



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 66.018.8:620.193.4

DOI: 10.52957/27821919\_2022\_3\_41

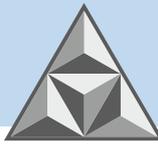
# Взаимосвязь изменений структурно-фазового состава и прочности гидрофобизированного бетона при воздействии хлоридсодержащей среды

**В.С. Коновалова**

Виктория Сергеевна Коновалова

Ивановский государственный политехнический университет

*kotprotiv@yandex.ru*



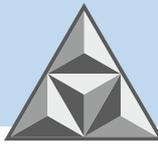
Связь между структурой цементного камня и механикой его разрушения устанавливается посредством изучения структурно-фазовых изменений в цементном камне под воздействием сильноагрессивной хлоридсодержащей среды. Для обеспечения объемной гидрофобизации цементного камня бетона предложено вводить в цементную смесь на стадии изготовления стеарат кальция в количестве 0.5 и 0.7 % мас. Изменение физико-механических характеристик образцов цементного камня фиксировали после 6 месяцев воздействия на них двухпроцентного раствора  $MgCl_2$ . Из структурных составляющих исследованной марки портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н низкоосновные гидросиликаты кальция, портландит и этtringит быстрее поддаются разложению при коррозии бетона в жидких хлоридсодержащих средах, что оказывает основное влияние на изменение прочностных характеристик бетона. В результате воздействия жидких хлоридсодержащих сред происходит снижение на 35% прочности на сжатие цементного камня бетона. Введение в цементную смесь гидрофобизатора стеарата кальция приводит к формированию высоко кристаллической структуры при твердении цементного камня бетона. В структуре гидрофобизированного цементного камня повышено содержание гидросиликатов кальция и этtringита, вследствие чего возрастает его прочность. При воздействии агрессивной хлоридсодержащей среды происходит незначительное снижение интенсивности кальцийсодержащих фаз, количество портландита в структуре цементного камня остается прежним. В результате хлоридной коррозии прочность гидрофобизированного бетона понижается на 8%.

**Ключевые слова:** объемная гидрофобизация, гидрофобизированный бетон, хлоридная коррозия, рентгеноструктурный анализ, прочность бетона, структурно-фазовый состав, коррозия бетона

**Для цитирования:**

**Коновалова В.С.** Взаимосвязь изменений структурно-фазового состава и прочности гидрофобизированного бетона при воздействии хлоридсодержащей среды // *Умные композиты в строительстве*. 2022. Т. 3, № 3. С. 41-55. URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N3\\_2022](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N3_2022).

**DOI:** 10.52957/27821919\_2022\_3\_41



RESEARCH PAPER

DOI: 10.52957/27821919\_2022\_3\_41

# The relationship of changes in the structural-phase composition and strength of hydrophobized concrete under the influence of a chloride-containing medium

**V.S. Konovalova**

Victoria S. Konovalova

Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russia

*kotprotiv@yandex.ru*



*The relationship between the structure of cement stone and the mechanics of its destruction is established by studying the structural and phase changes occurring in cement stone under the influence of a highly aggressive chloride-containing medium. To ensure volumetric hydrophobization of concrete cement stone, it is proposed to introduce calcium stearate in the amount of 0.5 and 0.7 wt. % into the cement mixture at the manufacturing stage. Studies of changes in the physical and mechanical characteristics of cement stone samples were carried out after 6 months of exposure to an environment of a 2%  $MgCl_2$  solution. Of the structural components of the studied brand of Portland cement CEM I 42.5N, low-base calcium hydrosilicates, portlandite and ettringite are more quickly decomposable during concrete corrosion in liquid chloride-containing media, which has a major effect on the change in the strength characteristics of concrete. As a result of exposure to liquid chloride-containing media, the compressive strength of concrete cement stone decreases by 35%. When the calcium stearate hydrophobizer is introduced into the cement mixture, a highly crystalline structure is formed during the hardening of concrete cement stone. In the structure of hydrophobized cement stone, the content of calcium hydrosilicates and ettringite is increased, resulting in an increase in strength. After exposure to an aggressive chloride-containing medium, there is a slight decrease in the intensity of calcium-containing phases, the amount of portlandite in the cement stone structure does not decrease. As a result of chloride corrosion, the strength of hydrophobized concrete decreases by 8%.*

**Key words:** volumetric hydrophobization, hydrophobized concrete, chloride corrosion, X-ray structural analysis, concrete strength, structural and phase composition, concrete corrosion

**For citation:**

**Konovalova, V.S. (2022)** The relationship of changes in the structural-phase composition and strength of hydrophobized concrete under the influence of a chloride-containing medium, *Smart Composite in Construction*, 3(3), pp. 41-55 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N3\\_2022](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N3_2022) (in Russian).

**DOI:** 10.52957/27821919\_2022\_3\_41



## ВВЕДЕНИЕ

В условиях, когда на бетонное изделие оказывает действие агрессивная среда, интенсивность развития процессов коррозии зависит от скорости проникновения в цементный камень агрессивных веществ [1-4]. Эта скорость в значительной степени определяется структурными особенностями цементного камня [5-8].

Наиболее агрессивными водорастворимыми веществами для железобетона являются хлорид-ионы [9-13], также значительное влияние на бетон оказывает карбонизация [14-19]. Поскольку взаимодействие компонентов бетона с агрессивными веществами происходит в жидкой среде, водопроницаемость бетона играет важную роль в развитии процессов коррозионной деструкции [20-23].

Бетон обладает высокой водопроницаемостью для газа и жидкостей благодаря сочетанию пористой микроструктуры и гидрофильной природы компонентов, цементной массы и минеральных заполнителей. Проникновение и перенос воды вызывают разрушение его структуры, что приводит к снижению функциональности и надежности бетонных изделий [2, 11, 24, 25].

Снижение проницаемости бетона является важной дополнительной мерой для предотвращения развития процессов коррозии. Обработка с целью уменьшения пористости поверхности путем введения специальных добавок во время смешивания компонентов бетона приводит к частичному или полному заполнению пор нерастворимыми соединениями, образующимися при взаимодействии добавок с определенными компонентами бетона [26-31]. В этом случае вся бетонная масса приобретает определенную устойчивость к воздействию воды.

