

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-57-62>

УДК 666.972.165

## Комплексные добавки к бетону на основе веществ органической и минеральной природы

Инж. И. Р. Смирнов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Открытое акционерное общество «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания» (Жлобин, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022  
Belarusian National Technical University, 2022

**Реферат.** Производство бетонов, обладающих высокой скоростью твердения, не осуществимо без применения модифицирующих добавок. Развитие химической промышленности обусловило появление большого количества добавок с различными свойствами. Одни увеличивают морозо- и коррозионную стойкость, прочность строительных материалов, другие влияют на процессы схватывания бетона и водоцементное отношение. Наибольший интерес представляет совместная работа добавок в составе цементного камня. В статье приведен анализ и определено влияние различных комбинаций химических добавок (карбоната натрия  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , хлорида натрия  $\text{NaCl}$ , нитрата натрия  $\text{NaNO}_3$ ) на структурообразование и свойства цементного камня в составе комплексной добавки с помощью метода симплекс-решетчатого планирования эксперимента. В ходе исследований для получения цементного камня использовали портландцемент М500 Д0 с добавлением в установленных пропорциях  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaCl}$  и  $\text{NaNO}_3$ . В результате испытаний найдено оптимальное соотношение компонентов в составе комплексной добавки:  $\text{NaNO}_3$  – 12–38 %;  $\text{NaCl}$  – 34–54 %;  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  – 26–42 %. При введении данного комплекса в состав бетонной смеси наблюдались положительная динамика в нейтрализации коррозионного воздействия на арматуру в бетоне, а также ускоренный набор твердости бетоном. Полученные результаты могут быть использованы на профильных предприятиях химической промышленности и в исследованиях при разработке модифицирующих добавок.

**Ключевые слова:** метод симплекс-решетчатого планирования, модифицирующие добавки, твердость, коррозия, цементный камень, трехкомпонентные диаграммы свойств

**Для цитирования:** Смирнов, И. Р. Комплексные добавки к бетону на основе веществ органической и минеральной природы / И. Р. Смирнов // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 1. С. 57–62. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-57-62>

## Complex Additives for Concrete Based on Substances of Organic and Mineral Nature

I. R. Smirnov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>OJSC “Byelorussian Steel Works – Management Company of Byelorussian Metallurgical Company Holding” (Zhlobin, Republic of Belarus)

**Abstract.** The production of concretes with a hard hardening rate is not feasible without the use of modifying additives. The development of the chemical industry has led to the emergence of a large number of additives with different properties. Some increase the frost and corrosion resistance, the strength of building materials, while others affect the setting of concrete and the water-cement ratio. Of greatest interest is the joint work of the additives in the composition of the cement stone. The paper analyzes and determines the effect of various combinations of chemical additives (sodium carbonate  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , sodium chloride  $\text{NaCl}$  and sodium nitrate  $\text{NaNO}_3$ ) on the structure formation and properties of cement stone as part of a complex additive using the simplex-lattice experiment planning method. In the course of the research, to obtain cement stone, Portland cement M500 D0 has been used with the addition of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaCl}$  and  $\text{NaNO}_3$  in the established proportions. As a result of tests, it has been found that the following proportions of the components in the composition of the complex additive are optimal:  $\text{NaNO}_3$  – 12–38 %;  $\text{NaCl}$  – 34–54 %;  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  – 26–42 %. With the introduction of this complex into the composition of the concrete mixture, positive dynamics have been observed in neutralizing the corrosion effect on reinforcement in concrete, as well as an accelerated set of concrete hardness. The results obtained can be used at specialized enterprises of the chemical industry, as well as in further research in the development of modifying additives.

