

УДК 691.327:666.97-16

Г.С. СЛАВЧЕВА

## ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ В ДИАПАЗОНЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ВЛАЖНОСТИ

Рассмотрены закономерности влияния влажности на прочность и деформацию высокопрочных модифицированных бетонов. Показано, что основное снижение прочности модифицированных бетонов в эксплуатационных условиях происходит при изменении влажности в гигроскопическом диапазоне влагосодержания, а коэффициенты линейного деформирования при изменении влажности имеют в 1,5–4,5 раза более высокие значения по сравнению с традиционными тяжелыми бетонами. Предложено при расчете конструкций из высокопрочных бетонов отнести фактор влажности к постоянным воздействиям и учитывать влажностные напряжения от усадки и набухания в расчетах конструкций во всем диапазоне влажностных режимов их эксплуатации.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** высокопрочные модифицированные бетоны, эксплуатационная влажность, прочность, усадка, набухание.

DOI 10.32683/0536-1052-2020-740-8-62-69

**Введение.** Сформировавшаяся общая тенденция совершенствования свойств бетонов путем перехода от грубодисперсных к микродисперсным структурам явилась предпосылкой кардинальных изменений в уровне их качества. В частности, наиболее эффективным способом регулирования свойств при создании нового поколения высокопрочных бетонов высоких НРС и ультравысоких УНРС технологий (High Performance Concrete и Ultra High Performance Concrete) считается комплексное модифицирование их структуры микро- и нанодисперсными органоминеральными модификаторами. Активное развитие исследований позволило получить достаточно широкую номенклатуру эффективных составов высокопрочных модифицированных бетонов. Для их получения, как правило, используются низкие В/Ц отношения (0,2–0,3), эффективные пластификаторы, ультрадисперсные наполнители (микро- и нанокремнезем, метакаолин и т.д.), позволяющие формировать высокоплотную и прочную структуру данных бетонов и соответственно их уникальные свойства.

С использованием высокопрочных бетонов нового поколения в различных регионах России внедрены в практику новые технологии возведения железобетонных конструкций для уникальных сооружений гражданского, промышленного и транспортного строительства. Как известно, реализация одного из наиболее амбициозных проектов (строительство ММДЦ «Москва-Сити») основана именно на использовании высококачественных бетонов с органоминеральными модификаторами типа МБ на основе микрокремнезема и суперпластификатора [1].

© Славчева Г.С., 2020

Несмотря на большой опыт производства высокопрочных модифицированных бетонов, особенности их состава и структуры определяют, с одной стороны, эффективность в строительстве, а с другой – требуют особого подхода к учету поведения данных бетонов при эксплуатации. Отечественный и зарубежный опыт исследований показал [2–11], что, в частности, процесс влажностной усадки высокопрочных бетонов имеет отличия по сравнению с развитием усадки традиционных бетонов. В результате однозначно установлено, что высокоплотная тонкодисперсная структура бетонов нового поколения, достигаемая вследствие их модифицирования, определяет особенности развития влажностных деформаций. Поэтому можно прогнозировать, что при влажностных эксплуатационных воздействиях изменение всех конструктивных свойств, а не только развитие деформаций, может иметь весьма существенные особенности по сравнению с бетонами традиционными.

В связи с этим выявление данных особенностей – актуальная проблема, с точки зрения задач обеспечения надежной работы современных бетонов в конструкциях, возможности решения прикладных задач, связанных с их производством, применением и контролем качества.

В данной публикации рассматриваются прикладные вопросы использования результатов исследований изменения свойств современных высокопрочных бетонов при температурно-влажностных эксплуатационных воздействиях. Комплексные исследования [12–15] были реализованы для бетонов классов по прочности В80, В90 на мелком и крупном заполнителе при использовании составов, массово применяемых в современном строительстве [16].