Наиболее распространенными средствами, блокирующими поры бетона, являются фторсилкаты и силкаты, силаны и силоксаны, стеараты [32-37], а также модифицированные порошки микрокремнезема и золы [38, 39].

Установлено, что при введении в качестве гидрофобизирующих добавок в бетон стеаратов щелочных и щелочноземельных металлов в начальные сроки прочность на осевое сжатие снижается в 2-5 раз, по сравнению с негидрофобизированными образцами бетона [35, 40, 41]. В дальнейшем при затвердевании прочность бетонов на сжатие значительно увеличивается (в 20-40 раз), однако обоснование такому действию добавок на данный момент отсутствует [26, 42-44].

Поскольку между механикой и структурой разрушения цементного камня существует тесная связь, целью исследований является изучение структурно-фазовых изменений, происходящих в цементном камне при воздействии агрессивных сред.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследования проводили на образцах размерами 10x10x10 см из портландцемента марки ЦЕМ I 42,5Н с водоцементным соотношением В/Ц = 0,3, изготовленных из растворов нормальной густоты. Размеры образцов и условия их твердения – температура (20±2) °С и относительная влажность воздуха 50–70% – соответствуют ГОСТ 5802-86 «Растворы строительные. Методы испытаний». Перед проведением испытаний образцы выдерживали в течение 28 суток для отверждения в нормальных условиях.

Марка цемента по водонепроницаемости W6 и W8 регулировалась гидрофобизирующей добавкой – стеаратом кальция и перед началом эксперимента определялась согласно



методике, описанной в патенте на изобретение РФ № 2187804 «Способ определения водонепроницаемости цементных материалов». Марке по водонепроницаемости W6 соответствует содержание стеарата кальция в количестве 0.5% от массы цемента, марке по водонепроницаемости W8 – 0.7%.

Концентрацию раствора  $MgCl_2$  20 г·л<sup>-1</sup> приняли в соответствии с СП 28.13330.2012 «Защита строительных конструкций от коррозии» по таблице В3 приложения В как сильноагрессивную по отношению к бетону. Образцы цементного камня помещали в емкости, заполненные указанной хлоридсодержащей средой. Изменения физико-механических характеристик образцов цементного камня фиксировали после 6 мес. воздействия на них жидкой агрессивной среды.

Прочность бетонных образцов определяли по ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

Рентгенографический анализ позволяет качественно определить фазовый состав цементного камня. Для проведения исследования с поверхностей образцов цементного камня после их высушивания скалывали кусок, который затем измельчали до мелкодисперсного порошкообразного состояния. Рентгенограммы снимали на порошковом дифрактометре D8 Advance при  $\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

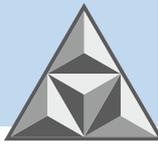
Долговечность бетона – один из важнейших показателей качества строительных конструкций, напрямую связанный с его прочностью. Хорошо известно, что повышение соотношения воды и цемента в бетоне приводит к снижению его прочности и увеличению степени пористости [1, 2, 45, 46]. Бетон с низкой прочностью является более проницаемым и менее долговечным [1, 3, 47, 48]. Однако для реальных железобетонных конструкций решение проблемы долговечности является более сложным, и одного учета прочности недостаточно.

На рис. 1, а приведена рентгенограмма образца из цементного камня, не подвергнутого воздействию агрессивной среды.

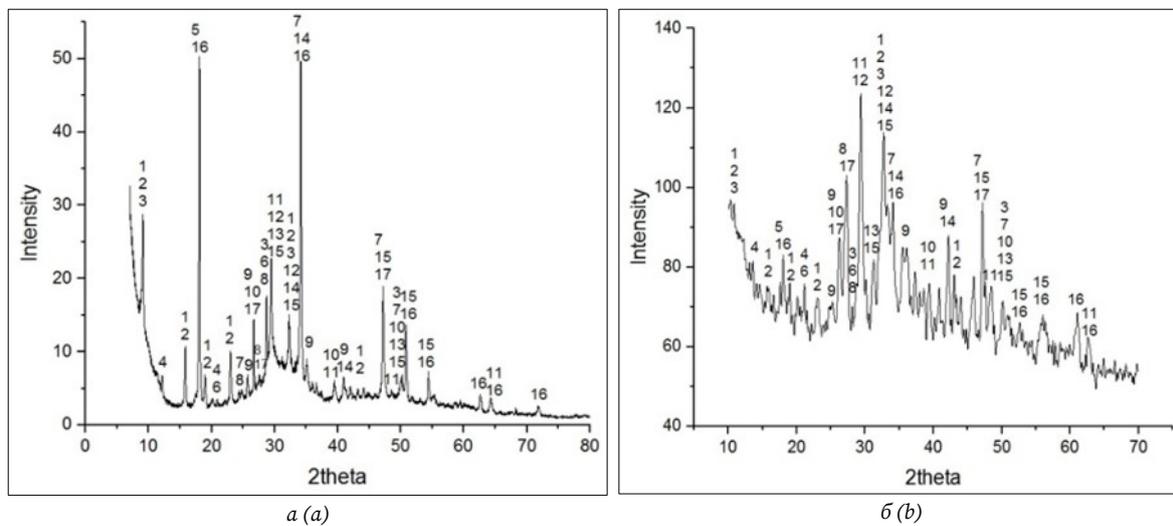
Узкие пики соответствуют высококристаллической структуре исследуемых образцов цементного камня. На рентгенограмме зафиксировано диффузионное гало в области  $2\theta = 29-36$  град., которое характеризует наличие рентгеноаморфных веществ, в частности, гидросиликатов кальция и тоберморитового геля.

В структурно-фазовом составе цементных образцов обнаружены негидратированные фазы цементного клинкера – алит  $C_3S$  и белит  $C_2S$ . Установлено совместное присутствие в цементном камне алита с продуктами его гидратации – низкоосновными C-S-H (I) и высокоосновными C-S-H (II) гидросиликатами кальция. Негидратированный браунмиллерит  $C_4AF$  представлен совместно с гидросиликатами кальция. Эттрингит и таумасит в цементном камне часто присутствуют в виде кристаллической смеси, поэтому на рентгенограммах они представлены совместными пиками. В образцах ярко выражены пики, отвечающие фазе портландита  $Ca(OH)_2$ . В структуре цементного камня из портландцемента марки ЦЕМ I 42,5Н содержится малое количество гипса. Пики низкой интенсивности (3-5%) на рентгенограммах образцов соответствуют продуктам гидратации минерала портландцемента трехкальциевого алюмината  $C_3A$  – восьми, тринадцати и девятнадцативодным гидроалюминатам кальция, а также высокосульфатной форме гидросульфогеррита кальция.

