

УДК 691.5

## Взаимосвязь факторов, определяющих долговечность бетонов

Л. Ф. Казанская<sup>1</sup>, В. А. Майер<sup>1</sup>, Э. С. Сибгатуллин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

<sup>2</sup> Набережночелнинский институт (филиал) Казанского федерального университета, Россия, 423812, Набережные Челны, ул. Строителей, 1

**Для цитирования:** Казанская Л. Ф., Майер В. А., Сибгатуллин Э. С. Взаимосвязь факторов, определяющих долговечность бетонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21. Вып. 4. С. 931–943. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-931-943

### Аннотация

**Цель:** показать влияние различных факторов, таких как водоцементное отношение, карбонизация, проникновение хлоридов и морозостойкость, на долговечность бетона и его способность защищать арматуру от коррозии. **Методы:** применены методы анализа и моделирования. На основе сравнительного исследования существующих данных, норм и научных публикаций рассмотрены взаимосвязи между водоцементным отношением, глубиной проникновения хлоридов, карбонизацией и морозостойкостью бетона, а также их влияние на коррозионную стойкость арматурной стали. **Результаты:** установлено, что водоцементное отношение является одним из важнейших параметров, определяющих долговечность бетона. Повышение водоцементного отношения ведет к увеличению глубины проникновения хлоридов и ускорению процессов карбонизации, что в конечном итоге снижает коррозионную стойкость арматуры и долговечность бетонных конструкций. **Практическая значимость:** в производственных условиях обеспечение долговечности бетонных конструкций требует комплексного подхода, учитывающего не только прочностные характеристики, но и широкий спектр других показателей, непосредственно влияющих на эксплуатационные свойства бетона. Для конкретных условий эксплуатации наиболее важными могут оказаться такие свойства, как морозостойкость, плотность, устойчивость к агрессивным средам и биологическим воздействиям, трещиностойкость и способность противостоять карбонизации.

**Ключевые слова:** долговечность бетона, водоцементное отношение, прочность, морозостойкость, плотность, устойчивость к агрессивным средам

### Введение

Долговечность — это способность материала или конструкции сохранять свои физико-механические свойства и эксплуатационные характеристики в течение длительного времени при воздействии различных факторов окружающей среды, таких как влага, температура, химические агенты и механические нагрузки. Долговечность бетона, например, зависит от его устойчивости к таким процессам, как

карбонизация, проникновение хлоридов, коррозия арматуры, а также его морозостойкости и устойчивости к химическим воздействиям. Долговечность измеряется количеством времени, в течение которого материал сохраняет свои функции без значительного ухудшения.

Надежность — это комплексное понятие, включающее в себя не только долговечность, но и способность конструкции или материала

безотказно выполнять свои функции в заданных условиях эксплуатации. Надежность характеризуется такими параметрами, как прочность, устойчивость к нагрузкам и внешним воздействиям, а также вероятность возникновения дефектов и повреждений. В контексте характеристик бетона надежность включает в себя как его долговечность, так и способность выдерживать заданные эксплуатационные нагрузки без разрушений или значительных повреждений.

Тогда можно считать, что долговечность является одной из составляющих надежности и отвечает за сохранность конструкциями или материалами своих свойств, а надежность включает в себя также их способность эффективно функционировать в течение этого времени и при этом не выходить из строя. Этому вопросу посвящены работы многих исследователей как конца прошлого века [1], так и в современных реалиях [2–6].

Структура бетона представляет собой сложную композитную систему, которая непрерывно трансформируется. Причем в этой системе изменения происходят независимо от того, каким качественным был бетон при его укладке. Важно понимать, что долговечность бетона тесно связана с его способностью сохранять свои эксплуатационные характеристики на протяжении всего запланированного срока службы при условии надлежащего ухода и поддержания. Это и приводит к активизации научных исследований в области обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций [7–10].

Влияние на долговечность бетона может оказываться через несколько основных механизмов: физические (например, воздействие мороза), химические (сульфатные растворы), биологические (например, бактерии) и механические (механический износ). Основное

воздействие этих факторов происходит на поверхностных участках бетонных конструкций, и их интенсивность усиливается при наличии влаги.

История строительных технологий свидетельствует о том, что забота о долговечности и надежности сооружений имеет глубокие корни, уходящие в далекое прошлое. Одним из ранних свидетельств законодательного регулирования качества строительства является Кодекс Хаммурапи, датируемый 1700 годом до нашей эры, который устанавливал строгие правила, касающиеся качества строительных сооружений, и предусматривал суровые наказания за нарушения. Жесткие меры за некачественное строительство оставались в силе вплоть до Средних веков, и это подчеркивает, что долговечность и надежность строительных сооружений всегда имели важное значение и были предметом как законодательного регулирования, так и общественной оценки.

В настоящее время требования к качеству и долговечности строительных сооружений регулируются разнообразными нормами, стандартами и положениями строительного надзора. Соблюдение этих нормативных требований позволяет обеспечить долговечность бетонных конструкций, а также минимизировать расходы на их уход и обеспечить длительный срок эксплуатации без существенного ухудшения эксплуатационных характеристик.

### **Методы и материалы исследования**

Применены методы анализа и моделирования. На основе сравнительного исследования существующих данных, норм и научных публикаций рассмотрены взаимосвязи между водоцементным отношением, глубиной проникновения хлоридов, карбонизацией

и морозостойкостью бетона, а также их влияние на коррозионную стойкость арматурной стали.

Материалами стали бетоны на основе портландцемента ЦЕМ-I с классами прочности 32,5, 42,5 и 52,5 МПа.

## Результаты

Водоцементное отношение является одним из ключевых аспектов, определяющих долговечность бетона, оно взаимосвязано со следующими факторами.

### *Объем пор и плотность*

Плотность бетона, которая определяется объемом пор, является критическим фактором, влияющим на его долговечность. Проникновение агрессивных веществ в бетон происходит преимущественно через капиллярные поры цементного камня, поры в контактной зоне между цементным камнем и заполнителем, а также через микротрещины. Особое значение для долговечности бетона имеет область капиллярных пор размером от 10 нм до 100 мкм. Чем меньше размер и количество таких пор, тем выше плотность и, следовательно, устойчивость бетона к проникновению агрессивных веществ.