**Keywords:** simplex lattice planning method, modifying additives, hardness, corrosion, cement stone, three-component diagram of properties

**For citation:** Smirnov I. R. (2022) Complex Additives for Concrete Based on Substances of Organic and Mineral Nature. *Science and Technique*. 21 (1), 57–62. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-57-62> (in Russian)

### Адрес для переписки

Смирнов Иван Русланович  
ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга БМК»  
ул. Промышленная, 37,  
247210, г. Жлобин, Республика Беларусь  
Тел.: +375 2334 5-57-38  
nti.to@bmz.gomel.by

### Address for correspondence

Smirnov Ivan R.  
OJSC “BSW – Management Company of BMC Holding”  
37, Promyshlennaya str.,  
247210, Zhlobin, Republic of Belarus  
Tel.: +375 2334 5-57-38  
nti.to@bmz.gomel.by

## Введение

Во всем мире строительная отрасль развивается очень интенсивно, и сегодня капитальное строительство невозможно представить без бетона и железобетона. Поэтому современный модифицированный бетон – важный и практически незаменимый материал. С увеличением темпов строительства остро стоят вопросы модернизации производства, разработки новых технологий, которые позволят изготавливать бетоны с необходимыми эксплуатационными свойствами.

Развитие химической промышленности обусловило появление большого количества добавок, обладающих различными свойствами. Одни увеличивают морозо- и коррозионную стойкость, прочность строительных материалов, другие влияют на процессы схватывания бетона и водоцементное отношение. Наибольший интерес представляет совместная работа добавок в составе цементного камня.

Производство бетонов, обладающих высокой скоростью твердения, не осуществимо без использования модифицирующих добавок. Сегодня науке известен большой список химических компонентов, предназначенных для этих целей:  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CaCl}_2$  и др. Чаще всего производители добавок дают неполную информацию о них, что значительно осложняет работу по определению их воздействия на материалы и изделия. Из-за этого в ходе исследований бывает затруднительно определить степень влияния тех или иных компонентов добавок на арматуру и бетон, например в случаях содержания в добавках хлоридов ( $\text{CaCl}_2$  и  $\text{NaCl}$ ). Данные компоненты в составе добавок оказывают агрессивное коррозионное воздействие на арматуру. Нейтрализация этого негативного фактора – весьма актуальная задача [1–5].

### Анализ влияния компонентов добавки на характеристики цементного камня

Экспериментальные исследования свойств различных химических соединений и определение их воздействий требуют значительных ресурсов. Зачастую создание комплексов химических соединений, являющихся объектами исследования, – довольно сложный процесс, чтобы за короткое время выполнить его теоретический анализ. Поэтому для уменьшения количества экспериментов и ускорения их проведения при определении совокупного влияния

добавок на свойства цементного камня используют методы планирования эксперимента. Они позволяют создать достаточно точную, учитывающую одновременно все факторы математическую модель поведения добавки в составе бетона. На основе этой модели можно получать данные о взаимодействии компонентов, а также их количественную оценку.

В статье рассматривается метод симплекс-решетчатого планирования для разработки универсального состава на основе карбоната натрия  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , хлорида натрия  $\text{NaCl}$ , нитрата натрия  $\text{NaNO}_3$  путем затворения данных компонентов с портландцементом. С помощью данного метода установили целесообразный порядок проведения исследований, а также комплексное влияние добавок на свойства цементного камня и необходимую точность результатов расчетов [6–10].

При проведении исследований для получения цементного камня использовали портландцемент М500 Д0 с добавлением определенного количества компонентов  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaCl}$  и  $\text{NaNO}_3$  (табл. 1). Образцы формировали следующим образом: подготавливали раствор на основе дистиллированной воды массой 20 г с добавлением  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaCl}$  и  $\text{NaNO}_3$  в установленных пропорциях (совокупная масса составляла 0,50 г). Затем раствором затворяли 50 г портландцемента с последующим перемешиванием, полученную массу заливали в подготовленные формы и помещали на виброплощадку. В табл. 1 представлены матрица симплекс-решетчатого планирования и значения твердости образца в возрасте 7 и 28 сут. Всего экспериментальных точек – 15, которые распределяли согласно матрице  $\{3, 4\}$ , что соответствует модели четвертого порядка.

