

В.Р. ФАЛИКМАН¹, Н.С. ДМИТРИЕВ^{1,2,✉}

¹ Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, стр. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

² АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, стр. 1, г. Москва, 109428, Российская Федерация

КРИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СТАНДАРТИЗИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТОЙКОСТИ БЕТОНА К КАРБОНИЗАЦИИ

Аннотация

Основная часть. В статье рассмотрены рекомендации по предварительной подготовке и выдержке образцов, приведенные в существующих отечественных и зарубежных стандартах испытаний карбонизации бетонов. Условия воздействия ускоренной карбонизации влияют на механизм процессов и степень изменений, которые испытывает материал. В будущих итерациях стандартов приоритетным должно стать понятие «индекса зрелости». Необходимо обеспечить прямое сравнение результатов различных исследований и улучшить понимание того, как внутренние свойства отдельных видов бетона связаны с их устойчивостью к карбонизации, определить принципы точного перевода скоростей карбонизации при ускоренных испытаниях в скорость карбонизации в естественных условиях для различных типов бетона. В статье рассмотрены подходы к проектированию долговечности железобетонных конструкций, основанные на предписывающих и эксплуатационных характеристиках. Часто прямая корреляция между коэффициентом карбонизации и прочностью на сжатие в бетонах с минеральными добавками не выявляется, особенно когда эксплуатационные характеристики определяются при ускоренных испытаниях. Поэтому модели деградации таких бетонов под воздействием углекислого газа при полувероятностных, вероятностных расчетах и оценке срока службы нуждаются в определенном уточнении.

Выводы. Существующие стандарты на определение глубины карбонизации имеют значительные отличия друг от друга, в частности в вариантах подготовки образцов, условий твердения, условиях при испытании в камере карбонизации. Это приводит к различным результатам при испытаниях по разным стандартам. Подход к оценке долговечности и сроков службы железобетонных конструкций на основе эксплуатационных характеристик можно считать важным продвижением

в проектировании конструкционного бетона. В настоящее время ограничения в этом подходе связаны с тем, что различные процессы разрушения, влияющие на поведение железобетонных конструкций, изучены не полностью и описаны не во всех необходимых деталях, лабораторные методы испытаний не всегда отражают реальные условия эксплуатации, а изменение качества бетона в пределах конструкции определяется неоднородностью и анизотропией свойств, наличием дефектов, зависящими от времени параметрами (усадка, ползучесть) и другими вероятностными факторами.

Ключевые слова: бетон, карбонизация, активная минеральная добавка, гидроксид кальция, карбонат кальция, коррозия стальной арматуры, влажность, условия твердения

Для цитирования: Фаликман В.Р., Дмитриев Н.С. Критический обзор стандартизованных методов испытаний для определения стойкости бетона к карбонизации // Бетон и железобетон. 2024. № 5 (624). С. 61–68. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5\(624\)-61-68](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-61-68). EDN: PJWLVC

Вклад авторов

Фаликман В.Р. – постановка задачи, подбор литературы для анализа, обобщение и систематизация результатов.

Дмитриев Н.С. – анализ материалов, подготовка и оформление статьи.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 16.10.2024

Поступила после рецензирования 26.11.2024

Принята к публикации 28.11.2024

V.R. FALIKMAN¹, N.S. DMITRIEV^{1,2,*}

¹ Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev,
JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

² JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation

CRITICAL REVIEW OF STANDARDIZED TEST METHODS FOR DETERMINING THE CARBONATION RESISTANCE OF CONCRETE

Abstract

Principal part. The article considers the recommendations on preliminary preparation and curing of specimens given in the existing domestic and foreign standards of concrete carbonation tests. The conditions of exposure to accelerated carbonation affect the mechanism of processes and the degree of changes that the material will experience. The concept of "maturity index" should be prioritized in future iterations of standards. There is a need to provide direct comparison of the results of different studies and to improve the understanding of how the internal properties of individual concrete types relate to their resistance to carbonation, to define principles for accurately translating carbonation rates in accelerated tests into natural carbonation rates for different types of concrete. Prescriptive and performance-based approaches to durability design of reinforced concrete structures are reviewed in this article. Often a direct correlation between carbonization ratio and compressive strength in concretes with mineral additives is not revealed, especially when the performance characteristics are determined by accelerated tests. Therefore, models of degradation of such concretes under the influence of carbon dioxide in semi-probabilistic, probabilistic calculations, and service life assessment need some refinement.

