

## СТРУКТУРНЫЙ ФАКТОР ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОНА

**К.В. Шулдяков, Б.Я. Трофимов, Л.Я. Крамар**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

В настоящее время долговечность бетона нормируется косвенными показателями – качеством используемых материалов, арматуры и добавок, свойствами бетонной смеси и степенью уплотнения её при формировании железобетонных конструкций, длительностью и параметрами ухода за бетоном. В зависимости от среды эксплуатации регламентируется максимально допустимая величина В/Ц, минимально допустимый расход цемента и класс бетона по прочности при сжатии. В ряде случаев ограничивается вид цемента, нормируется воздухововлечение, толщина и плотность защитного слоя бетона и др. При эксплуатации железобетонных конструкций в агрессивных средах определяется причина и степень агрессивных условий и проектируется первичная, вторичная и специальная защита. Если конструкция эксплуатируется без вторичной защиты, то чаще всего результирующим критерием долговечности бетона принимается его марка по морозостойкости, которая определяется микроструктурой гидратных фаз цемента.

*Ключевые слова: долговечность, морозостойкость, пористость, структура, тяжелый бетон.*

Для климатических условий Российской Федерации одним из основных показателей долговечности бетона является его морозостойкость [1]. Основными параметрами морозостойкости бетона являются открытая капиллярная пористость, легко заполняемая водой, переходящей в лед при замораживании, и резервная пористость за счет воздухововлечения [2]. Не так много внимания уделяется влиянию структуры цементного камня на морозостойкость бетона, хотя и известно, что при естественном твердении сохраняется гелеобразная структура, более стойкая к морозной агрессии, чем более закристаллизованная структура, формирующаяся при пропаривании и автоклавировании. Аморфная структура обычного бетона сохраняется при снижении содержания свободного  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  благодаря пуццоланизации и применению эффективного поликарбонатного пластификатора [3].

Одними из основных направлений научно-технического прогресса при изготовлении железобетона считаются [4–7]: разработка, исследование и совершенствование бетона в части повышения строительно-технических свойств, обеспечивающих экологическую безопасность и гарантированные сроки эксплуатации зданий и сооружений не менее 100 лет.

Основными критериями качества высокофункциональных бетонов являются высокая прочность, морозостойкость, водонепроницаемость, химическая стойкость, низкая диффузионная проницаемость и др. [8].

Наиболее распространёнными причинами повреждения железобетонных конструкций считаются коррозионные процессы, развивающиеся под

влиянием противогололедных препаратов, выбросов предприятий и автотранспорта, содержащих оксиды углерода, азота, серы и др., циклического замораживания, биологической коррозии [9].

По своему воздействию механизмы, ухудшающие долговечность железобетонных изделий, могут быть подразделены [9]:

- физические (увлажнение и высушивание, нагревание и охлаждение, вода и мороз, истирание, износ, кавитация);
- химические (сульфатные растворы, кислоты и кислые газы, магниезиальная и углекислотная коррозия и др.);
- внутренняя коррозия при взаимодействии щелочей цемента и бетона с реакционно-способным заполнителем;
- биологические (микроорганизмы, бактерии и грибы).

Большинство из этих механизмов имеет общую основу, они возникают на поверхности, и их воздействие усиливается за счёт влаги.

Водонепроницаемость цементных бетонов формируется в результате гидратации цемента и зависит главным образом от В/Ц и степени гидратации цемента [10]. Наименее проницаемым компонентом бетона является цементный гель, поверхность гелевых частиц покрыта адсорбированной влагой, размер пор геля не превышает 4 нм, поэтому влага в них может перемещаться только в виде пара. Проницаемость цементного камня в 20–100 раз больше, чем у геля, и увеличивается с возрастанием В/Ц за счёт увеличения объёма макрокапиллярных пор. С увеличением степени гидратации цемента капиллярные поры заполняются

продуктами гидратации, увеличивающими объём твёрдой фазы более чем в 2 раза. Введение активных минеральных добавок позволяет до 1000 раз уменьшить коэффициент фильтрации воды через бетон.