В ходе экспериментов устанавливали: сроки схватывания, водопоглощение, нормальную плотность цементного теста, твердость образцов в возрасте 3, 7, 14 и 28 сут., открытую пористость и интенсивность испарения воды для вяжущего с комплексом добавок. Твердость образца определяли как величину углубления индентора на конце измерительного щупа в тело образца под постоянной нагрузкой 3 кг. Показания снимали со шкалы индикатора часового типа, закрепленного на штативе. Индентор – игла с углом при вершине  $30^\circ$  (цена деления 0,01 мм). При испытаниях каждую добавку ( $X_1$  –  $\text{NaNO}_3$ ;  $X_2$  –  $\text{NaCl}$ ;  $X_3$  –  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) брали в концентрации 0,25–1,00 %.

Матрица симплекс-решетчатого планирования эксперимента  
Matrix of simplex-lattice experiment planning

Число точек	Масса компонентов, г			Доля компонентов			Твердость образца (глубина проникновения индентора), мм	
	NaNO <sub>3</sub>	NaCl	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	7 сут.	28 сут.
1	0,500	0	0	1	0	0	0,116	0,079
2	0	0,500	0	0	1	0	0,103	0,060
3	0	0	0,500	0	0	1	0,138	0,077
4	0,250	0,250	0	0,50	0,50	0	0,115	0,068
5	0,250	0	0,250	0,50	0	0,50	0,128	0,066
6	0	0,250	0,250	0	0,50	0,50	0,132	0,088
7	0,875	0,125	0	0,75	0,25	0	0,107	0,060
8	0,125	0,875	0	0,25	0,75	0	0,123	0,077
9	0,875	0	0,125	0,75	0	0,25	0,110	0,096
10	0,125	0	0,875	0,25	0	0,75	0,112	0,070
11	0	0,875	0,125	0	0,75	0,25	0,135	0,093
12	0	0,125	0,875	0	0,25	0,75	0,177	0,106
13	0,250	0,125	0,125	0,50	0,25	0,25	0,127	0,080
14	0,125	0,250	0,125	0,25	0,50	0,25	0,114	0,069
15	0,125	0,125	0,250	0,25	0,25	0,50	0,129	0,078

Исследуемые свойства можно представить в виде полинома определенной степени  $n$  от  $g$  переменных (числа экспериментальных точек). В качестве  $g$  переменных выступали концентрации компонентов смеси. В совокупности  $g$  и  $n$  образуют решетку, где число коэффициентов полинома равно числу экспериментальных точек. Обязательное условие метода симплекс-решетчатого планирования таково: если  $X_i$  – концентрация компонентов смеси в кодированных значениях исследуемых факторов ( $X_j = 0-1$ ), то  $\sum X_i = 1$  [6–10]. На основании данных табл. 1 по формулам расчета коэффициентов полинома четвертого порядка для трехкомпонентной смеси были получены уравнения регрессии, отражающие влияние комплекса добавок NaNO<sub>3</sub>–NaCl–Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> на прочность вяжущего через 7 и 28 сут. соответственно:

$$Y_7 = 11,6X_1 + 10,3X_2 + 13,8X_3 + 2,2X_1X_2 + 0,4X_1X_3 + 4,6X_2X_3 - 12X_1X_2(X_1 - X_2) + 4,8X_1X_3(X_1 - X_3) - 13,07X_2X_3(X_2 - X_3) + 2,93X_1X_2(X_1 - X_2)^2 - 35,7X_1X_3(X_1 - X_3)^2 + 57,3X_2X_3(X_2 - X_3)^2 + 137,87X_1^2X_2X_3 - 138,13X_1X_2^2X_3 - 42,4X_1X_2X_3^2; \quad (1)$$

$$Y_{28} = 7,9X_1 + 6X_2 + 7,7X_3 - 0,6X_1X_2 - 4,8X_1X_3 + 7,8X_2X_3 - 14,13X_1X_2(X_1 - X_2) + 13,3X_1X_3(X_1 - X_3) - 2,4X_2X_3(X_2 - X_3) + 0,27X_1X_2(X_1 - X_2)^2 + 29,87X_1X_3(X_1 - X_3)^2 + 34,93X_2X_3(X_2 - X_3)^2 + 98,4X_1^2X_2X_3 - 137,6X_1X_2^2X_3 + 17,87X_1X_2X_3^2. \quad (2)$$

По уравнениям (1), (2) и данным табл. 1 для твердости образцов в возрасте 7 и 28 сут. построены трехкомпонентные диаграммы (рис. 1, 2) в программе Simplex, разработанной доктором технических наук, профессором кафедры «Строительные технологии и конструкции» Белорусского государственного университета транспорта А. С. Неверовым. Изолинии на диаграммах показывают изменение твердости образца в зависимости от концентрации каждой из добавок.