На рис. 1, б приведена рентгенограмма цементного камня после воздействия двухпроцентного раствора  $MgCl_2$  в течение 6 месяцев. При коррозии цементного камня в жидких хлоридсодержащих средах происходит снижение интенсивности пиков. Это



свидетельствует об уменьшении содержания фазовых составляющих цементного камня вследствие разложения компонентов под воздействием хлорид-ионов.



**Рис. 1.** Рентгенограммы образца цементного камня из портландцемента марки ЦЕМ I 42.5 Н до (а) и после воздействия в течение 6 месяцев двухпроцентного раствора  $MgCl_2$  (б): 1 - таумасит; 2 - этtringит; 3 - С-С-Н (II); 4 - жисмондин; 5 - гиббсит; 6 - гипс; 7 - браунмиллерит; 8 - ксонотлит; 9 - силлиманит; 10 -  $\beta$ -кварц; 11 - кальцит; 12 - алит; 13 - тоберморит; 14 - белит; 15 - С-С-Н (I); 16 - портландит; 17 - кянит

**Fig. 1.** X-ray images of a sample of cement stone from Portland cement grade CEM I 42.5 N before (a) and after exposure for 6 months to a two percent  $MgCl_2$  solution (b): 1 - taumacite; 2 - ettringite; 3 - C-S-H (II); 4 - gismondine; 5 - gibbsite; 6 - gypsum; 7 - brownmillerite; 8 - xonotlite; 9 - sillimanite; 10 -  $\beta$ -quartz; 11 - calcite; 12 - alite; 13 - tobermorite; 14 - belite; 15 - C-S-H (I); 16 - portlandite; 17 - kyanite

Снижение интенсивности и исчезновение на рентгенограмме (см. рис. 1, б) линий, отвечающих продукту гидратации алита и белита – низкоосновному гидросиликату кальция С-С-Н (I), подтверждают данные прочностных испытаний цементных образцов после воздействия агрессивных сред (табл. 1). При хлоридной коррозии этой структурной фазы становится меньше, что приводит к снижению прочности цементного камня.

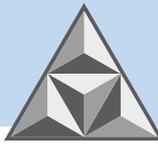
**Таблица 1.** Изменения прочности образцов цементного камня бетона из портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н под воздействием сильноагрессивной хлоридсодержащей среды

**Table 1.** Changes in the strength of cement stone concrete samples from Portland cement CEM I 42.5 N under the influence of a highly aggressive chloride-containing medium

Марка бетона по водонепроницаемости	Концентрация $MgCl_2$ в растворе, г/л	Расчетное напряжение разрушения, МПа
-	-	49.8
	20	32.5
W6	-	58.2
	20	53.8
W8	-	63.4
	20	58.3

В результате коррозии цементного камня в жидких хлоридсодержащих средах на рентгенограмме происходит небольшой сдвиг рефлексов по значениям углов  $2\theta$ , что связано с изменением аморфно-кристаллической структуры. Однако для одних и тех же фаз пики остаются выраженными.

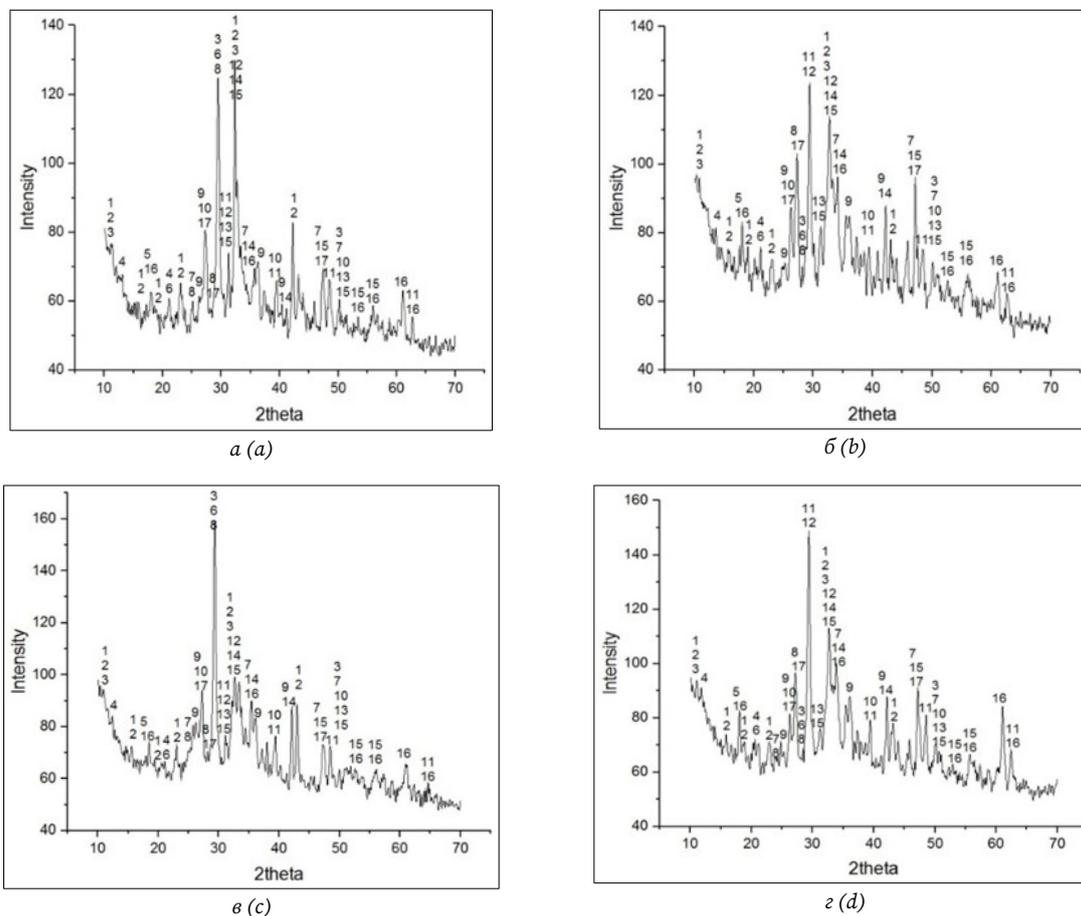
Снижение интенсивности пиков портландита  $Ca(OH)_2$  на рентгенограммах обусловлено его разрушением и вымыванием под воздействием на цементный камень водных агрессивных сред [49]. Вымывание портландита из цементного камня в результате коррозионных процессов приводит к дестабилизации высокоосновных гидратных фаз



цементного камня. При воздействии двухпроцентного раствора  $MgCl_2$  площади диффузионных гало уменьшаются; это свидетельствует о том, что рентгеноаморфных фаз в цементном камне становится меньше. Среднее снижение интенсивности линий, характеризующих совместное присутствие тоберморита и тоберморитоподобного гидросиликата кальция C-S-H (I), составило 67%.