Conclusions. The existing standards for carbonation depth determination have significant differences from each other, in particular in the variants of specimen preparation, curing conditions, conditions during testing in the carbonation chamber. This leads to different results when tested to different standards. The performance-based approach to assessing the durability and service life of reinforced concrete structures can be considered an important advancement in structural concrete design.

At present, the limitations in this approach are due to the fact that the various failure processes affecting the behavior of reinforced concrete structures are not fully studied and described in all necessary details, laboratory test methods do not always reflect the actual operating conditions, and the variation of concrete quality within a structure are determined by the heterogeneity and anisotropy of properties, the presence of defects, time-dependent parameters (shrinkage, creep), and other probabilistic factors.

Keywords: concrete, carbonization, active mineral additive, calcium hydroxide, calcium carbonate, corrosion of steel reinforcement, humidity, curing conditions

For citation: Falikman V.R., Dmitriev N.S. Critical review of standardized test methods for determining the carbonation resistance of concrete. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2024, no. 5 (624), pp. 61–68. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5\(624\)-61-68](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-61-68). EDN: PJWLVC

Authors contribution statement

Falikman V.R. – problem statement, selection of references for analysis, summarizing and systematizing results obtained.

Dmitriev N.S. – analysis of materials, preparation and drafting of the article.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 16.11.2024

Revised 26.11.2024

Accepted 28.11.2024

Введение

Одним из распространенных видов агрессии, которой повсеместно подвергаются бетоны, конструкции и изделия на основе различных цементных вяжущих, является карбонизация. Под термином «карбонизация» понимают химический процесс, при котором углекислый газ из атмосферы взаимодействует с гидроксидом кальция, содержащимся в бетоне, превращая его в карбонат кальция. Этот процесс приводит к снижению pH поровой жидкости бетона с его изначально щелочного значения (около 12–13) до более нейтрального. По мере прогрессирования карбонизации и снижения уровня pH защитный слой бетона становится менее стойким, что увеличивает риск коррозии стальной арматуры. Карбонизация бетона происходит со временем и может ускоряться при наличии определенных условий, таких как высокая влажность, повышенная концентрация углекислого газа в воздухе и наличие трещин в бетоне, оказывая негативное влияние на долговечность и прочность железобетонных конструкций, особенно тех, которые подвергаются значительным нагрузкам и другим видам агрессивных внешних воздействий.

Несмотря на обширные знания в области цементных систем, полученные за последние десятилетия, среди исследователей отсутствует консенсус в том, как следует оценивать карбонизацию бетона. Об этом свидетельствует тот факт, что для этой цели предлагается множество стандартизованных на сегодня методик испытаний. Между ними существуют заметные различия, которые не могут не отразиться на изменчивости получаемых результатов. Поэтому

методы ускоренных испытаний на карбонизацию следует рассматривать только с целью сопоставления характеристик карбонизации бетонов, испытанных в сопоставимых условиях.

Предварительная подготовка и условия твердения образца заметно влияют на зрелость вяжущих фаз, степень гидратации портландцемента и скрытые гидравлические и пучколановые реакции, а значит, на количество образовавшихся гидратов, состав поровой жидкости и структуру пор. Это будет особо значимо для бетона с некоторыми активными минеральными добавками, поскольку хорошо известно, что они обычно демонстрируют более позднее развитие прочности по сравнению с обычным портландцементным бетоном [1, 2]. Любые различия в методах и продолжительности твердения или условия предварительного кондиционирования будут влиять на измеренную карбонизационную стойкость материала.