Исследования показывают, что сопротивление гелевых пор ( $< 10$  нм) проникновению агрессивных сред чрезвычайно высоко. Для водопроницаемости цементного камня ключевыми факторами являются водоцементное отношение и степень гидратации. Как видно из рис. 1, при водоцементном отношении 0,5–0,55 и степени гидратации  $> 80$  % водопроницаемость остается на низком уровне. Однако при увеличении водоцементного отношения до 0,5 и снижении степени гидратации до 60 %, водопроницаемость возрастает в 10 раз. В случае полного увлажнения при водоцементном отношении

0,5–0,7 водопроницаемость может увеличиться в 15 раз.

Важно понимать, что одинаковый класс прочности бетона не означает одинаковую долговечность, большую роль играет высокая плотность бетона.

### *Прочность при сжатии*

Прочность при сжатии бетона, хотя и является важным показателем, не всегда коррелирует с его долговечностью. Бетон высокого класса прочности может быть получен при различном водоцементном отношении, что влияет на его проницаемость и, соответственно, долговечность.

На рис. 2 представлено увеличение водоцементного отношения при одинаковом классе прочности бетона.

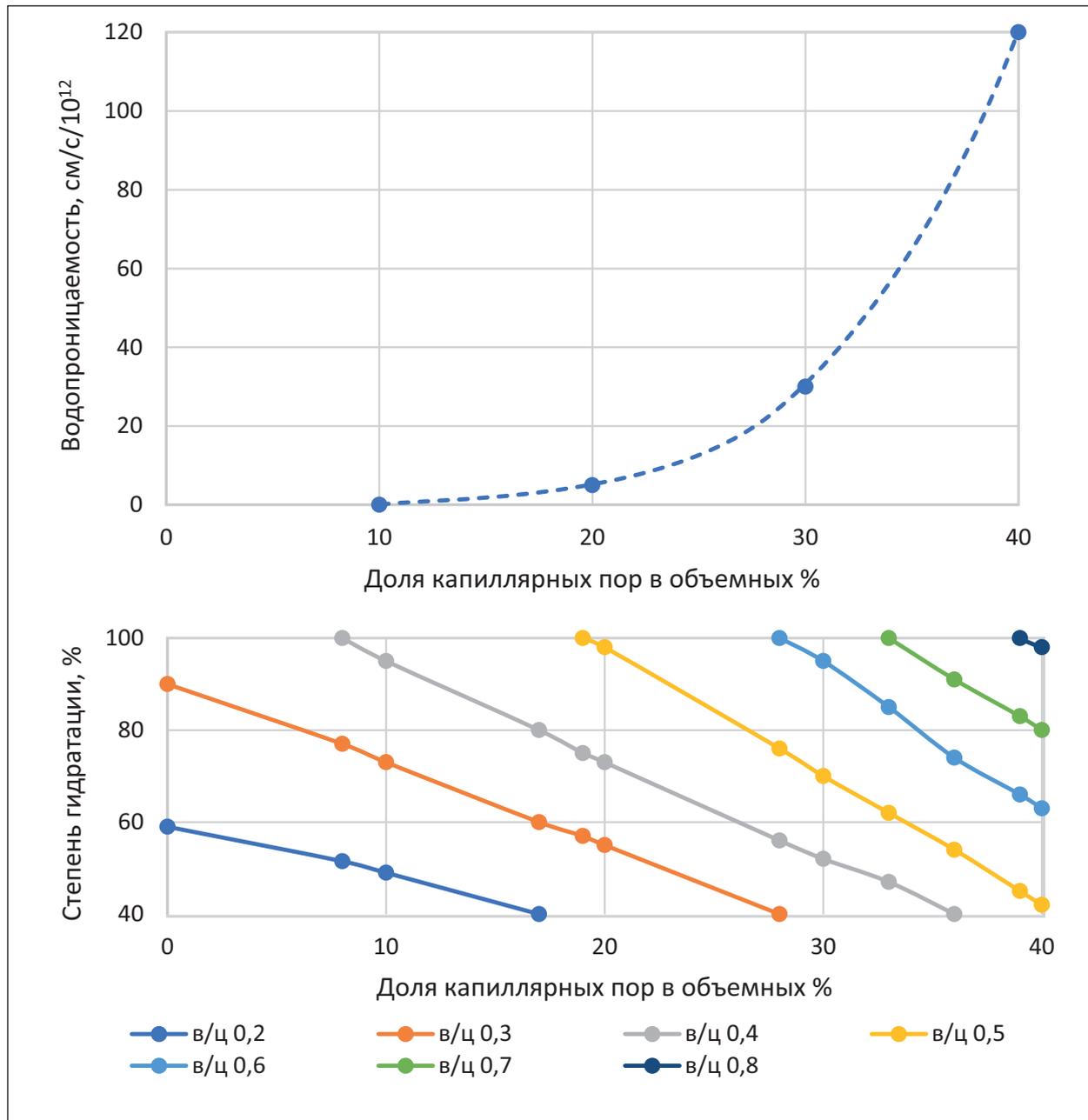
Примером может служить бетон В25 (заданная прочность 35 Н/мм<sup>2</sup>), который можно получить с различными водоцементными отношениями:

- класс прочности цемента 32,5 —  $v/c = 0,50$ ;
- класс прочности цемента 42,5 —  $v/c = 0,62$ .

Во втором случае проницаемость бетона выше в 4 раза, что делает его менее долговечным. Прочность бетона обусловлена в первую очередь цементирующими свойствами гидросиликатов кальция, образующихся при гидратации цемента.

### *Глубина проникновения воды*

Глубина проникновения воды определяется при постоянном нахождении в воде до момента испытания. Увеличение водоцементного отношения с 0,4 до 0,6 независимо от возраста бетона ведет к увеличению глубины проникновения воды примерно в 2 раза. Этот процесс показан на рис. 3.



**Рис. 1.** Водопроницаемость цементного камня в зависимости от капиллярной пористости, водоцементного отношения и степени гидратации

### Газопроницаемость

Проницаемость — это способность материала, в данном случае бетона, пропускать жидкости или газы через свою пористую структуру под воздействием внешнего давления. Проникновение происходит через сеть пор

и трещин, которые образуются в результате различных факторов.