**Особенности изменения прочности в диапазоне эксплуатационной влажности.** Согласно СП 63.13330.2018 при определении нормативных сопротивлений бетона в перечне факторов, обуславливающих введение  $i$ -го коэффициента условий работы, фактор влажности как постоянно действующий в расчетах конструкций из плотных бетонов не рассматривается. И это является закономерным, так как значение данного коэффициента определяется мерой снижения прочностных характеристик материала при увлажнении. Для плотных цементных бетонов величина данного коэффициента обычно составляет  $K_p \approx 0,8–0,95$  во всем диапазоне изменения его влажностного состояния от гигроскопического до водонасыщенного; максимальное размягчение бетона до  $K_p \approx 0,8$  возможно только при его полном водонасыщении. В реальных условиях возведения и работы сооружений исключается как маловероятная возможность полного водонасыщения сразу после одновременного приложения всей нагрузки. Поэтому признается целесообразным учитывать понижение прочности бетона, водонасыщаемого в загруженном состоянии, назначением  $\gamma_{br} = 0,8$  только при учете кратковременных воздействий при высокой скорости его водонасыщения.

На основании обобщения ранее полученных экспериментальных данных [12, 13] установлено, что для высокопрочных модифицированных бетонов характерно более значительное снижение их прочностных характеристик при увлажнении, чем для классических бетонов. Коэффициент размягчения в диапазоне температур  $0–+60^\circ\text{C}$  оценивается величинами  $0,7–0,76$  (табл. 1). При этом мера снижения прочности возрастает при увеличении удельной

Таблица 1. Снижение прочности модифицированных бетонов классов В80, В90 в водонасыщенном состоянии с учетом температуры [12]

| Температура | Бетон на заполнителе |           |
|-------------|----------------------|-----------|
|             | мелком               | крупном   |
| 0           | 0,78±0,02            | 0,82±0,03 |
| 20          | 0,76±0,02            | 0,75±0,03 |
| 40          | 0,72±0,02            | 0,75±0,03 |
| 60          | 0,70±0,02            | 0,74±0,03 |

поверхностной энергии твердой фазы и уменьшении среднего эффективного радиуса пор, что соотносится с повышением содержания микродисперсных компонентов в составе бетона.

Зафиксированное снижение прочности имеет значение не только для работы модифицированных бетонов в водонасыщенном состоянии, но и во всем диапазоне эксплуатационной влажности. Одновременно важно и то обстоятельство, что равновесная гигроскопическая влажность при определенных значениях влажности эксплуатационной среды для модифицированных бетонов может быть равна и даже выше их влагосодержания, достигаемого в результате водонасыщения. Понижение прочности модифицированных бетонов (рис. 1, табл. 2) наиболее значительно при изменении их влажности в диапазоне от 1 до 2,5 %, т.е. в диапазоне равновесной эксплуатационной влажности. При содержании в структуре бетона преимущественно капиллярной воды (2,5–5,0 %) прочность под действием сил капиллярного стяжения несколько повышается, а при дальнейшем водонасыщении вновь уменьшается. Таким образом, основное снижение прочности модифицированных бетонов в эксплуатационных условиях может происходить при изменении влажности в гигроскопическом диапазоне влагосодержания.

Поэтому логично учесть возможное понижение прочности модифицированных бетонов не только при водонасыщении, но и при изменении их влагосодержания в эксплуатационном диапазоне. Условия же эксплуатации высокопрочных модифицированных бетонов под водой, при влажности воздуха окружающей среды выше

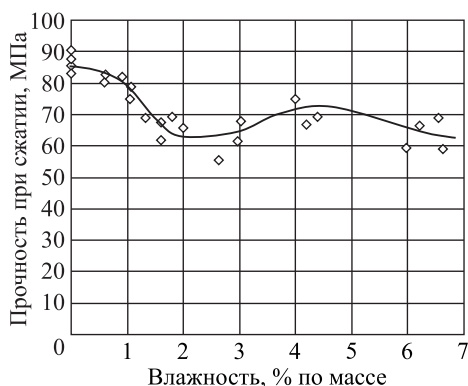


Рис. 1. Обобщенные данные о зависимости прочности модифицированных бетонов от влажности [12]