Основная часть

Хотя в различных стандартах (табл. 1) или в опубликованных исследованиях указаны самые разные методы и условия твердения или предварительной подготовки образцов, включая твердение в воде, влажное твердение, твердение на воздухе, герметичное твердение, твердение в ванне с насыщенной известью, термовлажностную обработку и даже использование отверждающих составов, в литературе, как показано в [3, 4], имеется очень мало исследований о влиянии типов твердения на стойкость к карбонизации.

Таблица 1
Table 1

Избранные примеры рекомендаций по выдержке и предварительной подготовке образцов, включенные в существующие стандарты испытаний карбонизации.

Четкое различие между испытаниями на естественную или ускоренную карбонизацию включено в таблицу (если это указано в стандартах)

Selected examples of recommendations for curing and pre-conditioning of specimens included in existing carbonation test standards. A clear distinction between natural or accelerated carbonation tests is included in the table (if indicated in the standards)

Стандарт на метод испытаний	Способ предварительной подготовки образцов	Источник
ГОСТ 31383-2008, п. 6	Бетонные образцы проектного возраста устанавливают в камеру карбонизации на этажерку, закрывают камеру, включают вентилятор. Образцы выдерживают в камере при относительной влажности воздуха (75 ± 3) % и температуре (20 ± 5) °C до установления постоянной массы. Момент установления постоянной массы определяют периодическим взвешиванием (один раз в трое суток). Масса считается постоянной, если между отдельными взвешиваниями она изменяется не более чем на 0,1 %	[5]
BSI 1881-210:2013	Два бетонных куба выдерживают в лабораторной воздушной среде в течение 14 дней перед герметизацией верхней, нижней и двух противоположных боковых граней. После герметизации всех граней, кроме двух, кубы помещают в камеру хранения на период не менее 70 дней. При испытании в более чем одном возрасте призмы выдерживают в лабораторной воздушной среде в течение 14 дней перед герметизацией верхней, нижней и двух торцевых граней. После герметизации всех граней, кроме двух продольных, призмы помещают в камеру хранения на общий период испытания не менее 70 дней	[6]