Морозостойкость бетона зависит от следующих факторов:

- капиллярной пористости и степени водонасыщения, то есть от величины В/Ц и степени гидратации цемента [11];

- применения воздуховлекающих добавок [12]. При этом необходимо обеспечить расстояние между капиллярными и воздушными порами (фактор расстояния  $L$  не более 0,25 мм), предотвращающее возникновение гидравлического давления вследствие отжатия части капиллярной влаги в воздушные пустоты [13]. Фактор расстояния увеличивается с добавлением микрокремнезёма в бетон [14]. В [12] автор хотя и говорит о необходимости воздуховлечения, но при этом отмечает, что при В/Ц не более 0,25 оно не является обязательным;

- согласования компонентов бетонной смеси по коэффициентам термического расширения [15];

- условий циклического замораживания и оттаивания – минерализация воды, насыщающей бетон, температура и скорость охлаждения, степень водонасыщения и др.

Основными факторами, влияющими на долговечность бетона, считаются [6, 8, 12]:

- качество исходных материалов, вид и количество вводимых добавок, химический состав воды для затворения и поливки бетона;

- величина В/Ц как способ регулирования плотности, стойкости и прочности бетона;

- агрессивность среды эксплуатации, вызывающая химическое перерождение структурных элементов цементного камня, а также потерю защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре;

- структура цементного камня, формирующего свойства бетона, и её стабильность в реальных условиях эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций.

Из факторов, влияющих на долговечность бетона, в первую очередь следует отметить роль используемых материалов. Для цемента ограничивается содержание алюминатов и алюмоферритов кальция ( $C_3A$ ,  $C_4AF$ ), свободных  $CaO$  и  $MgO$ , щелочей, ионов хлора, иногда ограничивается содержание основного клинкерного минерала – алита ( $C_3S$ ).

Бетон на портландцементе с минеральными добавками ЦЕМ II характеризуется более высокой водостойкостью и коррозионной стойкостью по сравнению с бетоном на портландцементе ЦЕМ I. В [16] показана возможность получения пропаренного бетона высокой морозостойкости на ЦЕМ III. Установлена возможность получения бетона

на шлакопортландцементе с маркой по морозостойкости выше  $F_{2300}$ .

Помимо требований к цементу, нормируется содержание вредных примесей, содержащихся в заполнителях. Основные вредные примеси, снижающие прочность и долговечность бетона: растворимые в щелочах разновидности кремнезема, сульфаты, сульфиды, хлориды, уголь, графит, горючие сланцы; слоистые силикаты (слюды, гидрослюды, хлориты), цеолиты, апатит, нефелин и фосфорит, а также глинистых частиц, глины в комках, повышающих водопотребность бетонной смеси, усадку и ползучесть бетона, что отрицательно сказывается на долговечности бетона. Для крупного заполнителя дополнительно регламентируется содержание зёрен пластинчатой и игловатой формы, содержание зёрен слабых пород, морозостойкость, устойчивость против распада. Оптимальная гранулометрия заполнителей способствует снижению расхода цемента в бетоне, что не только повышает экономическую эффективность бетона, но и увеличивает его долговечность.

По [17] для повышения коррозионной стойкости бетона применяются добавки, повышающие водонепроницаемость и морозостойкость бетона, усиливающие его защитные свойства по отношению к стальной арматуре и повышающие биостойкость.

Активные минеральные добавки связывают гидроксид кальция в гелеобразные низкоосновные гидросиликаты кальция, что благоприятно сказывается на плотности и стойкости бетона к различным видам коррозии. Высокоэффективные минеральные добавки характеризуются аморфным строением и высокой дисперсностью, применяются в комплексе с поликарбоксилатным водоредуцирующим компонентом [18].