В возрасте 7 сут. наблюдались две оптимальные зоны, которые были локализованы в следующих концентрациях компонентов:

1) NaNO<sub>3</sub> – 8–30 %; NaCl – 54–80 %; Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – 18–44 %;

2) NaNO<sub>3</sub> – 58–100 %; NaCl – 0–42 %; Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – 0–28 %.

С течением времени на 28-е сутки первая зона стабильно сохраняла свое положение, а вторая уменьшалась и смещалась к концентрациям со следующим содержанием компонентов: Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – 0–2 %; NaNO<sub>3</sub> – 54–86 %; NaCl – 46–14 %. В данном случае оптимальным многофункциональным составом следует принимать такой, концентрации которого на диаграммах соответствуют первой зоне с содержанием компонентов добавок: Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – 12–42 %; NaNO<sub>3</sub> – 12–38 %; NaCl – 32–60 %.

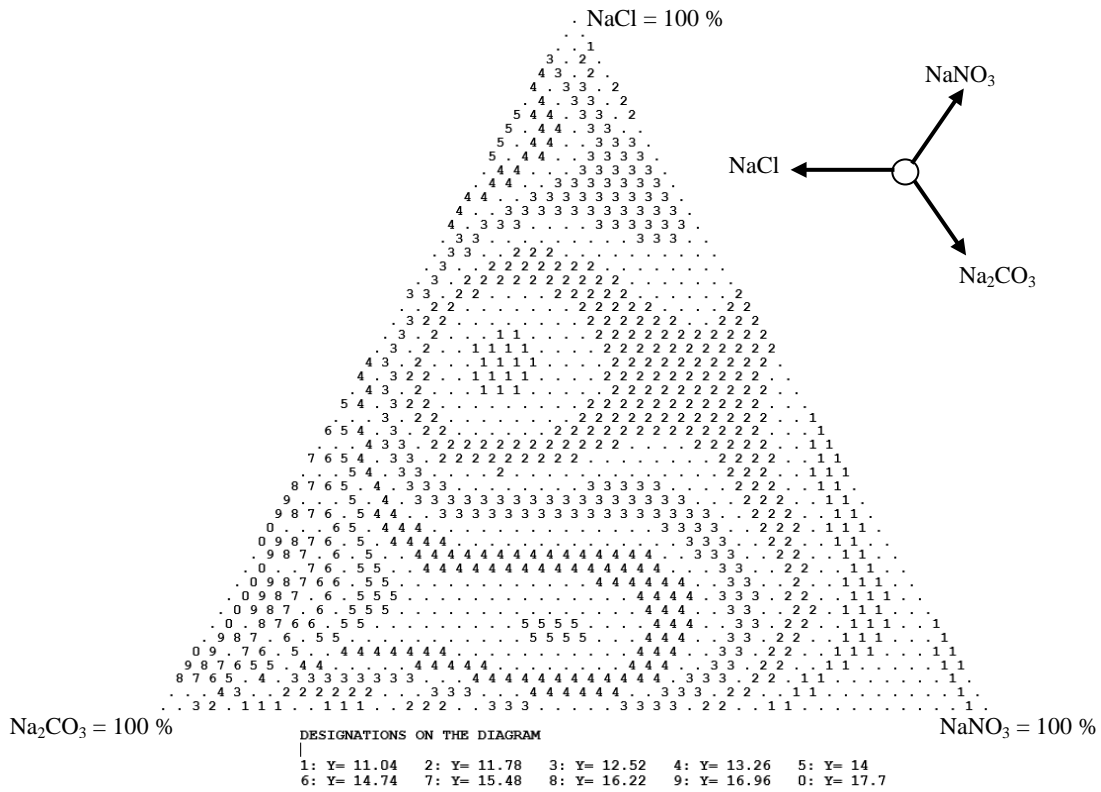


Рис. 1. Зависимость твердости образца через 7 сут. после формования от состава комплексной добавки  
 Fig. 1. Dependence of sample hardness 7 days after molding on composition of complex additive