При коррозии цементного камня в хлоридсодержащих средах происходит интенсивное уменьшение количества как кристаллических, так и рентгеноаморфных фаз. Так, в результате воздействия двухпроцентного раствора  $MgCl_2$  на цементный камень происходит значительное снижение интенсивности всех кальцийсодержащих составляющих, что негативно сказывается на прочностных характеристиках (см. табл. 1).

Анализ рентгенограмм (рис. 2) показывает, что в результате введения гидрофобизирующих добавок в цементном камне изменяется соотношение структурных составляющих. В негидрофобизированных образцах (см. рис. 2, *в* и *г*) ярко выраженными являются пики, отвечающие фазе портландита, а в гидрофобизированных образцах (см. рис. 2, *а* и *б*) – гидросиликатам кальция, таумаситу и эттрингиту.



**Рис. 2.** Рентгенограммы образцов до (*а, в*) и после (*б, г*) воздействия на цементный камень двухпроцентного раствора  $MgCl_2$  (*б, г*): *а, б* – гидрофобизированные образцы, динамика по марке водонепроницаемости W6; *в, г* – негидрофобизированные динамика по марке водонепроницаемости W8; 1 – таумасит; 2 – эттрингит; 3 – C-S-H (II); 4 – жисмондин; 5 – гибсит; 6 – гипс; 7 – браунмиллерит; 8 – ксонотлит; 9 – силлиманит; 10 –  $\beta$ -кварц; 11 – кальцит; 12 – алит; 13 – тоберморит; 14 – белит; 15 – C-S-H (I); 16 – портландит; 17 – кянит

**Fig. 2.** X-ray images of samples before (*a, c*) and after (*b, d*) exposure to cement stone with a two percent  $MgCl_2$  solution (*b, d*): *a, b* - hydrophobized samples, dynamics according to the waterproof grade W6; *c, d* - non-hydrophobized dynamics according to the waterproof grade W8; 1 - thaumacite; 2 - ettringite; 3 - C-S-H (II); 4 - gismondine; 5 - gibbsite; 6 - gypsum; 7 - brownmillerite; 8 - xonotlite; 9 - sillimanite; 10 -  $\beta$ -quartz; 11 - calcite; 12 - alite; 13 - tobermorite; 14 - belite; 15 - C-S-H (I); 16 - portlandite; 17 - kyanite



Узкие пики на рентгенограммах соответствуют кристаллической структуре исследуемых образцов цементного камня. На рентгенограммах зафиксировано диффузионное гало в области  $2\theta = 29-36$  град., которое подтверждает наличие рентгеноаморфных веществ, в частности гидросиликатов кальция и тоберморитового геля. У гидрофобизированных образцов гало менее выражено, вероятно, вследствие влияния стеарата кальция на формирование высококристаллической структуры цементного камня. Повышение интенсивности пиков на рентгенограммах гидрофобизированных образцов свидетельствует о более упорядоченной их кристаллической структуре.

В структурно-фазовом составе цементных образцов обнаружены негидратированные фазы цементного клинкера – алит  $C_3S$  и белит  $C_2S$ . Гидратация этих фаз может быть замедлена при введении гидрофобизатора – стеарата кальция на стадии изготовления цементного теста.

При воздействии двухпроцентного раствора  $MgCl_2$  на цементный камень происходит снижение интенсивности кальцийсодержащих фаз, что должно негативно отражаться на прочностных характеристиках материала. В частности, в негидрофобизированном цементном камне в результате коррозии происходит значительное уменьшение содержания гидросиликата кальция C-S-H (II) (см. рис. 2, в и 2, г соответственно). С другой стороны, в результате воздействия агрессивной среды не происходит существенное выведение кальция из структуры цементного камня, приготовленного с включением добавки стеарата кальция (см. рис. 2, а и б). Пики портландита остаются выраженными, количество их не изменяется.

Данные определения прочности образцов на сжатие показали (см. табл. 1), что при введении гидрофобизатора она повышается. Это объясняется образованием высококристаллической структуры отвержденного цементного камня. В результате действия агрессивной среды на гидрофобизированные образцы их прочность снижается не столь значительно, как у исходного образца (без добавки). Таким образом, введение гидрофобизатора стеарата кальция в цементную смесь на стадии ее приготовления улучшает структуру бетона и повышает его прочностные характеристики.

Рост расчетного напряжения разрушения связан со структурно-фазовыми превращениями, происходящими в цементном камне под действием агрессивной среды.

## ВЫВОДЫ

При воздействии агрессивных хлоридсодержащих сред происходят изменения в структурно-фазовом составе цементного камня бетона, приводящие к ухудшению его прочностных характеристик. Результаты оценки воздействия двухпроцентного раствора  $MgCl_2$  на цементный камень с использованием рентгеноструктурного анализа указывают на снижение содержания всех кальцийсодержащих фаз. Зафиксировано разложение рентгеноаморфной фазы гидросиликатов кальция и тоберморитового геля из структуры бетона.

Уменьшение массовой доли гидросиликатов кальция и этtringита, а также других кристаллических фаз в цементном камне приводит к снижению на 35% прочности его при сжатии за 6 мес. хлоридной коррозии.

В результате введения стеарата кальция в цементную смесь при твердении происходит образование высококристаллической структуры с повышенным содержанием гидросиликатов кальция, таумасита и этtringита. Прочность гидрофобизированного цементного камня на 20% выше, чем у исходного образца (без добавки).