Газопроницаемость является важным критерием, определяющим защищенность арматуры от коррозии. Чем меньше газопроницаемость бетона, тем выше его сопротивление

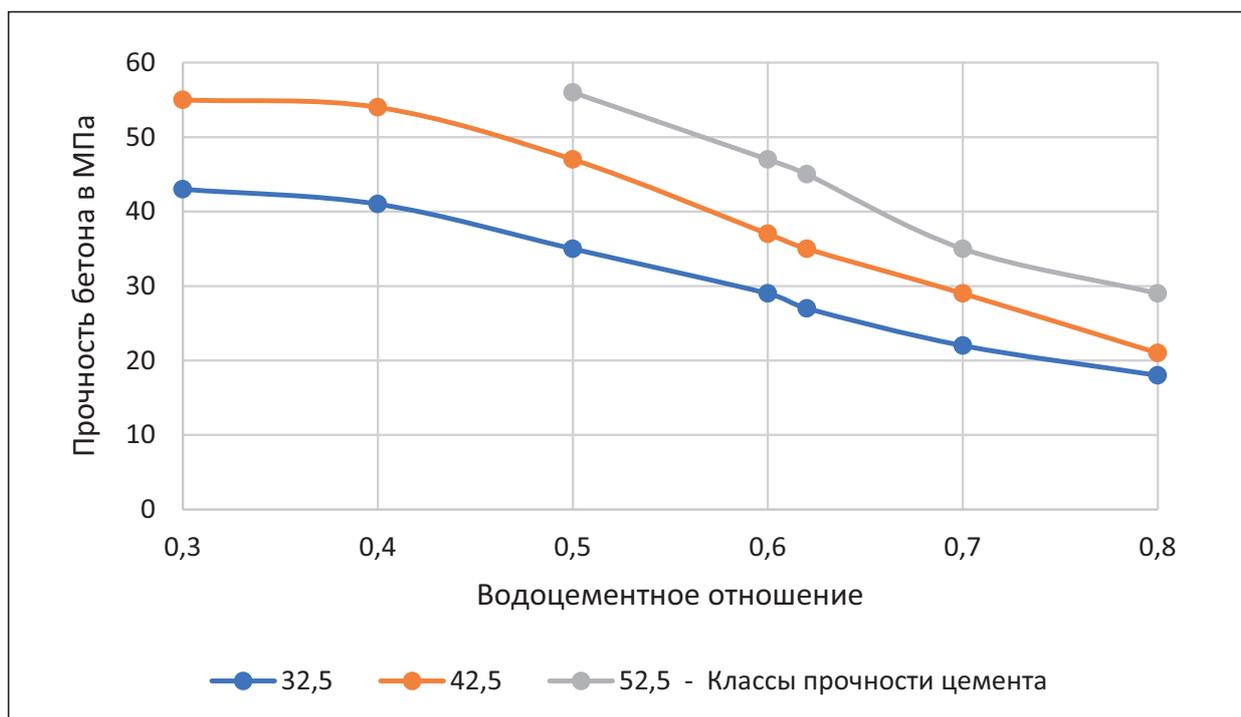


Рис. 2. Увеличение водоцементного отношения при одинаковом классе прочности бетона

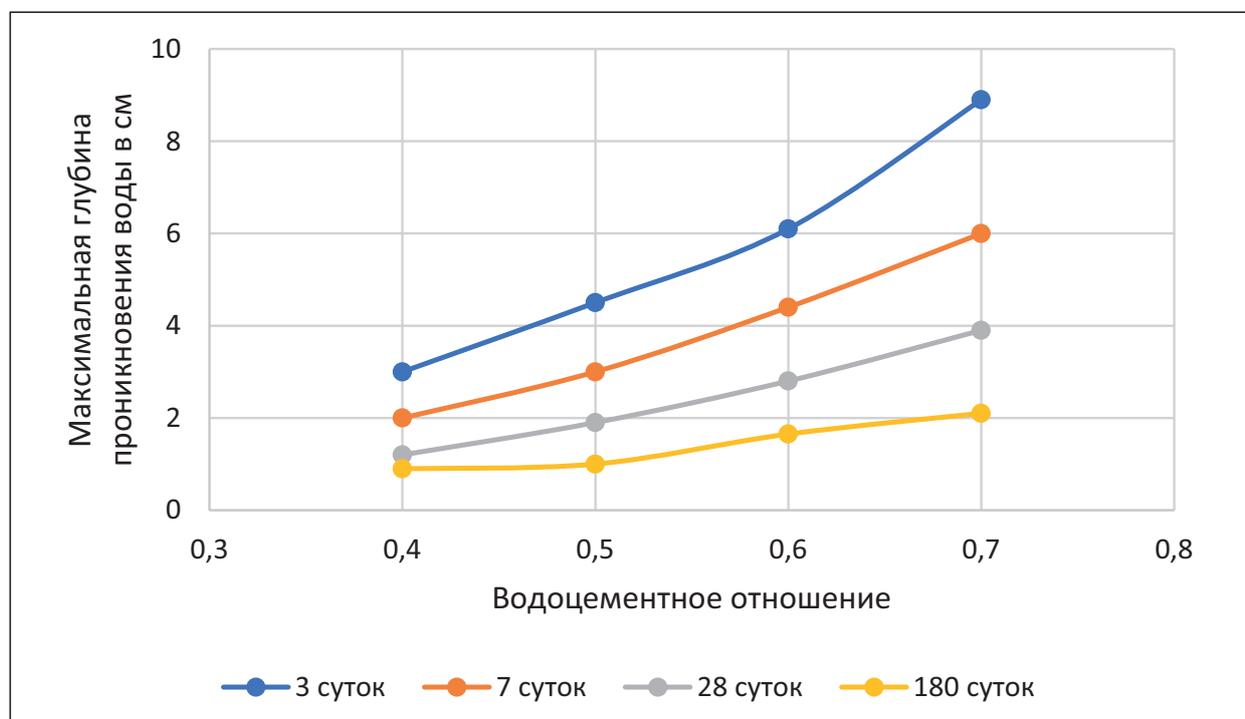


Рис. 3. Максимальная глубина проникновения воды в зависимости от водоцементного отношения и возраста бетона

проникновению углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), вызывающего карбонизацию, и кислорода ( $\text{O}_2$ ), способствующего коррозии стали. При повышении водоцементного отношения газопроницаемость значительно возрастает, особенно при недостаточном последующем уходе за бетоном.