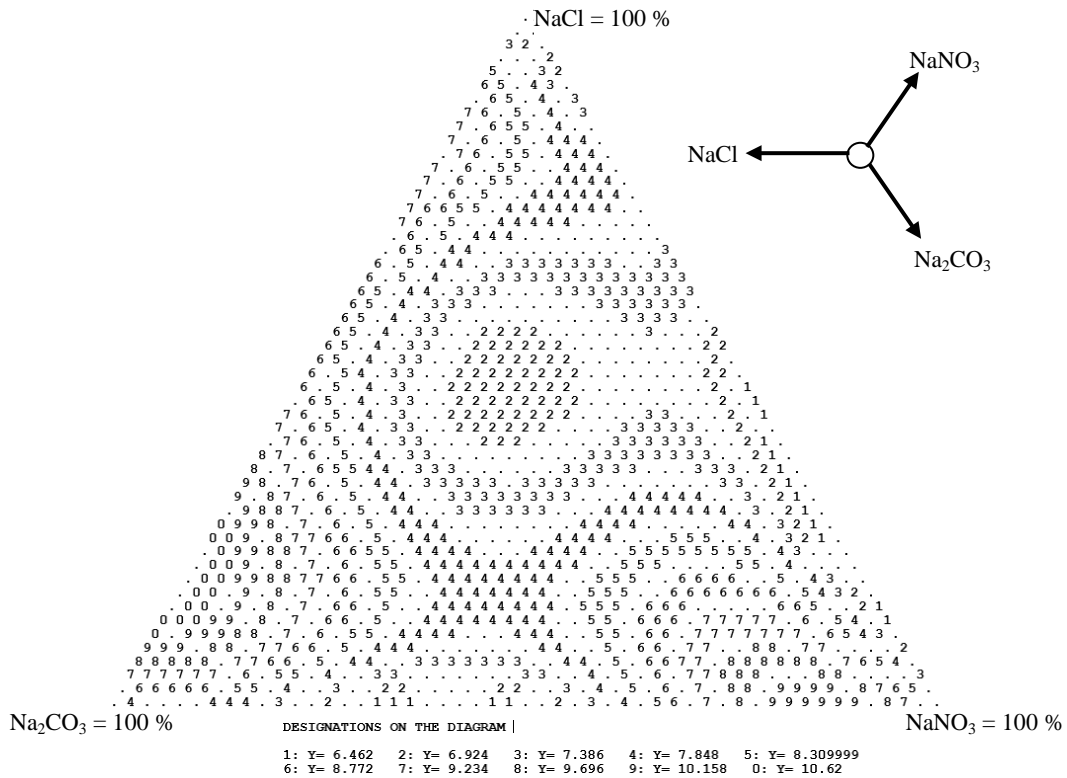


Рис. 2. Зависимость твердости образца через 28 сут. после формования от состава комплексной добавки  
 Fig. 2. Dependence of sample hardness 28 days after molding on composition of complex additive

Изменение скорости коррозии металла в растворе солей (1 г солей на 1 л воды) определяли с помощью коррозиметра «Эксперт-004», щупы которого помещали в жидкую среду добавки. Затем с прибора снимали показания и обрабатывали способом, описанным выше для определения твердости. По полученным данным строили диаграмму, приведенную на рис. 3.

Как видно из рис. 3, прослеживается эффект замедления коррозии при определенных концентрациях компонентов. Исходя из оценки их совместной работы в составе комплекса, удовлетворительными приняты следующие концентрации:  $\text{NaNO}_3$  – 0–72 %;  $\text{NaCl}$  – 0–54 %;  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  – 14–100 %.