В настоящее время получили распространение эфиры поликарбоксилатов, которые прикрепляются к поверхности клинкерного зерна и характеризуются пространственным строением молекул, состоящих из анионной основной цепи и боковых цепей, представленных как анионными функциональными группами, так и гидрофобными, незаряженными полиэфирами [19]. Такое строение молекул способствует более интенсивной диспергации цементных флокулов за счет стерического эффекта и обеспечивает доступ воды к цементным минералам.

Микрокремнезём (МК) – побочный продукт производства кремния или ферросилиция ( $FeSi$ ), получаемый путём восстановления кремнезёма в электрической печи, подобный продукт известен [20, 21] под названием «силикатный дым» и характеризуется высокой пуццолановой активностью. Благодаря пуццоланизации исчезают крупные кристаллы портландита и пустоты между зёрнами цемента заполняются цементным гелем, что снижает проницаемость цементного камня [22].

Капиллярные поры (10 нм – 100 мкм и более) – основной дефект структуры цементного камня, гелевые поры (менее 10 нм) практически непроницаемы для агрессивной среды. С увеличением В/Ц возрастает капиллярная пористость цементного камня и снижается гелевая пористость, усадка при этом практически неизменна. Значит, с ростом В/Ц должна увеличиваться продолжительность ухода за бетоном для повышения степени гидратации цемента и снижения капиллярной пористости.

О необходимости учёта структурных особенностей цементного камня в бетоне при оценке стойкости и долговечности отмечается во многих работах [23–25]. Морозостойкость образцов бетона неизменного состава, твердевших до циклического замораживания в различных условиях, изменяется более чем в 14 раз, тогда как открытая капиллярная пористость меняется незначительно, а льдистость – в 6 раз [26]. Следовательно, для повышения морозостойкости бетона нужно стремиться к получению гелеобразной структуры гидратных фаз цементного камня и повышению гелевой пористости [26–28].

Различаются следующие основные гидратные фазы цементного камня [29]:

1) С–S–Н гель гидросиликатов кальция (ГСК) – игольчатые волокна, собранные в пучки, тоберморитовый гель с отношением  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,8–1,5$ ;

2)  $\text{Ca(OH)}_2$  портландит, хорошо закристаллизован;

3)  $\text{C}_3\text{ACsH}_3$  этрингит (ГСАК-3) хорошо закристаллизован, образует узкие призматические иглы разной длины;

4)  $\text{C}_3\text{ACsH}_{12}$  моносulфоалюминат кальция (ГСАК-1), хорошо закристаллизованные, тонкие гексагональные пластинки;

5) гидросульфферриты кальция аналогичные ГСАК-3 и ГСАК-1;

6)  $\text{C}_3(\text{A,F})\text{H}_6$  гидроалюминаты и гидроферриты кальция, хорошо закристаллизованные гексагональные пластинки.

Старение цементного геля отмечается в [23, 30]:

- чисто клинкерные цементы характеризуются более интенсивным процессом огрубления структуры цементного камня, особенно для быстротвердеющего цемента с повышенным содержанием  $\text{C}_3\text{S}$  и  $\text{C}_3\text{A}$ ;

- пропаривание и запаривание способствует формированию грубодисперсной структуры цементного камня пониженной стойкости и долговечности;

- циклическое замораживание и оттаивание бетона по стандартной процедуре также вызывает интенсификацию процесса старения структуры цементного камня. Пуццоланизация стабилизирует структуру гидратных фаз цементного камня при циклическом замораживании, что способствует повышению долговечности бетона.

### Выводы

1. Важнейший показатель функциональных свойств железобетонных конструкций – долговечность бетона, зависит как от его качественных характеристик, так и от условий эксплуатации.

2. Основные дефекты структуры бетона – капиллярные поры цементного камня, а также открытые капилляры и трещины. При благоприятных условиях проницаемость бетона снижается с уменьшением В/Ц и увеличением продолжительности ухода.

3. В большинстве случаев повышение плотности бетона и применение пуццолановых добавок повышают его стойкость к химической агрессии.