На практике тщательный уход за бетоном при водоцементном отношении до 0,7 может обеспечить лишь незначительное увеличение газопроницаемости. Однако учитывая, что такой уход редко реализуется в реальных условиях, водоцементное отношение  $\geq 0,7$  не рекомендуется для конструкций, подверженных коррозионным воздействиям.

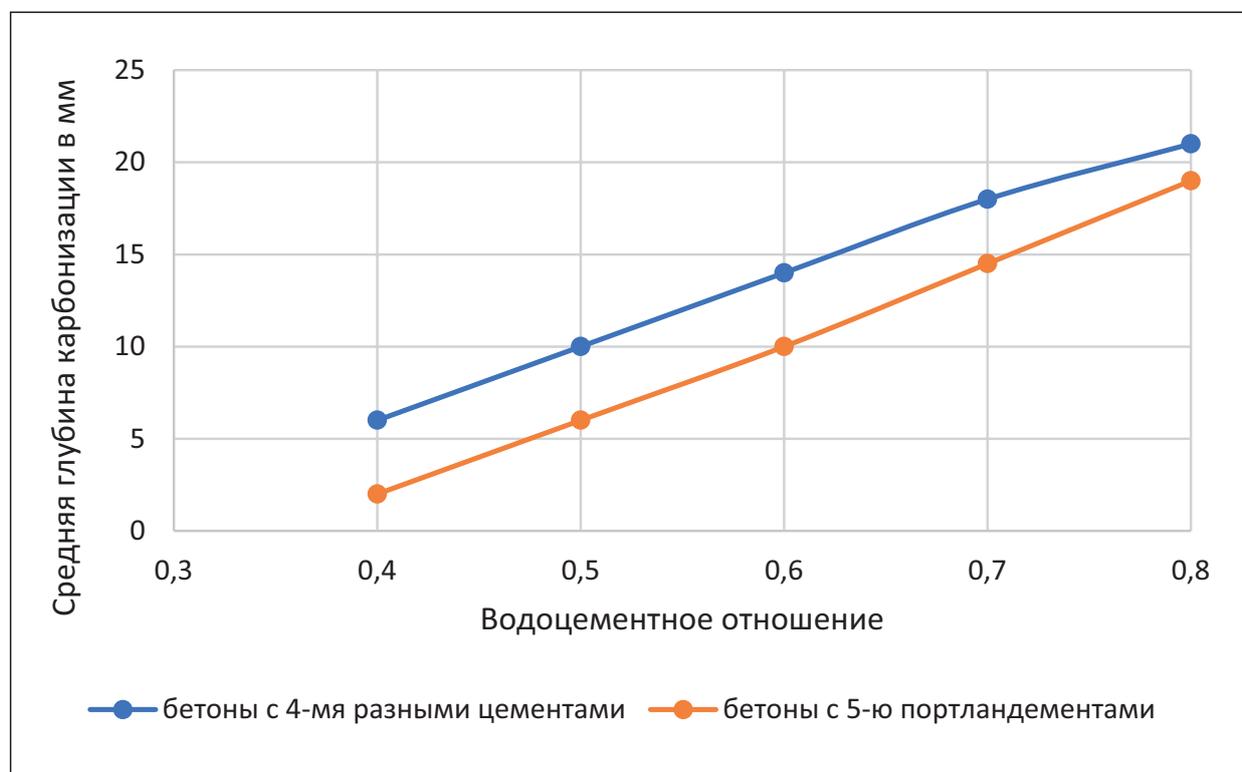
### Карбонизация

Карбонизация бетона — это процесс, который включает взаимодействие оксида угле-

рода ( $\text{CO}_2$ ) с гидратированными продуктами цементного камня, например с гидроксидом кальция ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Такой процесс вызывает химические изменения в структуре бетона из-за образования карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ), который уплотняет структуру цементного камня, уменьшает его пористость и улучшает механические свойства, такие как прочность и стойкость к проникновению воды.

Карбонизация цементного камня является процессом, зависящим от водоцементного отношения. Глубина карбонизации увеличивается линейно с увеличением водоцементного отношения, что можно увидеть на рис. 4.

Чем выше водоцементное отношение, тем глубже проникает углекислый газ, ускоряя процесс карбонизации и снижая долговечность бетона. К тому же в процессе карбонизации pH раствора в порах бетона снижается



**Рис. 4.** Влияние водоцементного отношения на глубину карбонизации бетонов с различными цементами. Возраст бетона 8 лет. Выдерживание:  $T = 20^\circ\text{C}$ , относительная влажность воздуха 65 % [1]

с 12,5–13,5 до значений, близких к нейтральным (около 9). Такое снижение pH приводит к разрушению пассивного защитного слоя на поверхности арматуры, делая ее уязвимой к коррозии. Диффузия оксида углерода в бетоне происходит значительно быстрее в газовой фазе, чем в воде. Поэтому карбонизация быстрее развивается в зонах бетона с низкой влажностью, особенно при относительной влажности воздуха 50–80 %. При повышенной влажности (близкой к 100 %) или в полностью насыщенном влагой бетоне карбонизация замедляется, так как доступ  $\text{CO}_2$  к внутренним слоям цементного камня ограничен.