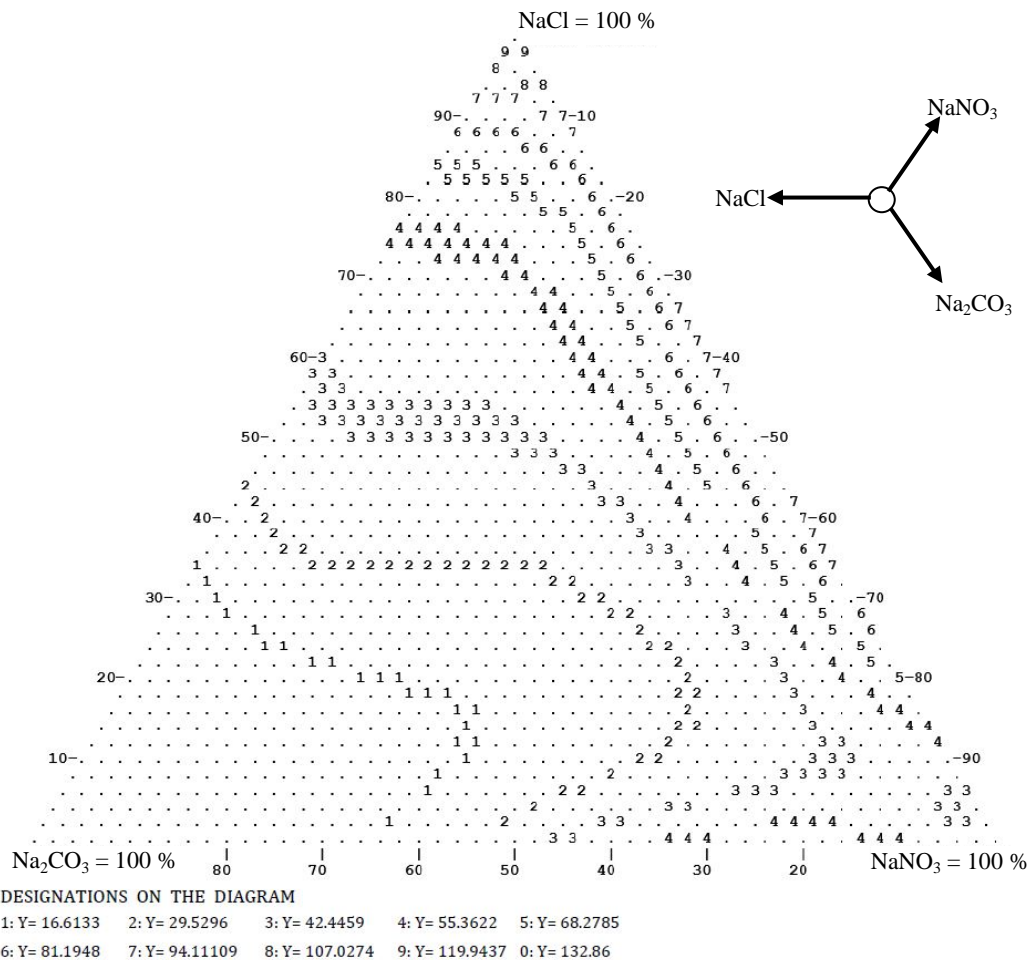


Рис. 3. Показатель коррозии (μм/год) в растворе солей  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{NaCl}$  и  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  в зависимости от состава раствора  
Fig. 3. Corrosion index (μm/year) in solution of  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{NaCl}$  and  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  salts, depending on composition of solution

## ВЫВОД

Исследованиями установлено, что оптимальными являются следующие доли компонентов в составе комплекса добавки:  $\text{NaNO}_3$  – 12–38 %;  $\text{NaCl}$  – 34–54 %;  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  – 26–42 %. Добавление данного состава в бетонную смесь положительно влияло на ее физико-механические свойства: наблюдались положительная динамика в нейтрализации коррозионного воз-

действия на арматуру в бетоне, а также ускоренный набор твердости бетоном.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Баженов, Ю. М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю. М. Баженов, В. С. Демьянова, В. И. Калашников. М.: Изд-во АСВ, 2006. 368 с.
2. Изотов, В. С. Химические добавки для модификации бетона / В. С. Изотов. М.: Казанский гос. архит.-строит. ун-т: Палеотип, 2006. 244 с.