4. В мировой практике мало исследований, связывающих микроструктуру цементного камня в бетоне с его долговечностью. Пуццоланизация способствует повышению стабильности тонкодисперсных гидратных фаз при циклическом замораживании.

### Литература

1. Бойко, В.Г. Зависимость между маркой бетона по морозостойкости и долговечностью конструкций / В.Г. Бойко, С.Ю. Калугин, А.В. Ушеров-Маршак // *Физико-химические процессы в строительном материаловедении: сборник научных трудов по материалам национальной научно-технической конференции с международным участием*. – Новосибирск, 2018. – С. 83–92.

2. Fagerlund, G. Frost Destruction of Concrete – A Study of the Validity of Different Mechanisms / G. Fagerlund // *Nordic Concrete Research*. – 2018. – Vol. 58, issue 1. – P. 35–54.

3. Hardened Cement Paste Microstructure as the Main Factor of Concrete Durability / K.V. Shuldyakov, A.A. Kirsanova, L.Ya. Kramar, B.Ya. Trofimov // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 143. – 02011.

4. Соловьева, В.Я. Современные высокофункциональные бетоны / В.Я. Соловьева, И.В. Степанова // *Национальная научно-техническая конференция «Перспективы будущего в образовательном процессе»*. – СПб.: ПГУПС, 2017. – С. 111–112.

5. Ильина, Л.В. Высокофункциональные бетоны с модифицирующими микродисперсными добавками микрокремнезема и диоксида / Л.В. Ильина, В.Я. Рудяк, С.А. Хакимуллина // *VII Международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений»*. – Новосибирск: Сибстрин, 2018. – С. 211.

6. Hooton, R.D. Future Directions for Design, Specification, Testing, and Construction of Durable Concrete Structures / R.D. Hooton // *Cement and Concrete Research*. – 2019. – Vol. 124. – 105827.

7. Степанова, В.Ф. Современные проблемы обеспечения долговечности железобетонных конструкций / В.Ф. Степанова, В.Р. Фаликман //

Бетон и железобетон – взгляд в будущее: научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону. – М., 2014. – Т. 3. – С. 430–444.

8. Баженов, Ю.М. Технология бетона: учебник / Ю.М. Баженов. – М.: АСВ, 2011. – 528 с.

9. Штарк, Й. Долговечность бетона / Й. Штарк, Б. Вихт. – Киев: Оранта, 2004. – 301 с.

10. Трофимов, Б.Я. Водонепроницаемость бетона: учебное пособие / Б.Я. Трофимов, А.С. Королев, А.Б. Вальт. – Челябинск, ЮУрГУ, 2000. – 31 с.

11. Несветаев, Г.В. Бетоны: учебное пособие / Г.В. Несветаев. – Ростов н/Д.: Феникс, 2013. – 381 с.

12. Aitcin, P.C. High-Performance Concrete / P.C. Aitcin. – Quebec: E&FnSpon, 2004. – 364 p.

13. Powers, T.C. Resistance of Concrete to Frost Action at Early Ages / T.C. Powers // Symposium Winter Concrete, session C, Proceedings RILEM, 1956. – P. 1–47.

14. Aitcin, P.C. Performance of Concrete of Condensed Silica Fume Used in Pavement and Sidewalks / P.C. Aitcin, M. Pigeon // Durability of Building Materials. – 1986. – № 3. – P. 353–368.

15. Горчаков, Г.И. Коэффициенты температурного расширения и температурные деформации строительных материалов / Г.И. Горчаков, И.И. Лифанов, Л.Н. Терёхин. – М.: Стандартинформ, 1968. – 168 с.

16. Трофимов, Б.Я. Влияние количества шлака в цементе на морозостойкость / Б.Я. Трофимов, Л.Я. Крамар, К.В. Шулдяков // Строительные материалы. – 2013. – № 9. – С. 96–101.

17. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры, П. Шисль. – М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.