Продолжение таблицы 1

Стандарт на метод испытаний	Способ предварительной подготовки образцов	Источник
EN 13295:2004	Образцы твердеют в формах, покрытых пластиковой пленкой, в течение 24 часов. Затем они дополнительно хранятся в течение 27 дней под водой при температуре $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$. Боковые стороны образцов не должны содержать загрязняющих веществ (например, средств для извлечения из формы), которые могут повлиять на скорость карбонизации. Предварительная подготовка осуществляется путем хранения образцов при температуре $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$ при относительной влажности $(60 \pm 10)\%$ до тех пор, пока изменение массы в течение 24 часов не станет менее 0,2 % по крайней мере на протяжении 14 дней	[7]
CUR-Aanbeveling 48:2010	Естественная карбонизация. На трехдневных образцах парафин наносится в три слоя на две торцевые стороны (лицевую и противоположную). Сразу после нанесения парафина образцы должны быть выдержаны в лабораторной атмосфере при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ и при относительной влажности воздуха $(65 \pm 5)\%$ до момента испытания. Ускоренная карбонизация. В возрасте 28 дней образцы извлекают из водяной бани и немедленно оставляют на 14 дней при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $(65 \pm 5)\%$. После этого на каждый образец наносят парафин в три слоя на две торцевые стороны (лицевую и противоположную)	[8]
EN 12390-12:2020	В возрасте 28 дней призмы/кубы извлекают из водяной бани и переносят в лабораторную среду для сушки воздухом ($18\text{--}25^\circ\text{C}$, относительная влажность 50–65 %) на 14 дней. После 14 дней воздействия лабораторного воздуха испытуемые образцы помещают в камеру хранения карбонизации. Призмы/кубы следует расположить таким образом, чтобы воздух мог свободно циркулировать вокруг граней, на которых будут проводиться измерения карбонизации	[9]
GB/T 50082-2009	Образцы испытывают после 28 дней твердения в стандартных условиях. Для образцов с минеральными добавками (например, золой-уноса) может применяться увеличенное время твердения. Образцы перед карбонизацией необходимо предварительно кондиционировать при 60°C в течение 48 часов. После предварительной обработки призмы покрывают расплавленным парафиновым воском, оставляя только одну (или две противоположные) стороны, которые будут подвергаться карбонизации. На поверхности, подвергающейся воздействию углекислого газа, вычертывают параллельные линии вдоль продольной оси через каждые 10 мм, чтобы обеспечить точки индикации для измерения глубины карбонизации. Расстояние между образцами в камере карбонизации должно быть более 50 мм	[10]
ISO/DIS 1920-12:2015	В возрасте 28 дней призмы/кубы извлекают из водяной бани и переносят на 14 дней в лабораторную среду для сушки воздухом с температурой $(18\text{--}29)^\circ\text{C}$ и относительной влажностью (50–70 %). После 14 дней кондиционирования верхняя и нижняя продольные грани и две торцевые грани призм (или верхняя, нижняя и две боковые грани кубов) запечатывают с помощью парафинового воска или аналогичного материала, который предотвратит попадание углекислого газа и позволит карбонизировать две продольные поверхности. После того, как призмы/кубы запечатаны, их помещают в камеру хранения. Призмы/кубы должны быть расположены таким образом, чтобы их открытые грани были вертикальны и позволяли воздуху свободно циркулировать вокруг двух граней, подлежащих карбонизации	[11]
IS 516 (Part 2/Section 4) 2021	Образцы должны храниться в воде или в камере с температурой в диапазоне $(27 \pm 2)^\circ\text{C}$ и при минимальной относительной влажности 95 %. В возрасте 28 дней призмы/кубы извлекают из водяной бани и переносят на 14 дней в лабораторную воздушную сушилку с температурой в диапазоне $(27 \pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажностью воздуха в диапазоне $(65 \pm 5)\%$	[12]
prSIA 262/1:2017-11	Образцы-призмы должны храниться после распалубки (обычно в течение 1 суток) до возраста (72 ± 6) ч в воде при температуре от 15 до 25°C . После этого призмы должны выдерживаться до начала испытаний в климатической камере до возраста 28 суток. При необходимости промежуточного хранения (например, при формировании призмы на строительной площадке) призму следует защитить от высыхания (накрыть пленкой, под водой) до возраста (72 ± 6) ч. Если призма не будет немедленно доставлена в испытательную лабораторию, ее необходимо хранить в защищенном сухом помещении (относительная влажность $\leq 70\%$, температура от 10 до 30°C) до момента транспортировки в испытательную лабораторию. Однако образец должен быть перенесен в климатическую камеру не позднее 10-го дня (с момента его изготовления) до начала испытания в возрасте 28 дней. Для испытания кернов используют открытую внешнюю (A) и внутреннюю (I) (невыветренная сторона или задняя часть) часть кернов. Внутренняя часть кернов должна быть плоской и перпендикулярной оси образца. При необходимости ее следует обрезать. Керны помещают в климатическую камеру на 3 недели до испытания. Боковые поверхности кернов перед началом испытания покрывают слоем устойчивого к CO_2 материала	[13]