3. Ибрагимов, Р. А. Использование сульфатно-содовой смеси в качестве ускорителя твердения в технологии тяжелого бетона / Р. А. Ибрагимов, В. С. Изотов, Р. Х. Хузиахметов // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, № 9. С. 167–170.
4. Тараканов, О. В. Химические добавки в растворы и бетоны / О. В. Тараканов. Пенза: Пензен. гос. ун-т архит. и стр-ва, 2016. 155 с.
5. Перцев, В. Т. Комплексные органоминеральные добавки для бетонов / В. Т. Перцев, А. А. Леденев, Я. З. Халилбеков // Символ науки. 2017. № 04-2. С. 89–91.
6. Ахназарова, С. Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. М.: Высш. шк., 1978. 319 с.
7. Калиногорский, Н. А. Планирование эксперимента при изучении диаграмм состав – свойство / Н. А. Калиногорский. Новокузнецк: СибГИУ, 2011. 12 с.
8. Зедгендзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Г. Зедгендзе. М.: Наука, 1976. 390 с.
9. Хамханов, К. М. Основы планирования эксперимента / К. М. Хамханов. Улан-Удэ: Вост.-Сиб. гос. ун-т техн. и управл., 2001. 50 с.
10. Юдин, Ю. В. Организация и математическое планирование эксперимента / Ю. В. Юдин, М. В. Майсурадзе, Ф. В. Водолазский. Екатеринбург: Урал. федар. ун-т, 2018. 124 с.

Поступила 28.04.2021

Подписана в печать 06.07.2021

Опубликована онлайн 28.01.2022

#### REFERENCES

1. Bazhenov Yu. M., Demyanova V. S., Kalashnikov V. I. (2006) *Modified High-Quality Concrete*. Moscow, ASV Publ., 2006. 368 (in Russian).

2. Izotov V. S. (2006) *Chemical Additives for Concrete Modification*. Moscow, Kazan State University of Architecture and Engineering, Publishing House "Paleotip". 244 (in Russian).
3. Ibragimov R. A., Izotov V. S., Khuziakhmetov R. Kh. (2015) The Use of Sulfate-Soda Mixture as a Hardening Accelerator in Heavy Concrete Technology. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta = Bulletin of the Technological University*, 18 (9), 167–170 (in Russian).
4. Tarakanov O. V. (2016) *Chemical Additives in Solutions and Concretes*. Penza, Publishing House of the Penza State University of Architecture and Construction. 155 (in Russian).
5. Pertsev V. T., Ledenev A. A., Khalilbekov Ya. Z. (2017) Complex Organic Mineral Additives for Concrete. *Simvol Nauki = Symbol of Science*, (04-2), 89–91 (in Russian).
6. Akhnazarova S. L., Kafarov V. V. (1978) *Optimization of Experiment in Chemistry and Chemical Technology*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 319 (in Russian).
7. Kalinogorskiy N. A. (2011) *Planning an Experiment when Studying Composition-Property Diagrams*. Novokuznetsk, Publishing Centre of Siberian State Industrial University. 12 (in Russian).
8. Zedgenidze I. G. (1976) *Planning an Experiment for the Study of Multicomponent Systems*. Moscow, Nauka Publ. 390 (in Russian).
9. Khamkhanov K. M. (2001) *Experiment Planning Fundamentals*. Ulan-Ude: East Siberia State University of Technology and Management. 50 (in Russian).
10. Yudin Yu. V., Maisuradze M. V., Vodolazsky F. V. (2018) *Organization and Mathematical Planning of the Experiment*. Yekaterinburg, Publishing House Ural Federal University. 124 (in Russian).

Received: 28.04.2021

Accepted: 06.07.2021

Published online: 28.01.2022