18. Крамар, Л.Я. Структурообразование гидратных фаз цемента при циклическом замораживании / Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, К.В. Шулдяков // Строительство и экология: материалы I Международной научно-практической конференции. – Челябинск: Пирс, 2015. – С. 168–175.

19. Chemical Admixtures – Chemistry, Applications and their Impact on Concrete

Microstructure and Durability / J. Plank, E. Sakai, C.W. Miao et al. // Cement and Concrete Research. – 2015. – Vol. 78, part A. – P. 81–99.

20. Sellevold, E.J. Review: Microsilica in Concrete. Project Report No. 08037–EJS TJJ / E.J. Sellevold. – Oslo, Norwegian Building Research Institute, 1984. – 51 p.

21. Traetteberg, A. Silica Fumes as a Pozzolanic Material / A. Traetteberg // Cemento. – 1978. – № 3. – P. 369–375.

22. Kurdowski, W. Cement and Concrete Chemistry / W. Kurdowski. – Springer, 2014. – 700 p.

23. Вербек, Г.Д. Структура и физические свойства цементного камня / Г.Д. Вербек, Р.А. Хельмут // Пятый между. конгресс по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1973. – С. 250–270.

24. Волженский, А.В. Влияние некоторых компонентов на свойства цементного камня / А.В. Волженский // Шестой международный конгресс по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1976. – С. 91–97.

25. Иванов, Ф.М. Коррозионные процессы и стойкость бетона в агрессивных средах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Ф.М. Иванов. – М., 1968. – 46 с.

26. Крамар, Л.Я. Структурный фактор долговечности портландцементного бетона / Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, К.В. Шулдяков // Физико-химические процессы в строительном материаловедении. – Новосибирск, 2018. – С. 83–91.

27. Powers, T.C. Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste / T.C. Powers, T.L. Brownyard // JACI. – 1980. – Vol. 77, № 4. – P. 264–268.

28. Кузнецова, Т.В. Микроскопия материалов цементного производства / Т.В. Кузнецова, С.В. Самченко. – М.: МИКХиС, 2007. – 304 с.

29. Структурообразование и разрушение цементных бетонов / В.В. Бабков, В.Н. Мохов, С.М. Капитонов, П.Г. Колохов. – Уфа, ГУП, 2002. – 376 с.

30. Механизм и долговечность действия некоторых добавок на свойства портландцемента / Л.Г. Шпынова, И.И. Никонец, В.М. Мельник и др. // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 1979. – Т. 22, № 3. – С. 231–244.

**Шулдяков Кирилл Владимирович**, преподаватель кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), kirill-shuld@ya.ru

**Трофимов Борис Яковлевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), tbya@mail.ru

**Крамар Людмила Яковлевна**, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), kramar-l@mail.ru

Поступила в редакцию 14 декабря 2019 г.

## STRUCTURAL FACTOR OF CONCRETE DURABILITY

K.V. Shuldyakov, kirill-shuld@ya.ru

B.Ya. Trofimov, tbya@mail.ru

L.Ya. Kramar, kramar-l@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

At present, the durability of concrete is controlled by indirect indicators: by the quality of the materials used, of the reinforcing bar and admixtures, of the properties of the concrete mixture and its degree of compaction when designing reinforced concrete structures, of the duration and parameters of concrete care. Depending on the operation environment, the maximum allowable water/cement ratio value, the minimum allowable cement consumption and the concrete class for compressive strength are regulated. In some cases, the type of cement is limited; air entrainment, thickness and density of the protective layer of concrete, etc. are standardized. When using reinforced concrete structures in aggressive environments, the cause and degree of aggressive conditions is determined; the primary, secondary and special protection is designed. If the structure is operated without secondary protection, then most often the resulting criterion of concrete durability is its freeze-thaw resistance grade, which is determined by the microstructure of the hydrated phases of the cement.