При воздействии в течение 6 месяцев жидкой хлоридсодержащей среды прочностные



характеристики гидрофобизированного цементного камня изменяются менее интенсивно (прочность на сжатие снижается на 8%).

Таким образом, с использованием методов рентгенофазового анализа установлена взаимосвязь между характеристиками структуры цементного камня и параметрами его прочности. Долговременная прочность и трещиностойкость бетона определяются не только пористостью и степенью гидратации, но и характеристиками дисперсно-кристаллитной структуры цементного камня.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Степанова В.Ф.** Долговечность бетона. М.: Изд-во АСВ. 2014. 126 с.
2. **Баженов Ю.М.** Технология бетона. М.: Изд-во АСВ. 2011. 524 с.
3. **Шудьяков К.В., Трофимов Б.Я., Крамар Л.Я.** Структурный фактор долговечности бетона // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2020. Т. 20, № 1. С. 46-51. DOI:10.14529/build200105.
4. **Леонович С.Н., Прасол А.В.** Железобетон в условиях хлоридной коррозии: деформирование и разрушение // *Строительные материалы*. 2013. № 5. С. 94-95.
5. **Stroková V.V., Zhernovsky I.V., Nelyubova V.V., Rykunova M.D.** Structural Transformations of Cement Stone in Conditions of Development of the Biocenosis of a Poultry Enterprise // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 945. P. 269-275. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.269.
6. **Blikharsky Y., Selejdak J., Kopyika N., Vashkevych R.** Study of Concrete under Combined Action of Aggressive Environment and Long-Term Loading // *Materials*. 2021. Vol. 14. P. 6612. DOI: 10.3390/ma14216612.
7. **Shcherban' E.M., Stel'makh S.A., Beskopylny A., Mailyan L.R., Meskhi B.** Increasing the Corrosion Resistance and Durability of Geopolymer Concrete Structures of Agricultural Buildings Operating in Specific Conditions of Aggressive Environments of Livestock Buildings // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, no. 3. P. 1655. DOI: 10.3390/app12031655.
8. **de Gutiérrez R.M.** Effect of supplementary cementing materials on the concrete corrosion control // *Revista de Metalurgia*. 2003. Vol. 39. P. 250-255.
9. **Розенталь Н.К., Степанова В.Ф., Чехний Г.В.** О максимально допустимом содержании хлоридов в бетоне // *Строительные материалы*. 2017. № 1-2. С. 82-85.
10. **Смоляго Г.А., Крючков А.А., Дрокин С.В., Дронов А.В.** Исследование аспектов хлоридной коррозии железобетонных конструкций // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2014. № 2. С. 22-24.
11. **Москвин В.М.** Коррозия бетона. М.: Госстройиздат. 1952. 342 с.
12. **Sun W., Liu J., Yan J., Dai Y.** Study on the Influence of Chloride Ions Content on the Sea Sand Concrete Performance // *American Journal of Civil Engineering*. 2016. Vol. 4, no. 2. P. 50-54. DOI: 10.11648/j.ajce.20160402.12
13. **Neville A.** Chloride attack of reinforced concrete: an overview // *Materials and Structures*. 1995. V. 28. P. 63. DOI:10.1007/BF02473172
14. **Zhu X., Meng Z., Liu Y., Xu L., Chen Z.** Entire Process Simulation of Corrosion due to the Ingress of Chloride Ions and CO<sub>2</sub> in Concrete // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 2018. Article ID 9254865. DOI: 10.1155/2018/9254865.
15. **Гильмутдинов Т.З., Федоров П.А., Латыпов П.М.** Результаты исследований по ускоренной карбонизации бетона и цементного камня во влажных условиях эксплуатации // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2016. № 1. С. 155-162.
16. **Васильев А.А.** Оценка карбонизации и развития ее параметров во времени по сечению бетонов для различных эксплуатационных условий // *Вестник Полоцкого государственного университета*.



- Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. 2021. № 8. С. 43-52.
17. **Ho D.W.S., Lewis R.K.** Carbonation of concrete and its prediction // *Cement and Concrete Research*. 1987. Vol. 17, no. 3. P. 489-504. DOI: 10.1016/0008-8846(87)90012-3.
  18. **Singh N., Singh S.P.** Reviewing the Carbonation Resistance of Concrete // *Journal of materials and engineering structures*. 2016. Vol. 3. P. 35-57.
  19. **Cho H.-C., Ju H., Oh J.-Y., Lee K.J., Hahm K.W., Kim K.S.** Estimation of Concrete Carbonation Depth Considering Multiple Influencing Factors on the Deterioration of Durability for Reinforced Concrete Structures // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 2016. Article ID 4814609. DOI: 10.1155/2016/4814609.
  20. **Zhang R., Liu P., Ma L., Yang Z., Chen H., Zhu H.X., Xiao H., Li J.** Research on the Corrosion/Permeability/Frost Resistance of Concrete by Experimental and Microscopic Mechanisms Under Different Water-Binder Ratios // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2020. Vol. 14. P. 10. DOI: 10.1186/s40069-019-0382-8.
  21. **Goncharova N.I.** The Capillary Permeability of Concrete in Salt Media // *ISJ Theoretical & Applied Science*. 2021. Vol. 11, no. 103. P. 917-921. DOI: 10.15863/TAS.2021.11.103.107.
  22. **Bamforth P.B.** The water permeability of concrete and its relationship with strength // *Magazine of Concrete Research*. 1991. Vol. 43, no. 157. P. 233-241. DOI: 10.1680/MACR.1991.43.157.233.
  23. **Li X., Xu Q., Chen S.** An experimental and numerical study on water permeability of concrete // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 105. P. 503-510. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.184.
  24. **Zhang Y., Xu S., Fang Z., Zhang J., Mao C.** Permeability of Concrete and Correlation with Microstructure Parameters Determined by <sup>1</sup>H NMR // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 2020. Article ID 4969680. DOI: 10.1155/2020%2F4969680.
  25. **Villar M.V., Martín P.L., Romero F.J., Gutiérrez-Rodrigo V., Barcala J.M.** Gas and water permeability of concrete // *Geological Society, London, Special Publications*. 2015. Vol. 415. P. 59-73. DOI: 10.1144/SP415.6.
  26. **Хигерович М.И., Байер В.Е.** Гидрофобно-пластифицирующие добавки для цементов, растворов и бетонов. М.: Стройиздат. 1979. 126 с.
  27. **Дергунов С.А., Рубцова В.Н., Орехов С.А.** Гидрофобизация минеральных систем // *СтройПРОФиль*. 2009. № 6 (76). С. 17-20.
  28. **Массалимов И.А., Янахметов М.Р., Чуйкин А.Е., Массалимов Б.И., Уракаев Ф.Х., Уралбеков Б.М., Буркитбаев М.М.** Гидрофобизация плотного и мелкозернистого бетонов полисульфидными растворами // *Нанотехнологии в строительстве*. 2016. Т. 8, № 5. С. 85-99. DOI: 10.15828/2075-8545-2016-8-5-85-99.
  29. **Петров Н.А., Конесев Г.В., Давыдова И.Н.** Отрицательные и положительные последствия обработки буровых растворов жидкостями гкж-10 (11, 11н) // *Нефтегазовое дело*. 2006. № 2. 7 с. URL: [https://www.studmed.ru/neftegazovoe-delo-2006-01\\_2e771048ae6.html?ysclid=l7efqu2n64601291978](https://www.studmed.ru/neftegazovoe-delo-2006-01_2e771048ae6.html?ysclid=l7efqu2n64601291978)
  30. **Cappellesso V.G., dos Santos Petry N., Dal Molin D.C.C., Masuero B.** Use of crystalline waterproofing to reduce capillary porosity in concrete // *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*. 2016. Vol. 1. P. 9. DOI: 10.1007/s41024-016-0012-7.
  31. **Skutnik Z., Sobolewski M., Koda E.** An Experimental Assessment of the Water Permeability of Concrete with a Superplasticizer and Admixtures // *Materials*. 2020. Vol. 13, no. 24. P. 5624. DOI: 10.3390/ma13245624.
  32. **Христофоров А.И., Христофорова И.А., Еропов О.Л.** Бетонная смесь, модифицированная аэросилом и тетраэтоксисилоном // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2011. Т. 4, № 6. С. 704-710.
  33. **Рамачандран В.С.** Добавки в бетон. М.: Стройиздат. 1988. 575 с.
  34. **Dai J.-G., Akira Y., Wittmann F., Yokota H., Zhang P.** Water repellent surface impregnation for

