параметр 1	Параметр 2
$Y := \begin{pmatrix} 199 \\ 301 \\ 162 \end{pmatrix}$	$\Phi p1 := \begin{pmatrix} 30 \\ 60 \\ 90 \end{pmatrix}$	$\Phi p2 := \begin{pmatrix} 70 \\ 40 \\ 10 \end{pmatrix}$

Сформирована база данных:

$$\text{База} := \begin{pmatrix} Y_0 & \Phi p1_0 & \Phi p2_0 \\ Y_1 & \Phi p1_1 & \Phi p2_1 \\ Y_2 & \Phi p1_2 & \Phi p2_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 199 & 30 & 70 \\ 301 & 60 & 40 \\ 162 & 90 & 10 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{точка 0} \\ \text{точка 1} \\ \text{точка 2} \end{matrix}$$

Необходимо спрогнозировать предел прочности при сжатии для ПГС с 70 % содержания гравия. Для этого задаются координаты требуемой точки:

$$\Phi p1_{\text{треб}} := 70 \quad \Phi p2_{\text{треб}} := 30,$$

$$\text{Треб} := \begin{pmatrix} \Phi p1_{\text{треб}} \\ \Phi p2_{\text{треб}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 70 \\ 30 \end{pmatrix}.$$

Рассчитывается средневзвешенное расстояние от требуемых точек до заданных параметров базы данных:

$$\text{Расст}_0 := \sqrt{(\Phi p1_0 - \Phi p1_{\text{треб}})^2 + (\Phi p2_0 - \Phi p2_{\text{треб}})^2} = 56,569,$$

$$\text{Расст}_1 := \sqrt{(\Phi p1_1 - \Phi p1_{\text{треб}})^2 + (\Phi p2_1 - \Phi p2_{\text{треб}})^2} = 14,142,$$

$$\text{Расст}_2 := \sqrt{(\Phi p1_2 - \Phi p1_{\text{треб}})^2 + (\Phi p2_2 - \Phi p2_{\text{треб}})^2} = 28,284.$$

Рассчитываем влияние заданных параметров на требуемую точку:

$$\text{Сумма расст} := \text{Расст}_0 + \text{Расст}_1 + \text{Расст}_2 = 98,995$$

$$\text{Вес}_1 := \frac{(\text{Расст}_0)}{\text{Сумма расст}} = 0,571$$

$$\text{Вес}_2 := \frac{(\text{Расст}_1)}{\text{Сумма расст}} = 0,143$$

$$\text{Вес}_3 := \frac{(\text{Расст}_2)}{\text{Сумма расст}} = 0,286$$

$$\text{Вес}_1 := \text{Вес}_1 + \text{Вес}_2 + \text{Вес}_3 = 1$$

Вычисляем прогнозируемое значение функции в требуемых точках:

$$Y_{\text{треб}} := Y_0 \times \frac{(\text{Расст}_0)}{\text{Сумма расст}} + Y_1 \times \frac{(\text{Расст}_1)}{\text{Сумма расст}} + Y_2 \times \frac{(\text{Расст}_2)}{\text{Сумма расст}} = 203 \text{ кгс/см}^2$$

Прогнозируемый предел прочности при сжатии для ПГС с 70 % содержанием гравия, составляет 203 кгс/см². Механизм подтвердил свою работоспособность. Далее была сформирована база данных для 65 составов.

Далее определялось изменение предела прочности при сжатии бетона, для разного расхода цемента. Также оценивалось влияние цемента и его расхода на структуру бетона.

3. Результаты

На данном этапе эксперимента стояла задача выбора оптимального зернового состава с максимальными значениями прочности, и, для ускорения получения результата,

сравнение составов происходило на образцах-кубах в 7 суточном возрасте [4]. Составы, характеризующие верхние интервалы кривых зернового состава, имеют большую прочность по сравнению с составами нижних интервалов, что вызвано наличием у первых крупных фракций на сите 20 мм, 15 мм и 10 мм.

Схожая аналогия прослеживается у составов 14, 15, 20, 21, 29. Составы 37÷41 показывают рост прочности с увеличением модулем крупности мелкого заполнителя [5-6].