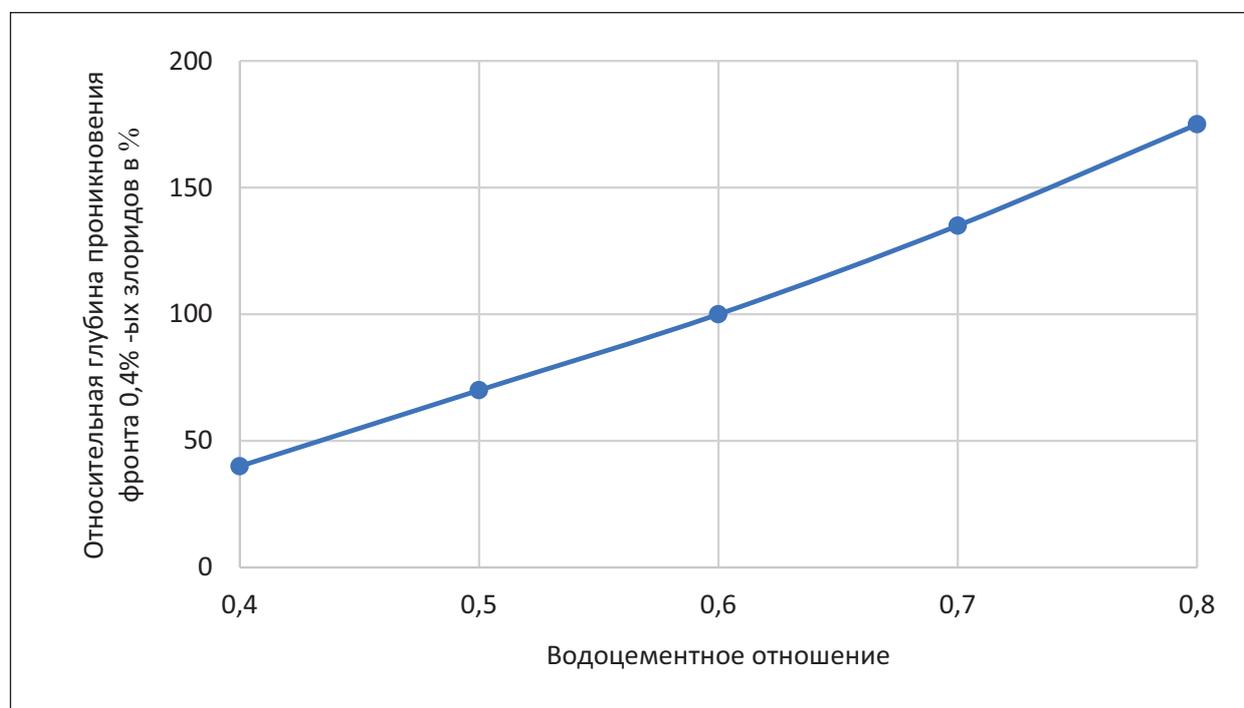
### Глубина проникновения хлоридов

Глубина проникновения хлоридов в бетон значительно зависит от водоцементного отношения. Исследования показывают, что при повышении водоцементного отношения с 0,4 до

0,8 глубина проникновения хлоридов может увеличиваться в 2–3 раза. Этот эффект особенно заметен при выдерживании бетона в 4%-м растворе хлорида натрия, где наблюдается почти линейная зависимость между водоцементным отношением и глубиной проникновения хлоридов (рис. 5).

### Коррозия арматуры

Одним из основных факторов, влияющих на долговечность железобетонных конструкций, является коррозия арматурной стали, в первую очередь из-за воздействия хлоридов [11]. В этом случае водоцементное отношение и толщина защитного слоя бетона являются критическими характеристиками, влияющими на коррозию арматуры. Ее можно существенно уменьшить за счет увеличения толщины защитного слоя в случае водоцементного отношения до 0,55. Однако при водоцементном отношении,



**Рис. 5.** Влияние водоцементного отношения на относительную глубину проникновения хлоридов. Хранение под водой в 4 %-м растворе Cl, возраст 12 месяцев [1]

превышающем 0,6, даже значительная толщина защитного слоя не может эффективно защитить арматуру от коррозии (рис. 6).

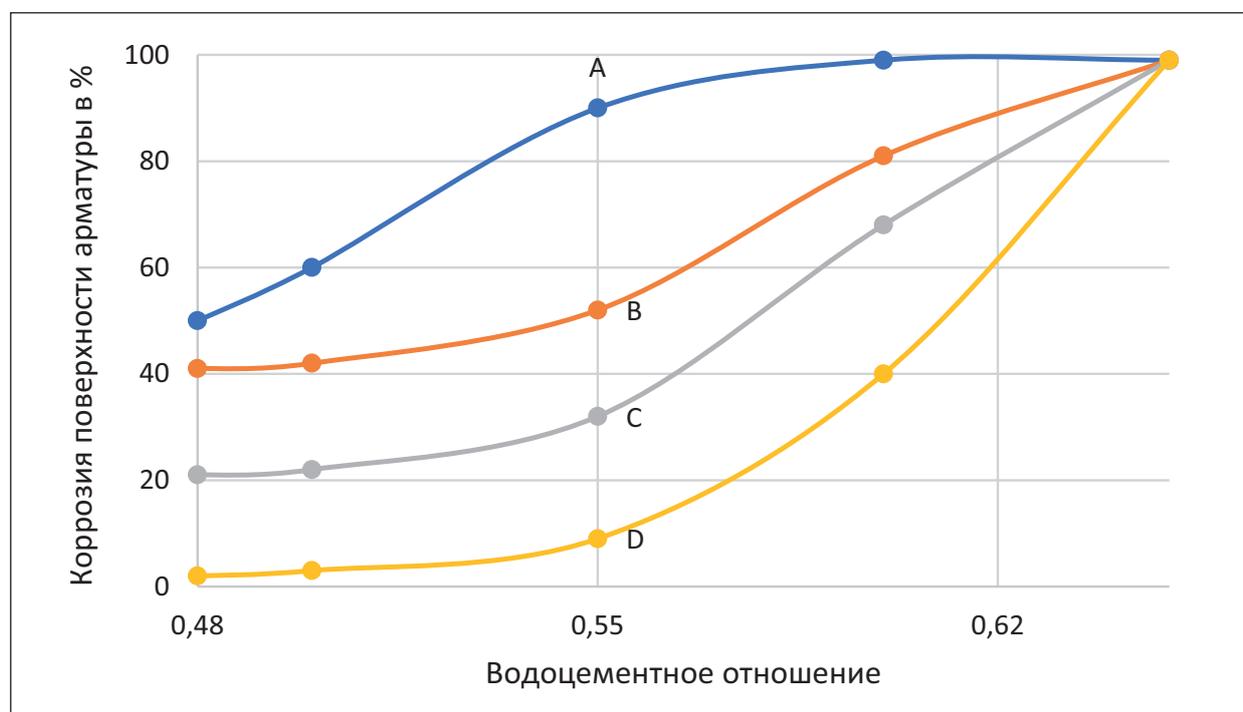
### Морозостойкость

Морозостойкость бетона и его способность сопротивляться воздействию солей для размораживания уменьшаются с увеличением водоцементного отношения. Для значительного повышения морозостойкости и устойчивости к воздействию солей можно использовать воздушные микропоры диаметром до 300 мкм. Увеличение водоцементного отношения ведет к росту объема капиллярных пор, в которых при температуре до  $-20^{\circ}\text{C}$  замерзает вода. Вода замерзает преимущественно в более крупных капиллярных порах, что приводит к разрушению структуры бетона. Бетоны с низким водоцементным