*Keywords: durability, freeze-thaw resistance, porosity, structure, heavyweight concrete.*

## References

1. Boyko V.G., Kalugin S.Yu., Usherov-Marshak A.V. [The relationship between the concrete freeze-thaw resistance and durability of constructs]. *Fiziko-khimicheskiye protsessy v stroitel'nom materialovedenii: sbornik nauchnykh trudov po materialam natsional'noy nauchno-tehnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Collection of Scientific Papers on the Materials of the National Scientific and Technical Conference with International Participation "Physicochemical Processes in Building Materials Science"]. Novosibirsk, 2018, pp. 83–92 (in Russ.).
2. Fagerlund G. [Frost Destruction of Concrete. A Study of the Validity of Different Mechanisms. Nordic Concrete Research], 2018, vol. 58, iss. 1, pp. 35–54. DOI: 10.2478/ncr-2018-0003
3. Shuldyakov K.V., Kirsanova A.A., Kramar L.Ya., Trofimov B.Ya. [Hardened Cement Paste Microstructure as the Main Factor of Concrete Durability]. *MATEC Web Conf.*, 2018, vol. 143, 02011. DOI: 10.1051/mateconf/201814302011
4. Solov'yeva V.Ya., Stepanova I.V. [Modern High-Performance Concrete]. St. Peterburg, 2017, pp. 111–112 (in Russ.).
5. Il'ina L.V., Rudyak V.Ya., Khakimullina S.A. [High-Functional Concrete with Modifying Micro-Dispersion Additives of Silica Fume and Diopside]. *VII Mezhdunarodnyy simpozium "Aktual'nyye problemy komp'yuternogo modelirovaniya konstruktiv i sooruzheniy"* [VII International Symposium «Actual Problems of Computer Modeling of Constructions and Structures»]. Novosibirsk, Sibstrin Publ., 2018, pp. 211–219 (in Russ.).
6. Hooton R.D. Future Directions for Design, Specification, Testing, and Construction of Durable Concrete Structures. *Cement and Concrete Research*, 2019, vol. 124, 105827. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105827
7. Stepanova V.F., Falikman V.R. [Modern problems of ensuring the durability of reinforced concrete structures]. *Nauchnyye trudy III Vserossiyskoy (II Mezhdunarodnoy) konferentsii po betonu i zhelezobetonu* [Concrete and Reinforced Concrete – Glance at Future. Scientific Papers of the III All-Russian (II International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete]. Moscow, 2014, vol. 3, pp. 430–444.
8. Bazhenov Yu.M. *Tekhnologiya betona* [Concrete Technology]. Moscow, ASV Publ., 2011, 528 p.
9. Shtark Y., Vikht B. *Dolgovechnost' betona* [Concrete Durability]. Kiev, Oranta Publ., 2004, 301 p.
10. Trofimov B.Ya., Korolev A.S., Val't A.B. *Vodonepronitsayemost' betona* [Water Resistance of Concrete]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2000, 31 p.
11. Nesvetayev G.V. *Betony* [Concrete]. Rostov-na-Donu, Feniks Publ., 2013, 381 s.
12. Aitcin P.C. [High-Performance Concrete]. Quebec, E&Fnspon Publ., 2004, 364 p.
13. Powers T.C. [Resistance of Concrete to Frost Action at Early Ages]. *Symposium Winter Concrete, session C, Proceedings RILEM*, 1956, pp. 1–47.
14. Aitcin P.C., Pigeon M. [Performance of Concrete of Condensed Silica Fume Used in Pavement and Sidewalks]. *Durability of Building Materials*, 1986, no. 3, pp. 353–368.
15. Gorchakov G.I., Lifanov I.I., Terëkhin L.N. *Koeffitsiyenty temperaturnogo rasshireniya i temperaturnyye deformatsii stroitel'nykh materialov* [Thermal Expansion and Thermal Deformation of Building Materials]. Moscow, Standartinform Publ., 1968, 168 p.