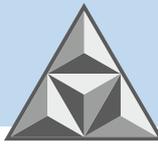


- extension of service life of reinforced concrete structures in marine environments: The role of cracks // *Cement and Concrete Composites*. 2010. Vol. 32. P. 101-109. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.11.001.
35. **Мороз М.Н., Петухов А.В., Калашников В.И.** Мелкозернистые бетоны на карбонатно-глиношлаковых вяжущих, гидрофобизированных стеаратом цинка // *Молодой ученый*. 2014. № 13. С. 59-61.
36. **Dong B., Wang F., Abadikhah H., Hao L.Y., Xu X., Khan S.A., Wang G., Agathopoulos S.** Simple Fabrication of Concrete with Remarkable Self-Cleaning Ability, Robust Superhydrophobicity, Tailored Porosity, and Highly Thermal and Sound Insulation // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2019. Vol. 11. P. 42801-42807. DOI: 10.1021/acsami.9b14929.
37. **Федосов С.В., Акулова М.В., Слизнева Т.Е., Кокшаров С.А., Ахмадулина А.С., Соколова Ю.А.** Применение механомагнитоактивированных водных растворов жидкого стекла для модифицирования мелкозернистых композитов // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2016. № 6 (366). С. 58-65.
38. **Wong H.S., Barakat R., Al Hilali A., Saleh M., Cheeseman C.R.** Hydrophobic concrete using waste paper sludge ash // *Cement and Concrete Research*. 2015. Vol. 70. P. 9-20. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.01.005.
39. **Mora E., González G., Romero P., Castellón E.** Control of water absorption in concrete materials by modification with hybrid hydrophobic silica particles // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 221. P. 210-218. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.086.
40. **Мороз М.Н., Калашников В.И., Петухов А.В.** Морозостойкость гидрофобизированных бетонов // *Молодой ученый*. 2014. № 19. С. 222-225.
41. **Zhu Y.-G., Kou S.-C., Poon C.-S., Dai J.-G., Li Q.-Y.** Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2013. Vol. 35, no 1. P. 32-38. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.008.
42. **Трофимова И.А.** Аналитический обзор исследований физико-механических свойств бетонов с объемной гидрофобизацией // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2017. № 4 (231-232). С. 77-82.
43. **Несветаев Г.В., Козлов А.В., Филонов И.А.** Влияние некоторых гидрофобизирующих добавок на изменение прочности цементного камня // *Инженерный вестник Дона*. 2013. № 2 (25). С. 134.
44. **Al-Kheetan M.J., Rahman M.M., Chamberlain D.A.** Development of hydrophobic concrete by adding dual-crystalline admixture at mixing stage // *Structural Concrete*. 2018. Vol. 19, no. 5. P. 1504-1511. DOI: 10.1002/suco.201700254.
45. **Бутт Ю.М., Окорочков С.Д., Сычев М.М., Тимашев В.В.** Технология вяжущих веществ. М.: Высшая школа. 1965. 620 с.
46. **Gjorv O.E.** Durability of Concrete Structures // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2011. Vol. 36. P. 151-172. DOI: 10.1007/s13369-010-0033-5.
47. **Iffat S.** Relation Between Density and Compressive Strength of Hardened Concrete // *Concrete Research Letters*. 2015. Vol. 6, no. 4. P. 182-189.
48. **Nie Q., Zhou C., Shu X., He Q., Huang B.** Chemical, Mechanical, and Durability Properties of Concrete with Local Mineral Admixtures under Sulfate Environment in Northwest China // *Materials*. 2014. Vol. 7, no. 5. P. 3772-3785. DOI: 10.3390/ma7053772
49. **Konovalova V.S.** Influence of chloride-containing media on the protective properties of concrete // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 95. P. 260-265. DOI: 10.1007/978-3-030-54652-6\_39.