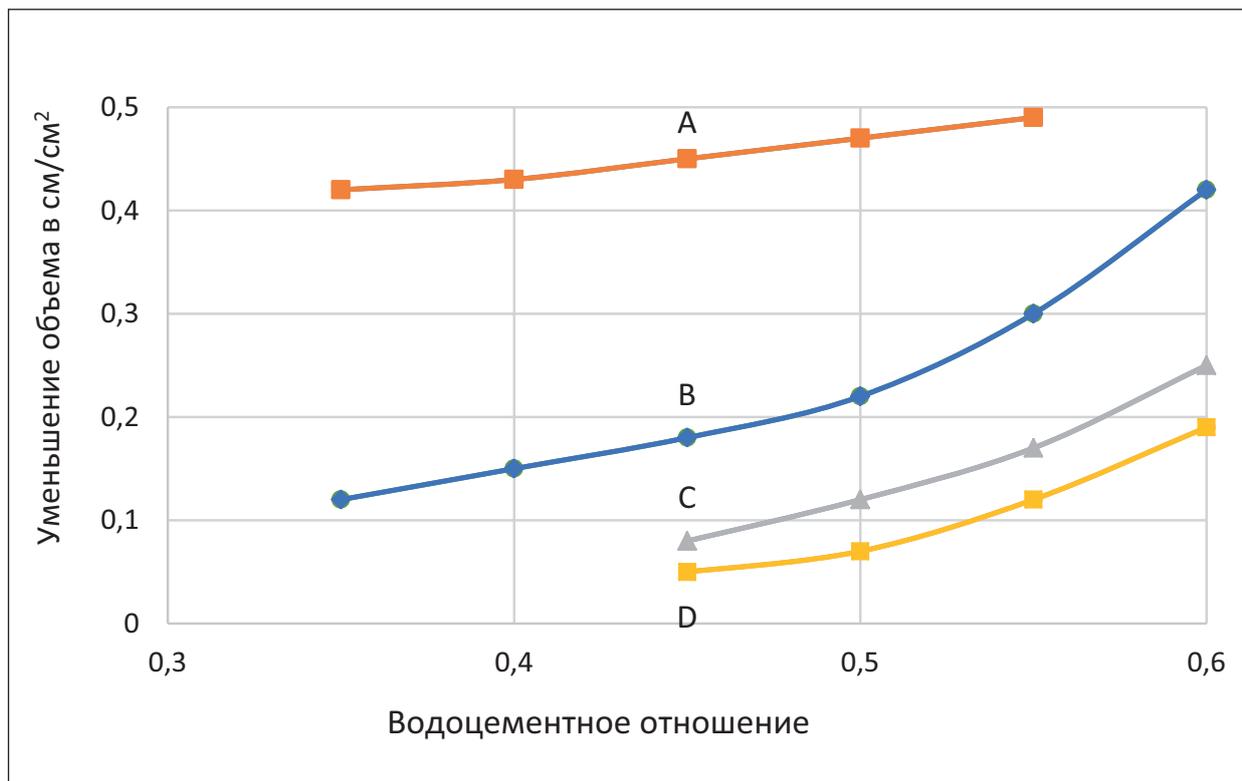
отношением ( $\leq 0,4$ ) и 100%-й гидратацией цемента более устойчивы к замерзанию. Однако даже при низком водоцементном отношении для дополнительной защиты бетона целесообразно создание воздушных пор (рис. 7).

Таким образом, можно констатировать, что между водоцементным отношением и долговечностью бетона существует четкая зависимость. Увеличение водоцементного отношения негативно влияет на многие технологические характеристики бетона, включая его прочность, морозостойкость, водонепроницаемость и устойчивость к химическим воздействиям. Поэтому водоцементное отношение играет решающую роль в обеспечении долговечности бетонных конструкций.

Установлены верхние границы водоцементного отношения (в/ц) для обеспечения долго-



**Рис. 6.** Коррозия и поверхность арматуры в зависимости от водоцементного отношения и защитного слоя при воздействии NaCl: А — 19 мм; В — 25 мм; С — 38 мм; D — 50 мм. Возраст — 2 года. Сбрызгивание 1 раз в день 3%-м раствором NaCl [1]



**Рис. 7.** Сопротивление воздействию мороза и размораживающей соли в зависимости от водоцементного отношения и содержания активных воздушных пор:  
 А — без порообразователя; В — P 300 = 1,0 %; С — P 300 = 1,5 %; D — P 300 = 2,0 %. 50 циклов «замораживание/оттаивание» в 3 %-м растворе NaCl. Активные воздушные поры P диаметром < 300 мк. Начало испытаний — после 28 суток нормального твердения [1]

вечности бетона, о чем упоминается в различных публикациях [12]. Для стабильного качества бетона и долговечности конструкций водоцементное отношение должно быть уменьшено на 0,05 от проектного значения, учитывая возможные отклонения в процессе строительства. Например, для изделий из очень жесткого бетона ( $v/c < 0,40$ ) уменьшение водоцементного отношения не требуется.

Для бетона, подверженного воздействию сульфатов, рекомендуется применение цемента высоких марок. В случае применения летучей золы или других добавок водоцементное отношение корректируется в зависимости от конкретных требований и условий эксплуатации.