16. Trofimov B.Ya., Kramar L.ya., Shuldyakov K.V. [The Effect of Slag in Cement on Frost Resistance]. *Stroitel'nyye materialy* [Construction Materials], 2013, no. 9, pp. 96–101 (in Russ.).
17. Alekseyev S.N., Ivanov F.M., Modry S., Shissl' P. *Dolgovechnost' zhelezobetona v agressivnykh sredakh* [Durability of Reinforced Concrete in Aggressive Environments]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1990, 320 p.
18. Kramar L.Ya., Trofimov B.Ya., Shuldyakov K.V. [Structural Formation of Hydrated Phases of Cement during Cyclic Freezing]. *Stroitel'stvo i ekologiya: materialy I Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Construction and Ecology: Materials of the 1st International Scientific and Practical Conference]. Chelyabinsk, Pirs Publ., 2015, pp. 168–175 (in Russ.).
19. Plank J., Sakai E., Miao C.W., Yu C., Hong J.X. [Chemical Admixtures – Chemistry, Applications and their Impact on Concrete Microstructure and Durability]. *Cement and Concrete Research*, 2015, vol. 78, part A, pp. 81–99.
20. Sellevold E.J. *Review: Microsilica in Concrete. Project Report No. 08037–EJS TJJ*. Oslo, Norwegian Building Research Institute Publ., 1984. 51 p.
21. Traetteberg A. [Silica Fumes as a Pozzolanic Material]. *Cemento*, 1978, no. 3, pp. 369–375.
22. Kurdowski W. *Cement and Concrete Chemistry*. Springer Publ., 2014. 700 p.
23. Verbek G.D., Khel'mut R.A. [The Structure and Physical Properties of Cement Stone]. *Pyatyy mezhd. kongress po khimii tsementa* [Fifth International Congress on Cement Chemistry]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1973, pp. 250–270 (in Russ.).
24. Volzhenskiy A.V. [The Influence of Some Components on the Properties of Cement Stone]. *Shestoy mezhdunarodnyy kongress po khimii tsementa* [Sixth International Congress on the Chemistry of Cement]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1976, pp. 91–97 (in Russ.).
25. Ivanov F.M. *Korroziionnyye protsessy i stoykost' betona v agressivnykh sredakh. Avtoref. dokt. diss.* [Corrosion Processes and Resistance of Concrete in Aggressive Environments. Abstract of doct. diss.]. Moscow, 1968, 46 p.
26. Kramar L.Ya., Trofimov B.Ya., Shuldyakov K.V. [Structural Factor of Durability of Concrete]. *Fiziko-khimicheskiye protsessy v stroitel'nom materialovedenii* [Physical and Chemical Processes in Building Materials Science]. Novosibirsk, 2018, pp. 83–91 (in Russ.).
27. Powers T.C., Brownyard T.L. [Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste]. *JACI*, 1980, vol. 77, no.4, pp. 264–268.
28. Kuznetsova T.V., Samchenko S.V. *Mikroskopiya materialov tsementnogo proizvodstva* [Microscopy of Cement Production]. Moscow, MIKHiS Publ., 2007. 304 p.
29. Babkov V.V., Mokhov V.N., Kapitonov S.M., Komokhov P.G. *Strukturoobrazovaniye i razrusheniye tsementnykh betonov* [Structure Formation and Destruction of Cement Concrete]. Ufa, GUP Publ., 2002. 376 p.
30. Shpynova L.G., Nikonets I.I., Mel'nik V.M. [The Mechanism and Durability of the Action of Some Additives on the Properties of Portland Cement]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [University Proceedings. Chemistry and Chemical Technology]. 1979, vol. 22, no. 3, pp. 231–244 (in Russ.).

Received 14 December 2019

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Шулдяков, К.В. Структурный фактор долговечности бетона / К.В. Шулдяков, Б.Я. Трофимов, Л.Я. Крамар // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 46–51. DOI: 10.14529/build200105

#### FOR CITATION

Shuldyakov K.V., Trofimov B.Ya., Kramar L.Ya. Structural Factor of Concrete Durability. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2020, vol. 20, no. 1, pp. 46–51. (in Russ.). DOI: 10.14529/build200105