Поступила в редакцию 28.08.2022

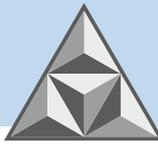
Одобрена после рецензирования 02.09.2022

Принята к опубликованию 15.09.2022

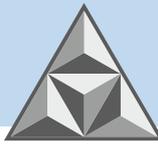


## REFERENCES

1. **Stepanova, V.F.** (2014) *Durability of concrete*. M.: Izd-vo ASV (in Russian).
2. **Bazhenov, Yu.M.** (2011) *Technology of concrete*. M.: Izd-vo ASV (in Russian).
3. **Shuldyakov, K.V., Trofimov, B.Ya. & Kramar, L.Ya.** (2020) Structural factor of concrete durability, *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i rkhitektura*, 20(1), pp. 46-51. DOI: 10.14529/build200105 (in Russian).
4. **Leonovich, S.N. & Prasol, A.V.** (2013) Reinforced concrete under conditions of chloride corrosion: deformation and destruction, *Stroitel'nye materialy*, 5, pp. 94-95 (in Russian).
5. **Strokovaya, V.V., Zhernovskiy, I.V., Nelyubova, V.V. & Rykunova, M.D.** (2019) Structural Transformations of Cement Stone in Conditions of Development of the Biocenosis of a Poultry Enterprise, *Materials Science Forum*, 945, pp. 269-275. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.269.
6. **Blikharskiy, Y., Selejdak, J., Kopsiika, N. & Vashkevych, R.** (2021) Study of Concrete under Combined Action of Aggressive Environment and Long-Term Loading, *Materials*, 14, p. 6612. DOI: 10.3390/ma14216612.
7. **Shcherban', E.M., Stel'makh, S.A., Beskopylny, A., Mailyan, L.R. & Meskhi, B.** (2022) Increasing the Corrosion Resistance and Durability of Geopolymer Concrete Structures of Agricultural Buildings Operating in Specific Conditions of Aggressive Environments of Livestock Buildings, *Applied Sciences*, 12(3), p. 1655. DOI: 10.3390/app12031655.
8. **De Gutiérrez, R.M.** (2003) mEffect of supplementary cementing materials on the concrete corrosion control, *Revista de Metalurgia*, 39, pp. 250-255.
9. **Rozenal, N.K., Stepanova, V.F. & Chekhny, G.V.** (2017) About maximum admissible content of chlorides in concrete, *Stroitel'nye materialy*, 1-2, pp. 82-85 (in Russian).
10. **Smolyago, G.A., Kryuchkov, A.A., Drokin, S.V. & Dronov, A.V.** (2014) Investigation of aspects of chloride corrosion of reinforced concrete structures, *Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova*, 2, pp. 22-24 (in Russian).
11. **Moskvin, V.M.** (1952) *Corrosion of concrete*. M.: Gosstroyizdat (in Russian).
12. **Sun, W., Liu, J., Yan, J. & Dai, Y.** (2016) Study on the Influence of Chloride Ions Content on the Sea Sand Concrete Performance, *American Journal of Civil Engineering*, 4(2), pp. 50-54. DOI: 10.11648/j.ajce.20160402.12.
13. **Neville, A.** (1995) Chloride attack of reinforced concrete: an overview, *Materials and Structures*, 28, P. 63. DOI:10.1007/BF02473172
14. **Zhu, X., Meng, Z., Liu, Y., Xu, L. & Chen, Z.** (2018) Entire Process Simulation of Corrosion due to the Ingress of Chloride Ions and CO<sub>2</sub> in Concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018. Article ID 9254865. DOI: 10.1155/2018/9254865.
15. **Gilmudtinov, T.Z., Fedorov, P.A. & Latypov, V.M.** (2016) Results of researches of the accelerated carbonization of concrete and cement stone in normal temperature and moist conditions of the environment, *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 1, pp. 155-162 (in Russian).
16. **Vasiliev, A.A.** (2021) Assessment of carbonization and development of its parameters during time crossed concrete for different operating conditions, *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*, 8, pp. 43-52 (in Russian).
17. **Ho, D.W.S. & Lewis, R.K.** (1987) Carbonation of concrete and its prediction, *Cement and Concrete Research*, 17(3), pp. 489-504. DOI: 10.1016/0008-8846(87)90012-3.
18. **Singh, N. & Singh, S.P.** (2016) Reviewing the Carbonation Resistance of Concrete, *Journal of materials and engineering structures*, 3, pp. 35-57.
19. **Cho, H.-C., Ju, H., Oh, J.-Y., Lee, K.J., Hahm, K.W. & Kim, K.S.** (2016) Estimation of Concrete