### Обсуждение

На основе представленных результатов можно отметить, что для достижения требуемого уровня долговечности бетонных конструкций необходимо учитывать ряд условий:

1. Четкая концепция проектирования: на этапе проектирования важно предусмотреть все аспекты назначения и эксплуатации конструкции. Концепция должна охватывать вопросы дизайна, функциональности и долговечности.
2. Невосприимчивость конструкции к ошибкам: конструкция должна обладать достаточным запасом прочности, чтобы компенсировать

возможные ошибки в процессе изготовления и монтажа.

3. Качественное исполнение и эксплуатация: исключение небрежности на этапах строительства и эксплуатации является критически важным для сохранения долговечности бетонных конструкций.

Серьезное внимание следует уделить таким факторам, как качество исходных материалов, влияние окружающей среды и правильное применение строительных технологий [13, 14].

### Заключение

Проведенное исследование позволило заключить, что повышение водоцементного отношения ведет к увеличению глубины проникновения хлоридов и ускорению процессов карбонизации, что в конечном итоге снижает коррозионную стойкость арматуры и долговечность бетонных конструкций.

Обеспечение долговечности бетонных конструкций требует комплексного подхода, учитывающего не только прочностные характеристики, но и широкий спектр других показателей, непосредственно влияющих на эксплуатационные свойства бетона. Для конкретных условий эксплуатации наиболее важными могут оказаться такие свойства, как морозостойкость, плотность, устойчивость к агрессивным средам и биологическим воздействиям, трещиностойкость и способность противостоять карбонизации.

И хочется повторить, что для достижения долговечности бетонных и железобетонных конструкций необходимо строго контролировать водоцементное отношение, применять качественные добавки и соблюдать нормы ухода за бетоном. Дополнительные меры пассивной защиты, такие как пропитка и нанесение защитных покрытий, могут существенно

продлить срок службы железобетонных конструкций, особенно в условиях агрессивного воздействия окружающей среды.

### Библиографический список

1. Stark J., Wicht B. Dauerhaftigkeit von beton. Springer-Verlag, 2013. 479 p.
2. Беленцов Ю.А., Казанская Л.Ф. Неразрушающие методы контроля качества как фактор надежности бетонных и железобетонных конструкций в транспортных сооружениях // Транспортные системы и технологии. 2018. Т. 4, № 1. С. 58–67.
3. Бредихин В.В., Бредихина Н.В. Учет факторов, влияющих на долговечность конструкций из бетона и железобетона, при технической экспертизе // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сб. науч. тр. 6-й Междунар. молодежн. науч.-практ. конф. (Курск, 13 ноября 2019 года). Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. С. 53–58.
4. Братошевская В. В. Долговечность бетона при воздействии органических сред // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: сб. ст. по материалам конф. архитектурно-строительного факультета (Краснодар, 20 мая 2022 года). Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина, 2022. С. 8–12.
5. Братошевская В. В., Мирсоянов В.Н., Мирсоянов Р.В. Факторы, влияющие на напряженное состояние в структуре цементного камня // Эффективные строительные конструкции: теория и практика: сб. ст. XIV Междунар. науч.-техн. конф. (Пенза, 30 ноября 2014 года) / под ред. Н.Н. Ласькова. Пенза: Приволжский Дом знаний, 2014. С. 26–29.
6. Добшиц Л.М., Николаева А.А. Долговечность бетонных конструкций, подвергающихся циклическому увлажнению и высушиванию // Студент-инновации России. 2019. № 4. С. 41–44.
7. Добшиц Л.М. Долговечность бетона и пути ее повышения // Наука — строительному производ-

ству: сб. науч. тр. к 60-летию института. М.: НИИ-Мосстрой, 2016. С. 214–229.

8. Евсеев А.В., Черкасов А.В., Веселова П.А. К вопросу о долговечности бетона из вторсырья // Перспективы науки. 2020. № 11(134). С. 236–237.

9. Казанская Л.Ф., Черепанова Д.А. Оценка влияния на бетон внешних и внутренних воздействий как фактор снижения затрат на эксплуатацию объектов транспортного строительства // Развитие экономической науки на транспорте: мобильность, доступность, интеграция транспорта в экономике независимости: сб. науч. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф. (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 8 декабря 2023 года). М.: Магистраль, 2023. С. 98–108.

10. Долговечность бетона и железобетона в газовой среде предприятий нефтехимии и нефтепереработки / П.А. Федоров [и др.] // Строительные материалы. 2021. № 11. С. 16–22.

11. Коррозия бетона и железобетона. Методы их защиты / В.М. Москвин [и др.]. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.

12. Рябчиков П.В., Батыновский Э.И., Якимович В. Д. Об особенностях подбора состава и технологии производства тяжелого высокопрочного бетона,

включая введение в состав углеродных наноматериалов // Современные проблемы внедрения европейских стандартов в области строительства. 2014. С. 136–141.

13. Шестакова Е.Б., Кузьминов О.О. Долговечный бетон для современных прогрессивных конструкций // Путевой навигатор. 2021. № 49(75). С. 44–51.

14. Шулдяков К.В., Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я. Структурный фактор долговечности бетона // Наука ЮУрГУ: материалы 70-й науч. конф. (Челябинск, 25 апреля — 4 мая 2018 года). Челябинск: ИЦ ЮУрГУ, 2018. С. 169–177.

Дата поступления: 19.08.2024

Решение о публикации: 26.09.2024

#### Контактная информация:

КАЗАНСКАЯ Лилия Фаатовна — докт. техн. наук, профессор; yalifa@inbox.ru

МАЙЕР Виктория Александровна — аспирант кафедры «Строительные материалы и технологии»; vika.denisova.kos.a@mail.ru

СИБГАТУЛЛИН Эмер Сулейманович — докт. физ.-мат. наук, профессор кафедры строительства; ESSibgatullin@ksu.ru

## The relationship of factors determining the durability of concrete

L.F. Kazanskaya<sup>1</sup>, V.A. Mayer<sup>1</sup>, E. S. Sibgatullin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

<sup>2</sup> Naberezhnye Chelny Institute of Kazan (Volga region) Federal University, 1, Stroitelej st., Naberezhnye Chelny, 423812, Russia

**For citation:** Kazanskaya L. F., Mayer V. A., Sibgatullin E. S. The relationship of factors determining the durability of concrete // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 931–943. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-931-943