На основе первого этапа оптимизации зернового состава были выделены семь составов с лучшими показателями: состав 2, состав 6, состав 17, состав 21, состав 29, состав 34 и состав 40.

На рис. 1-2 видно, что при изменении цемента и его расхода, прочность составов изменяется эквивалентно друг другу.

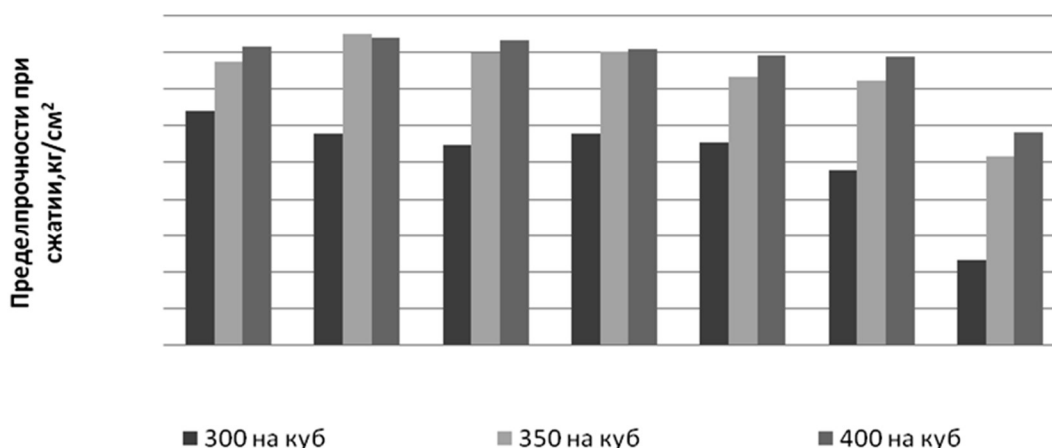


Рис. 1. Предел прочности при сжатии R_7 при разном расходе цемента (иллюстрация авторов)

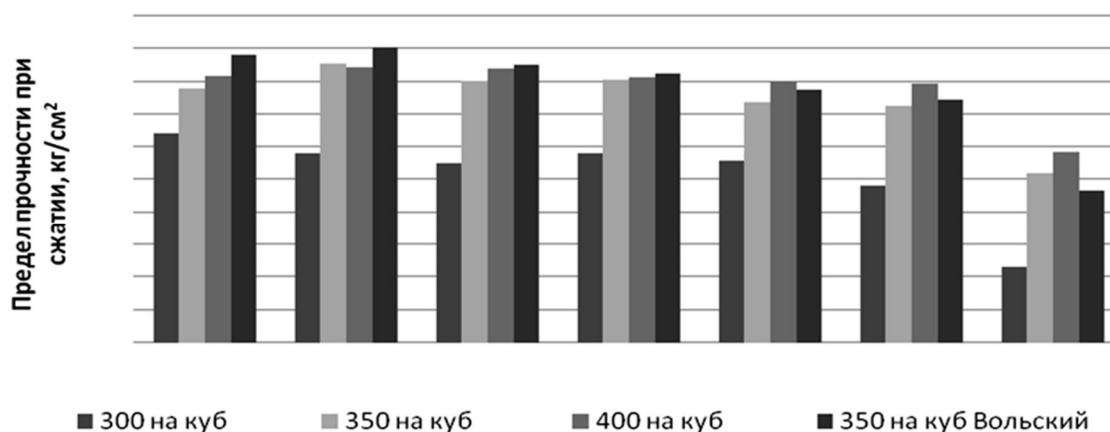


Рис. 2. Предел прочности при сжатии R_7 с разными цементами (иллюстрация авторов)

4. Обсуждение

В исследованиях [7-8] проведена оптимизация зернового состава и экспериментальная проверка прогнозирования аппарата.

Зерновой состав исходной ПГС с гравийностью 21,1 % был пересчитан для гравийности от 0 % до 100 % табл. 1.

С помощью разработанного аппарата для десяти составов с разным содержанием гравия в смеси, были спрогнозированы пределы прочности при сжатии (рис. 3).