Таблица 2. Мера снижения прочности модифицированных бетонов классов В80, В90 в зависимости от их влажности [12]

| Диапазон влагосодержания бетона, % | Коэффициент размягчения $K_p = R_{сух} / R_{в}$ |
|------------------------------------|---|
| 1–1,5                              | 0,88±0,05                                       |
| 1,5–2,5                            | 0,70±0,05                                       |
| 2,5–5,0                            | 0,82±0,05                                       |
| >5,0                               | 0,70±0,05                                       |

Таблица 3. Величина влажностных деформаций высокопрочных модифицированных бетонов классов В80, В90 [14, 15]

| Относительные деформации              | Бетон на заполнителе | В среде с относительной влажностью воздуха, % |       |       |       | При контакте с водой | Под водой |
|---------------------------------------|----------------------|---|-------|-------|-------|----------------------|-----------|
|                                       |                      | 30–35   | 50–55 | 70–75 | ≈100  |                      |           |
| Усадка $\varepsilon_y \times 10^5$    | мелком               | 75–90   | 55–70 | 30–40 | –     | –                    | –         |
|                                       | крупном              | 70–80   | 50–65 | 25–35 | –     | –                    | –         |
| Набухание $\varepsilon_n \times 10^5$ | мелком               | –   | 50–60 | 60–80 | 80–90 | 60–70                | 60–70     |
|                                       | крупном              | –   | 10–15 | 30–40 | 35–45 | 30–40                | 30–40     |

75 %, вероятно, можно не рассматривать в качестве факторов, способствующих нарастанию прочности. При определении расчетных сопротивлений высокопрочных бетонов представляется целесообразным рассмотреть вопрос введения  $i$ -го коэффициента условий работы с учетом фактора влажности, отнеся его к постоянным воздействиям.

**Особенности развития влажностных деформаций.** Согласно обобщению полученных ранее данных [12, 14, 15], принципиально значим тот факт, что существенно изменяются не абсолютные значения деформаций набухания-усадки высокопрочных бетонов по сравнению с традиционными, а мера деформирования на единицу изменения относительной влажности (табл. 3). Комплексными критериями оценки деформативности являются коэффициенты линейной усадки  $\beta$  и набухания  $\eta$ .

Нами показано, что при изменении влажности модифицированных бетонов классов В80, В90 величина данных коэффициентов может быть при развитии усадки в 1,5 раза (рис. 2), а при набухании в 4–5 раз выше (рис. 3), чем у обычного бетона. Так, величина средних значений коэффициентов линейного деформирования традиционных бетонов, установленных еще в середине 80-х гг. XX в., составляет  $\beta = 2 \cdot 10^{-2}$  (мм/мм)/(г/г);  $\eta = 5 \cdot 10^{-3}$  (мм/мм)/(г/г). Значения же коэффициентов линейного деформирования для высокопрочных модифицированных бетонов существенно выше:

$$\beta = 3,5 \cdot 10^{-2} \text{ (мм/мм)/(г/г) при обезвоживании и развитии усадки;}$$

$$\eta = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ (мм/мм)/(г/г) при увлажнении и развитии набухания.}$$

Одновременно возрастание влажностных напряжений закономерно связано с более высокими значениями модуля упругости высокопрочных бетонов ( $42 \cdot 10^3 - 47 \cdot 10^3$  МПа для бетонов классов В60–В80) по отношению к их величине для обычных классических бетонов классов В20–В40 ( $25 \cdot 10^3 - 35 \cdot 10^3$  МПа). Поэтому весьма вероятно, что увлажнение–высыхание в эксплуатационном диапазоне изменения влагосодержания может сопровождаться существенным увеличением уровня напряжений в конструкциях из данных видов бетонов. В связи с этим, если не были предусмотрены меры по блокированию влагообмена бетона со средой, для высокопрочных модифицированных бетонов представляется целесообразным учитывать влажностные напряжения от усадки и набухания в расчетах конструкций во всем диапазоне влажностных режимов их эксплуатации: под водой, при периодическом контакте с водой, при влажности воздуха окружающей среды 30–100 %.