### Abstract

**Purpose:** to show the influence of various factors such as water-cement ratio, carbonation, chloride penetration and frost resistance on the durability of concrete and its ability to protect reinforcement from

corrosion. **Methods:** applied methods of analysis and modeling. Based on a comparative study of existing data, norms and scientific publications, the interrelationships between the water-cement ratio, the depth of chloride penetration, carbonation and frost resistance of concrete, as well as their effect on the corrosion resistance of reinforcing steel, are considered. **Results:** it has been established that the water-cement ratio is one of the most important parameters determining the durability of concrete. An increase in the water-cement ratio leads to an increase in the depth of chloride penetration and acceleration of carbonation processes, which ultimately reduces the corrosion resistance of reinforcement and the durability of concrete structures. **Practical significance:** in production conditions, ensuring the durability of concrete structures requires an integrated approach that takes into account not only strength characteristics, but also a wide range of other indicators that directly affect the performance properties of concrete. For specific operating conditions, properties such as frost resistance, density, resistance to aggressive media and biological influences, crack resistance and the ability to resist carbonation may be the most important.

**Keywords:** durability of concrete, water-cement ratio, strength, frost resistance, density, resistance to aggressive environments

## References

1. Stark J., Wicht B. *Dauerhaftigkeit von beton*. Springer-Verlag, 2013. 479 p.
2. Belencov Yu.A., Kazanskaya L.F. Nerazruchayushchie metody kontrolya kachestva kak faktor nadezhnosti betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij v transportnyh sooruzheniyah // *Transportnye sistemy i tekhnologii*. 2018. T. 4, No. 1. S. 58–67. (In Russian)
3. Bredihin V. V., Bredihina N. V. Uchet faktorov, vliyayushchih na dolgovechnost' konstrukcij iz betona i zhelezobetona, pri tekhnicheskoy ekspertize // *Kachestvo proizvodstva: kontrol', upravlenie, povyshenie, planirovanie*: sb. nauch. tr. 6-j Mezhdunar. molodezhnoj nauch.-prakt. konf. (Kursk, 13 noyabrya 2019 goda). Kursk: YUgo-Zapadnyj gosudarstvennyj universitet, 2019. S. 53–58. (In Russian)
4. Bratoshevskaya V. V. Dolgovechnost' betona pri vozdejstvii organicheskikh sred // *Obsledovanie zdaniy i sooruzhenij: problemy i puti ih resheniya*: sb. st. po materialam konf. arhitekturno-stroitel'nogo fakul'teta (Krasnodar, 20 maya 2022 goda). Krasnodar: Kubanskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet im. I. T. Trubilina, 2022. S. 8–12. (In Russian)
5. Bratoshevskaya V.V., Mirsoyanov V.N., Mirsoyanov R. V. Faktory, vliyayushchie na napryazhennoe sostoyanie v strukture cementnogo kamnya // *Effektivnye stroitel'nye konstrukcii: teoriya i praktika*: sb. st. XIV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Penza, 30 noyabrya 2014 goda) / pod red. N.N. Las'kova. Penza: Privolzhskij Dom znaniy, 2014. S. 26–29. (In Russian)
6. Dobshic L.M., Nikolaeva A.A. Dolgovechnost' betonnyh konstrukcij, podvergayushchihsya ciklicheskomu uvlazhneniyu i vysushivaniyu // *Student-innovacii Rossii*. 2019. No. 4. S. 41–44. (In Russian)
7. Dobshic L.M. Dolgovechnost' betona i puti ee povysheniya // *Nauka — stroitel'nomu proizvodstvu*: sb. nauch. tr. k 60-letiyu instituta. M.: NIIMosstroj, 2016. S. 214–229. (In Russian)
8. Evseev A.V., Cherkasov A.V., Veselova P. A. K voprosu o dolgovechnosti betona iz vtorsyr'ya // *Perspektivy nauki*. 2020. No. 11(134). S. 236–237. (In Russian)
9. Kazanskaya L.F., Cherepanova D.A. Ocenka vliyaniya na beton vneshnih i vnutrennih vozdeystvij kak faktor snizheniya zatrat na ekspluatatsiyu ob'ektov transportnogo stroitel'stva // *Razvitie ekonomicheskoy nauki na transporte: mobil'nost', dostupnost', integraciya transporta v ekonomike nezavisimosti*: sb. nauch. st. XI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 8 dekabrya 2023 goda). M.: Magistral', 2023. S. 98–108. (In Russian)
10. Dolgovechnost' betona i zhelezobetona v gazovoj srede predpriyatij neftekhimii i neftepererabotki / P. A. Fedorov [i dr.] // *Stroitel'nye materialy*. 2021. No. 11. S. 16–22. (In Russian)

11. Korroziya betona i zhelezobetona. Metody ih zashchity / V. M. Moskvina [i dr.]. M.: Strojizdat, 1980. 536 s. (In Russian)
12. Ryabchikov P.V., Batyanovskii E.I., YAKimovich V. D. Ob osobennostyakh podbora sostava i tekhnologii proizvodstva tyazhelogo vysokoprochnogo betona, vklyuchaya vvedenie v sostav uglerodnykh nanomaterialov // *Sovremennyye problemy vnedreniya evropeiskikh standartov v oblasti stroitel'stva*. 2014. S. 136–141. (In Russian)
13. Shestakova E.B., Kuz'minov O.O. Dolgovechnyy beton dlya sovremennykh progressivnykh konstruktsiy // *Putevoj navigator*. 2021. No. 49(75). S. 44–51. (In Russian)
14. Shuldyakov K.V., Kramar L.Ya., Trofimov B. Ya. Strukturnyy faktor dolgovechnosti betona // *Nauka YUUrGU: materialy 70-j nauch. konf. (Chelyabinsk, 25 aprelya — 4 maya 2018 goda)*. Chelyabinsk: IC YuUrGU, 2018. S. 169–177. (In Russian)

Received: 19.08.2024

Accepted: 26.09.2024

**Author's information:**

Liliya F. KAZANSKAYA — Dr. Sci. in Engineering, Professor; yalifa@inbox.ru

Victoria A. MAYER — Postgraduate Student; vika.denisova.kos.a@mail.ru

Emer S. SIBGATULLIN — Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor; ESSibgatullin@ksu.ru