Как видно из графика наибольшее значение предела прочности при сжатии бетона на ПГС с содержанием гравия 60 %.

Для выяснения достоверности прогнозируемой прочности, был произведен расчет состава бетона по методу Б.Г. Скрамтаева.

Таблица 1

Значения для требуемых точек

Содержание гравия, %	Частные остатки на ситах, %								
	20 мм	15 мм	10 мм	5 мм	2,5 мм	1,25 мм	0,63 мм	0,315 мм	дно
0	0	0	0	0	10	6,1	7,4	37,5	39
10	1,3	1,5	2,8	4,4	9	5,5	6,6	33,8	35,1
20	2,6	3	5,7	8,7	8	4,9	5,9	30	31,2
30	3,8	4,5	8,5	13,1	7	4,3	5,1	26,3	27,3
40	5,1	6,1	11,4	17,4	6	3,7	4,4	22,5	23,4
50	6,4	7,6	14,2	21,8	5	3	3,7	18,8	19,5
60	7,7	9,1	17,1	26,2	4	2,4	2,9	15	15,6
70	9	10,6	19,9	30,5	3	1,8	2,2	11,3	11,7
80	10,2	12,1	22,7	34,9	2	1,2	1,5	7,5	7,8
90	11,5	13,6	25,6	39,2	1	0,6	0,7	3,8	3,9
100	12,8	15,2	28,4	43,6	0	0	0	0	0

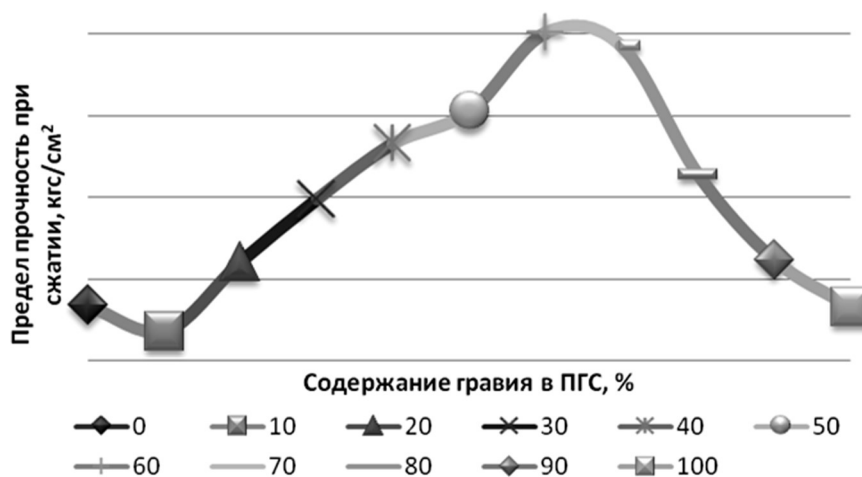


Рис. 3. График прогнозируемого предела прочности при сжатии (илюстрация авторов)

Состав бетона по этому методу подбирают в два этапа. Первое, это расчет ориентировочного состава тяжелого бетона [9]. Второе – проверка и корректировка расчетного состава по результатам пробных замесов и испытаний, контрольных образцов.

Из расчета состава бетона по методу Скрамтаева получаем песчано-гравийную смесь смешением гравия и песка общей массой $m = 1909,7$ кг с содержанием гравия 77 % и песка 23 % [10-12].

По проектным составам были заформованы образцы-кубы $10 \times 10 \times 10$ см. И испытаны в возрасте 7 суток. По проведенному эксперименту, получены следующие данные табл. 2.

Таблица 2

Составы для сравнительных испытаний

Параметры	Составы	
	На основе прогноза 60 % гравия	По методу Скрамтаева 77 % гравия
Гравий, кг	1185	1521
Песок, кг	790	454
Цемент, кг	350	350
Вода, кг	175	175
$R_{сж7сут.}$, кгс/см ²	309	243

Результаты, полученные эмпирическим путем, подтверждают прогнозируемые значения предела прочности при сжатии в возрасте семи суток. Полученные результаты по разработке математического аппарата, подбора составов цементобетонов, формирования базы данных коррелируют с исследованиями других ученых [13-15].