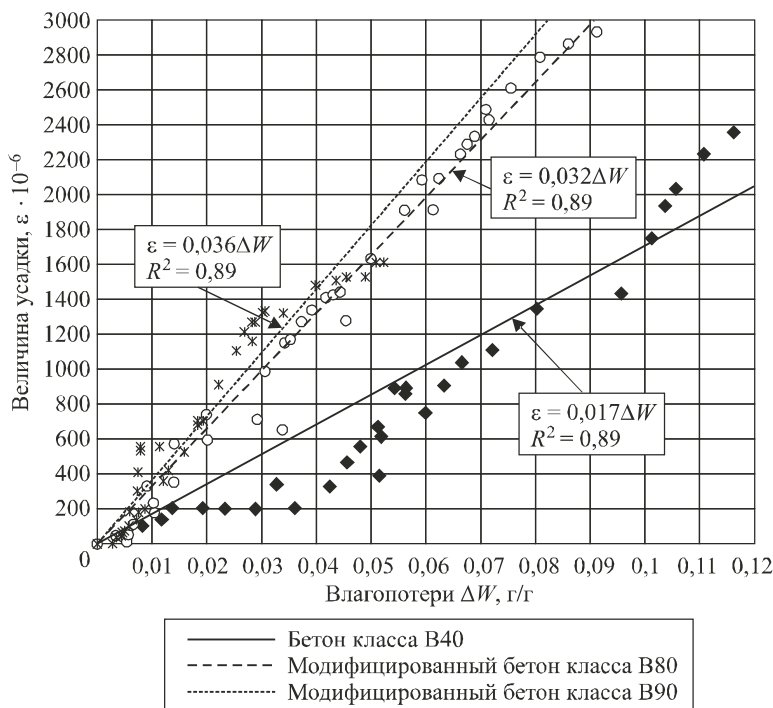


Рис. 2. Обобщенные данные о зависимости величины усадки бетонов от влагопотерь при обезвоживании

**Выводы.** 1. Коэффициент размягчения модифицированных бетонов нового поколения составляет  $K_p = 0,72-0,85$  при  $t = (+60-0)^\circ\text{C}$ . Влияние влажности на прочность данных бетонов более значительно, чем для традиционных бетонов. Представляется целесообразным рассмотреть вопрос введения  $i$ -го коэффициента условий работы с учетом фактора влажности, отнеся его к постоянным воздействиям.

2. Для высокопрочных модифицированных бетонов характерны в 1,5–4,5 раза более высокие величины удельных влажностных деформаций усад-

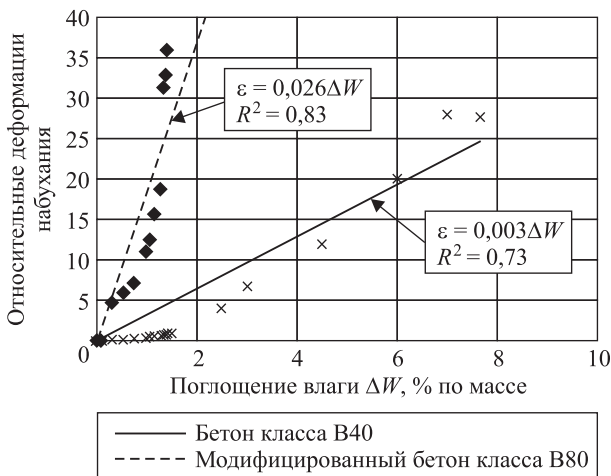


Рис. 3. Обобщенные данные о зависимости величины набухания бетонов от поглощения влаги