- Carbonation Depth Considering Multiple Influencing Factors on the Deterioration of Durability for Reinforced Concrete Structures, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016. Article ID 4814609. DOI: 10.1155/2016/4814609.
20. **Zhang, R., Liu, P., Ma, L., Yang, Z., Chen, H., Zhu, H.X., Xiao, H. & Li, J.** (2020) Research on the Corrosion/Permeability/Frost Resistance of Concrete by Experimental and Microscopic Mechanisms Under Different Water–Binder Ratios, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14, p. 10. DOI: 10.1186/s40069-019-0382-8.
  21. **Goncharova, N.I.** (2021) The Capillary Permeability of Concrete in Salt Media, *ISJ Theoretical & Applied Science*, 11(103), pp. 917-921. DOI: 10.15863/TAS.2021.11.103.107.
  22. **Bamforth, P.B.** (1991) The water permeability of concrete and its relationship with strength, *Magazine of Concrete Research*, 43(157), pp. 233-241. DOI: 10.1680/MACR.1991.43.157.233.
  23. **Li, X., Xu, Q., Chen, S.** (2016) An experimental and numerical study on water permeability of concrete, *Construction and Building Materials*, 105, pp. 503-510. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.184.
  24. **Zhang, Y., Xu, S., Fang, Z., Zhang, J. & Mao, C.** (2020) Permeability of Concrete and Correlation with Microstructure Parameters Determined by <sup>1</sup>H NMR, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020. Article ID 4969680. DOI: 10.1155/2020%2F4969680.
  25. **Villar, M.V., Martín, P.L., Romero, F.J., Gutiérrez-Rodrigo, V. & Barcala, J.M.** (2015) Gas and water permeability of concrete, *Geological Society, London, Special Publications*, 415, pp. 59-73. DOI: 10.1144/SP415.6.
  26. **Higerovich, M.I. & Bayer, V.E.** (1979) *Hydrophobic plasticizing additives for cements, mortars and concretes*. M: Stroyizdat (in Russian).
  27. **Dergunov, S.A., Rubtsova, V.N. & Orekhov, S.A.** (2009) Hydrophobization of mineral systems, *StroyPROfil*, 6 (76), pp. 17-20 (in Russian).
  28. **Massalimov, I.A., Yanakhmetov, M.R., Chuykin, A.E., Massalimov, B.I., Urakaev, F.H., Uralbekov, B.M. & Burkitbaev, M.M.** (2016) Hydrophobization of dense and fine concrete by polysulfide solutions, *Nanotekhnologii v stroitel'stve*, 8(5), pp. 85-99. DOI: 10.15828/2075-8545-2016-8-5-85-99 (in Russian).
  29. **Petrov, N.A., Konsev, G.V. & Davydova, I.N.** (2006) Negative and positive consequences of treatment of drilling fluids with liquids GKZH-10 (11, 11H), *Neftegazovoe delo*, 2, 7 p. [online]. Available at: [https://www.studmed.ru/neftegazovoe-delo-2006-01\\_2e771048ae6.html?ysclid=17efqu2n64601291978](https://www.studmed.ru/neftegazovoe-delo-2006-01_2e771048ae6.html?ysclid=17efqu2n64601291978) (in Russian).
  30. **Cappellesso, V.G., dos Santos Petry, N., Dal Molin, D.C.C. & Masuero, B.** (2016) Use of crystalline waterproofing to reduce capillary porosity in concrete, *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 1, p. 9. DOI: 10.1007/s41024-016-0012-7.
  31. **Skutnik, Z., Sobolewski, M. & Koda, E.** (2020) An Experimental Assessment of the Water Permeability of Concrete with a Superplasticizer and Admixtures, *Materials*, 13(24), p. 5624. DOI: 10.3390/ma13245624.
  32. **Khristoforov, A.I., Khristoforova, I.A. & Eropov, O.L.** (2011) Modification of Concrete and Organic Nanoparticles Substances, *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*, 4(6), pp. 704-710 (in Russian).
  33. **Ramachandran, V.S.** (1988) *Concrete admixtures*. M.: Stroyizdat (in Russian).
  34. **Dai, J.-G., Akira, Y., Wittmann, F., Yokota, H. & Zhang, P.** (2010) Water repellent surface impregnation for extension of service life of reinforced concrete structures in marine environments: The role of cracks, *Cement and Concrete Composites*, 32, pp. 101-109. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.11.001.
  35. **Moroz, M.N., Petukhov, A.V. & Kalashnikov, V.I.** (2014) Fine-grained concrete on carbonate and argil cindery binders, water repellent with zinc stearate, *Molodoj uchenyj*, 13, pp. 59-61 (in Russian).
  36. **Dong, B., Wang, F., Abadikhah, H., Hao, L.Y., Xu, X., Khan, S.A., Wang, G. & Agathopoulos, S.** (2019) Simple Fabrication of Concrete with Remarkable Self-Cleaning Ability, Robust Superhydrophobicity, Tailored Porosity, and Highly Thermal and Sound Insulation, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11,



pp. 42801-42807. DOI: 10.1021/acsami.9b14929.

37. Fedosov, S.V., Akulova, M.V., Slizneva, T.E., Koksharov, S.A., Akhmadulina, A.S. & Okolova, Yu.A. (2016) Application of mechanic and magnetic activated liquid glass water solutions for fine-grained composites modifying, *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti*, 6 (366), pp. 58-65 (in Russian).
38. Wong, H.S., Barakat, R., Al Hilali, A., Saleh, M. & Cheeseman, C.R. (2015) Hydrophobic concrete using waste paper sludge ash, *Cement and Concrete Research*, 70, pp. 9-20. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.01.005.
39. Mora, E., González, G., Romero, P. & Castellón, E. (2019) Control of water absorption in concrete materials by modification with hybrid hydrophobic silica particles, *Construction and Building Materials*, 221, pp. 210-218. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.086.
40. Moroz, M.N., Kalashnikov, V.I. & Petukhov, A.V. (2014) Frost resistance of water repellent concrete, *Molodoj uchenyj*, 19, pp. 222-225 (in Russian).
41. Zhu, Y.-G., Kou, S.-C., Poon, C.-S., Dai, J.-G. & Li, Q.-Y. (2013) Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Composites*, 35(1), pp. 32-38. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.008.
42. Trofimova, I.A. (2017) Analytical review of research phizic-mechanical properties of concretes with volume hydrophobization, *Visnik Pridniprovs'koï derzhavnoi akademii budivnictva ta arhiekturi*, 4(231-232), pp. 77-82 (in Russian).
43. Nesvetaev, G.V., Kozlov, A.V. & Filonov, I.A. (2013) The influence of some water-repellent additives on the change in the strength of cement stone, *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2(25), 134 p. (in Russian).
44. Al-Kheetan, M.J., Rahman, M.M. & Chamberlain, D.A. (2018) Development of hydrophobic concrete by adding dual-crystalline admixture at mixing stage, *Structural Concrete*, 19(5), pp. 1504-1511. DOI: 10.1002/suco.201700254.
45. Butt, Yu.M., Okorokov, S.D., Sychev, M.M. & Timashev, V.V. (1965) *Technology of binders*. M.: Vysshaya shkola (in Russian).
46. Gjörv, O.E. (2011) Durability of Concrete Structures, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 36, pp. 151-172. DOI: 10.1007/s13369-010-0033-5.
47. Iffat, S. (2015) Relation Between Density and Compressive Strength of Hardened Concrete, *Concrete Research Letters*, 6(4), pp. 182-189.
48. Nie, Q., Zhou, C., Shu, X., He, Q. & Huang, B. (2014) Chemical, Mechanical, and Durability Properties of Concrete with Local Mineral Admixtures under Sulfate Environment in Northwest China, *Materials*, 7(5), pp. 3772-3785. DOI: 10.3390/ma7053772.
49. Konovalova, V.S. (2021) Influence of chloride-containing media on the protective properties of concrete, *Lecture Notes in Civil Engineering*, 95, pp. 260-265. DOI: 10.1007/978-3-030-54652-6\_39.

Received 28.08.2022

Approved after reviewing 02.09.2022

Accepted 15.09.2022