5. Заключение

1. Предложен математический аппарат прогнозирования и подбора состава цементобетона с учетом особенностей зернового состава крупного и мелкого заполнителей, а также их смесей, для различных регионов путем рационального подбора соотношения между крупным и мелким заполнителем, при котором достигается наилучшая структура смеси, обеспечивающая лучшие механические характеристики.

2. Сформирована база данных для разработанной методики на основе результатов испытания на сжатие семи суточных образцов кубов, включающая дополнительные корректирующие составы с разными вяжущими при разном расходе последних.

3. Выявлен оптимальный зерновой состав. В среде Mathcad апробирована работоспособность метода прогнозирования прочности. По результатам решения обратной задачи был выбран оптимальный зерновой состав цементобетона с гравийностью 60 %.

Проведен сравнительный расчет состава цементобетона по методу Б.Г. Скрамтаева.

Список библиографических ссылок

1. Баженов Ю. М., Алимов Л. А., Воронин В. В. Структура и свойства бетонов с наномодификаторами на основе техногенных отходов. М. : МГСУ, 2013. 204 с.
2. Баженов Ю. М., Демьянова В. С., Калашников В. И. Модифицированные высококачественные бетоны. М. : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. 368 с.
3. Бетон песчаный : пат. 2569947 Рос. Федерация. № 2014152748/03 ; заявл. 24.12.14 ; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 34. 5 с.
4. Майстренко И. Ю., Овчинников И. И., Овчинников И. Г., Успанов А. М. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 3 // Транспортные сооружения. 2018. Т. 5. № 1. С. 8. DOI: 10.15862/08SATS118.
5. Дворкин Л. И. Специальные бетоны. М. : Инфа-Инженерия, 2013. 368 с.
6. Гезенцвей Л. Б. Дорожный асфальтобетон. М. : Транспорт, 1985. С. 350.
7. Рабиндер К. Smart dynamic concrete // BASF Construction. 2018. Вып. 2. С. 176.
8. Могилевич В. М., Щербакова Р. П., Тюменцева О. В. Дорожные одежды из цементогрунта. М. : Транспорт, 1973. С. 216.
9. Мосаков Б. С., Курбатов В. Л., Римшин В. И. Основы технологической механики тяжелых бетонов // КМБ СКФ БГТУ, 2017. 210 с.
10. Сырьевая смесь для сульфатированного цемента : пат. 2569657 Рос. Федерация. № С04В7/04 ; заявл. 24.07.14 ; опубл. 27.11.15, Бюл. № 33. 6 с.
11. Бедов А. И., Бабков В. В., Габитов А. И., Сахибгареев Р. Р., Салов А. С. Монолитное строительство в Республике Башкортостан: от теории к практике // Вестник МГСУ. 2013. № 10. С. 110–121. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.10.110-121.
12. Харченко А. И., Алексеев В. А., Харченко И. Я., Баженов Д. А. Структура и свойства мелкозернистых бетонов на основе композиционных вяжущих // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. В. 13. С. 322–331. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.322-331.
13. Garipov A., Makarov D., Khozin V., Stepanov S., Ayupov D. Cement concrete modified by fine-dispersed anionactive bitumen emulsion for road construction // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. 890. P. 012107. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012107.
14. Fides M., Kovalcikova A., Hvizdos P. Mechanical and tribological properties of electrically conductive SiC based cermets // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2017. № 65. P. 76–82.

15. Feys D., Verhoeven R., Schutter G. Fresh self-compacting concrete, a shear thickening material // Cement and Concrete Research. 2008. (38) № 7. P. 923–929.

Smirnov Denis Sergeevich

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: denis27111974@yandex.ru

Garaev Timur Raisovich

assistant

E-mail: svist_@list.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Sungatullin Tagir Zaynulovich

general director

E-mail: tagirsun@yandex.ru

LLC «RBR16»

The organization address: 423820, Russia, Naberezhnye Chelny, Magistralnaya st., 12

Lobanova Angelina Sergeevna

laboratory assistant

E-mail: lobanova0998@mail.ru

JSC «KVART»

The organization address: 420054, Russia, Kazan, Tehnicheskaya st., 25

Development of a mathematical model for optimizing the composition of concrete

Abstract

Problem statement. The purpose of the study is to identify the optimal grain composition and to conduct an experimental test of the mathematical apparatus for predicting optimal grain compositions.