ки-набухания на 1 % изменения влажности по сравнению с традиционными плотными бетонами. В результате уровень напряжений в конструкциях из высокопрочных бетонов может существенно возрасти даже при незначительном изменении их эксплуатационного влагосодержания. В связи с этим необходимо учитывать влажностные напряжения от усадки и набухания в расчетах конструкций во всем диапазоне влажностных режимов их эксплуатации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Аль-омаис Д., Зайцев А.С. Опыт производства и контроля качества высокопрочных бетонов на строительстве высотного комплекса «ОКО» в ММДЦ «МОСКВА-СИТИ» // Пром. и гражд. стр-во. 2018. № 1. С. 18–24.
2. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В. Некоторые особенности механизма действия органоминеральных модификаторов на цементные системы // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 1. С. 40–46.
3. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Карпенко Н.И., Кузнецов Н.И. Влияние органоминерального модификатора МБ-50С на структуру и деформативность цементного камня и высокопрочного бетона // Бетон и железобетон. 2003. № 3. С. 2–7.
4. Zhang J., Hou D., Gao Y. Integrative studies on autogenous and drying shrinkages of concrete at early-age // Advances in Structural Engineering. 2012. Vol. 15, No. 7. P. 1041–1051.
5. Barluenga G., Palomar I., Puentes J. Early age and hardened performance of cement pastes combining mineral additions // Materials and Structures Materiaux et Constructions. 2013. Vol. 46, No. 6. P. 921–941.
6. Sugie A.M. Numerical study on drying shrinkage of concrete affected by aggregate size // Journal of Advanced Concrete Technology. 2014. Vol. 12, No. 8. P. 279–288.
7. Gelardi G., Flatt R.J. Working mechanisms of water reducers and superplasticizers // Science and Technology of Concrete Admixtures. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. Chapter 11. P. 257–278.
8. Khatib J.M. Performance of self-compacting concrete containing fly ash // Construction and Building Materials. 2008. Vol. 22, No. 9. P. 1963–1971.
9. Garci Juenger M.C., Jennings H.M. Examining the relationship between the microstructure of calcium silicate hydrate and drying shrinkage of cement pastes // Cement and Concrete Research. 2002. Vol. 32, No. 2. P. 289–296.
10. Lim N.G. A foundational study on properties of high-strength concrete using nano slag by silica fume replacement // Journal of the Korea Institute of Architecture. 2008. Vol. 52, No. 12. P. 23–29.
11. Her J., Lim N. Physical and chemical properties of nano-slag mixed mortar // Journal of the Korea Institute of Building Construction. 2010. Vol. 10, No. 6. P. 145–154.
12. Славчева Г.С. Структура высокотехнологичных бетонов и закономерности проявления их свойств при эксплуатационных влажностных воздействиях: Дис. .... д-ра техн. наук. Воронеж, 2009. 467 с.
13. Славчева Г.С. Влияние температурно-влажностного состояния на закономерности изменения показателей сопротивления разрушению бетонов // Вестник гражданских инженеров. 2010. № 1. С. 12–14.
14. Славчева Г.С., Чемоданова С.Н. Новое поколение высокопрочных модифицированных бетонов: отличительные признаки структуры и закономерности развития деформаций // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. 2011. № 2. С. 58–67.



15. Славчева Г.С., Чемоданова С.Н. Влияние параметров структуры на влажностные деформации высокопрочных модифицированных бетонов // Строительные материалы. 2011. № 8. С. 32–34.
16. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Чилин И.А. О подборе составов высококачественных бетонов с органоминеральными модификаторами // Строительные материалы. 2017. № 12. С. 58–63.

**Славчева Галина Станиславовна**, д-р техн. наук, проф.  
Воронежский государственный технический университет

Получено 17.07.2020

**Slavcheva Galina Stanislavovna**, DSc, Professor  
Voronezh State Technical University, Russia

### **FEATURES OF STRENGTH AND DEFORMATIVE CHARACTERISTICS CHANGE OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE IN THE OPERATIONAL HUMIDITY RANGE**

Regularities of the moisture influence on the strength and deformation of high performance concrete are considered. It is shown that the main decrease in the strength of high performance concretes takes place in case a moisture content of these concretes has changed in the hygroscopic range. At the same time, the coefficient of linear drying shrinkage and wet swelling under the change of moisture content are 1,5–4,5 times higher than these coefficients of traditional concretes. It is proposed to attribute the moisture factor as a permanent working factor and to take into account the moisture stresses from shrinkage and swelling in the all humidity operation range in the calculations of structures.