Results. The main results of the study are the selection of technological parameters and target functions. Seven compositions with the best indicators were identified and used to determine the change in the compressive strength of concrete for different cement consumption. Also, the influence of cement and its consumption on the composition structure was evaluated. Based on the formed experimental data, it was determined that the mechanism for setting the specific weight of values at the surrounding points was inversely proportional to the distances from the surrounding points to the desired point, at which the functions were predicted. The proposed forecasting mechanism is implemented in the Mathcad environment.

Conclusions. The results are significant for the construction industry because of the development of the mathematical apparatus for forecasting and selecting the composition of concrete with the peculiarities of the grain structure of large and small fillers and their mixtures for different regions through proper selection of the ratio between large and small filler, which gives the best structure of the mixture, providing the best mechanical characteristics.

Keywords: grain composition, forecasting apparatus, ultimate strength, coefficient of determination, optimization.

For citation: Smirnov D. S., Garaev T. R., Sungatullin T. Z., Lobanova A. S. Development of a mathematical model for optimizing the composition of concrete // Izvestija KGASU. 2020. № 4 (54). P. 72–79.

References

1. Bazhenov Yu. M., Alimov L. A., Voronin V. V. Structure and properties of concrete with nanomodifiers based on technogenic waste. M. : MGSU, 2013. 204 p.
2. Bazhenov Yu. M., Demyanova V. S., Kalashnikov V. I. Modified high-quality concrete. M. : Izdatelstvo Associacii stroitelnyh vuzov, 2006. 368 p.

3. Sand Concrete : patent 2569947 of the Rus. Federation. № 2014152748/03 ; decl. 24.12.14; publ. 10.12.2015. Bull. № 34. 5 p.
4. Maistrenko I. Yu., Ovchinnikov I. I., Ovchinnikov I. G., Uspanov A.M. Accidents and destruction of bridge structures, analysis of their causes // Transport construction. 2018. Vol. 5. Iss. 1. P. 8. DOI: 10.15862/08SATS118.
5. Dvorkin L. I. Special concrete. M. : Infa-Engeneriya, 2013. 368 p.
6. Gezentsvey L. B. Road asphalt concrete. M.: Transport, 1985. P. 350.
7. Rabinder K. Smart dynamic concrete // BASF Construction. 2018. Vol. 2. P. 176.
8. Mogilevich V. M., Shcherbakova R. P., Tyumentseva O. V. Road clothes made of cement. M. : Transport, 1973. P. 216.
9. Mosakov B. S., Kurbatov V. L., Rimshin V. I. Fundamentals of technological mechanics of heavy concrete: monograph // KMB SKF BSTU, 2017. 210 p.
10. Raw mix for sulphated cement: patent 2569657 of the Rus. Federation. C04B7/04 ; decl. 24.07.14 ; publ . 27.11.15. Bull. № 33. 6 p.
11. Bedov A. I., Babkov V. V., Gabitov A. I. Sahib Gareev R. R., Salov A. S. Monolithic construction in the Republic of Bashkortostan: from theory to practice // Vestnik MGSU. 2013. № 10. P. 110–121. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.10.110-121.
12. Kharchenko A. I., Alekseev V. A., Kharchenko I. Ya., Bazhenov D. A. Structure and properties of fine-grained concrete based on composite binders // Vestnik MGSU. 2019. Vol. 14. P. 322–331. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.322-331.
13. Garipov A., Makarov D., Khozin V., Stepanov S., Ayupov D. Cement concrete modified by fine-dispersed anionactive bitumen emulsion for road construction // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. 890. P. 012107. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012107.
14. Fides M., Kovalchikova A., Khvizdos P. Mechanical and tribological properties of electrically conductive SiC based cermets // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2017. № 65. P. 76–82.
15. Feys D., Verhoeven R., Schutter G. Fresh self-compacting concrete, a shear thickening material // Cement and concrete research. 2008. Vol. 7. P. 923–929.