**Key words:** high performance concrete, humidity, strength, drying shrinkage, wet swelling.

#### REFERENCES

1. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Al-omais D., Zaytsev A.S. Opyt proizvodstva i kontrolya kachestva vysokopochnykh betonov na stroitel'stve vysotnogo kompleksa «OKO» v MMDTs «MOSKVA-SITI» [Experience in the production and quality control of high-strength concrete at the construction of the high-rise complex «OKO» in the Moscow International Business Center «MOSCOW-CITY»]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and civil construction]. 2018. No. 1. Pp. 18–24. (in Russian)
2. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V. Nekotorye osobennosti mekhanizma deystviya organomineral'nykh modifikatorov na tsementnye sistemy [Some features of the mechanism of action of organo-mineral modifiers on cement systems]. Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy [Earthquake resistant construction. Safety of structures]. 2017. No. 1. Pp. 40–46. (in Russian)
3. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Karpenko N.I., Kuznetsov N.I. Vliyanie organomineral'nogo modifikatora MB-50S na strukturu i deformativnost' tsementnogo kamnya i vysokopochnogo betona [Influence of organomineral modifier MB-50S on the structure and deformability of cement stone and high-strength concrete]. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 2003. No. 3. Pp. 2–7. (in Russian)
4. Zhang J., Hou D., Gao Y. Integrative studies on autogenous and drying shrinkages of concrete at early-age. Advances in Structural Engineering. 2012. Vol. 15, No. 7. Pp. 1041–1051.

5. *Barluenga G., Palomar I., Puentes J.* Early age and hardened performance of cement pastes combining mineral additions. *Materials and Structures Materiaux et Constructions*. 2013. Vol. 46, No. 6. Pp. 921–941.
6. *Sugie A.M.* Numerical study on drying shrinkage of concrete affected by aggregate size. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2014. Vol. 12, No. 8. Pp. 279–288.
7. *Gelardi G., Flatt R.J.* Working mechanisms of water reducers and superplasticizers. *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. Chapter 11. Pp. 257–278.
8. *Khatib J.M.* Performance of self-compacting concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22, No. 9. Pp. 1963–1971.
9. *Garci Juenger M.C., Jennings H.M.* Examining the relationship between the microstructure of calcium silicate hydrate and drying shrinkage of cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2002. Vol. 32, No. 2. Pp. 289–296.
10. *Lim N.G.* A foundational study on properties of high-strength concrete using nano slag by silica fume replacement. *Journal of the Korea Institute of Architecture*. 2008. Vol. 52, No. 12. Pp. 23–29.
11. *Her J., Lim N.* Physical and chemical properties of nano-slag mixed mortar. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2010. Vol. 10, No. 6. Pp. 145–154.
12. *Slavcheva G.S.* Структура высокотехнологичных бетонов и закономерности проявления их свойств при эксплуатационных влажностных воздействиях: Дис. доктора технических наук [The structure of high-tech concretes and the regularities of the manifestation of their properties under operational humidity influences. dis.... doct. tech. sciences]. Voronezh, 2009. 467 p. (in Russian)
13. *Slavcheva G.S.* Влияние температурно-влажностного состояния на закономерности изменения показателей сопротивления разрушению бетонов [Influence of temperature and humidity state on the regularities of changes in indicators of resistance to destruction of concrete]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of civil engineers]. 2010. No. 1. Pp. 12–14. (in Russian)
14. *Slavcheva G.S., Chemodanova S.N.* Новое поколение высокопрочных модифицированных бетонов: отличительные признаки структуры и закономерности развития деформаций [A new generation of high-strength modified concretes: distinctive features of the structure and regularities of the development of deformations]. *Nauchnyy vestnik VGASU. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of VGASU. Construction and architecture]. 2011. No. 2. Pp. 58–67. (in Russian)
15. *Slavcheva G.S., Chemodanova S.N.* Влияние параметров структуры на влажностные деформации высокопрочных модифицированных бетонов [Influence of structural parameters on moisture deformation of high-strength modified concretes]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials]. 2011. No. 8. Pp. 32–34. (in Russian)
16. *Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Kardumyan G.S., Chilin I.A.* О подборе составов высококачественных бетонов с органоминеральными модификаторами [On the selection of compositions of high-quality concretes with organic-mineral modifiers]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials]. 2017. No. 12. Pp. 58–63. (in Russian)