Продолжение таблицы 1

Стандарт на метод испытаний	Способ предварительной подготовки образцов	Источник
UNE 83993-2:2013	После того, как образцы достигнут желаемого возраста испытания, их необходимо предварительно кондиционировать путем сушки образцов при температуре 40 °C в течение недели, после чего образцы запечатываются и хранятся при температуре 20 °C в течение трех недель. Это означает, что предварительное кондиционирование образцов длится 28 дней в дополнение ко времени твердения. После того, как образцы кондиционированы, их помещают в климатическую камеру, гарантируя, что по крайней мере 90 % поверхности образца подвергается воздействию воздуха (это можно сделать, например, с помощью жесткой пластиковой сетки). Образцы должны находиться на расстоянии не менее 10 см друг от друга	[14]

Практически во всех стандартах по истечении заданного срока выдерживания для оценки глубины карбонизации и продвижения ее фронта образцы раскалывают в направлении, нормальному рабочей грани, и на поверхность скола со стороны рабочей грани наносят раствор фенолфталеина (трифенилметановый краситель) в этиловом спирте, который изменяет свою окраску от бесцветной (при pH < 8,2) до красно-фиолетовой, «малиновой» (в щелочной среде). Толщину слоя, окрашенного раствором фенолфталеина (в малиновый цвет), измеряют по периметру образца.

В методологии оценки долговечности бетона с минеральными добавками крайне необходимо внедрение понятия «индекса зрелости». Оно должно стать приоритетным в будущих итерациях стандартов, чтобы коррозионную стойкость бетона можно было определить более точно. Условия воздействия ускоренной карбонизации влияют на механизм карбонизации и степень изменений, которые испытывает материал. Необходим консенсус относительно условий воздействия, которые следует принять как базовые в различных стандартах, в частности, однозначно определить концентрацию CO₂ и относительную влажность для испытаний. Для портландцемента и смешанных портландцементов, по-видимому, концентрация CO₂ от 1 до 3 % достаточна для того, чтобы вызвать изменения фазового состава, сопоставимые с теми, которые наблюдаются при естественной карбонизации. Поэтому испытание бетона на ускоренную карбонизацию при концентрациях воздействия CO₂, превышающих это значение, не рекомендуется. Важно содействовать гармонизации этого параметра в уже существующих стандартах, чтобы обеспечить возможность прямого сравнения результатов различных исследований и улучшить понимание того, как внутренние свойства и структура отдельных видов бетона могут быть связаны с их устойчивостью к карбонизации.

По-прежнему необходим комплекс исследований для точного перевода скоростей карбонизации, полученных с помощью ускоренных испытаний, в скорости карбонизации в естественных условиях для различ-

ных типов бетона. Бетон с минеральными добавками из-за карбонизации будет претерпевать иные микроструктурные изменения в отличие от обычного бетона на портландцементе (часто укрупнение вместо измельчения поровой структуры). Воздействие на эти бетоны высоких концентраций CO₂ приведет к их быстрой карбонизации, что в свою очередь может способствовать более интенсивному образованию воды как продукта реакции карбонизации внутри структуры композиционного материала, которым является бетон. Различия в выделении воды при карбонизации могут также влиять на условия относительной влажности, при которых скорость карбонизации будет выше.

В целом, подходы к проектированию долговечности железобетонных конструкций можно разделить на предписывающие и основанные на эксплуатационных характеристиках.

Предписывающие концепции базируются на спецификациях материала и характеристиках защитных слоев с использованием таких факторов, как классы воздействия и прочность на сжатие. В соответствии с этим подходом проектирование долговечности в большинстве существующих норм и стандартов основано, главным образом, на установлении ограничений на используемые материалы и принципах проектирования состава бетона в зависимости от тяжести предполагаемого воздействия (максимальное водоцементное отношение, общее минимальное содержание цементирующих материалов и т. п.), как это сделано, например, в [15]. Оно включает правильный выбор класса воздействия и соблюдение требований к материалам и защитным слоям, а также к процедурам укладки, уплотнения и твердения бетона в конструкции.

Вместе с тем долговечность – это концепция поведения конструкции в конкретных условиях ее эксплуатации, как таковая, она не может быть легко описана и оценена с помощью простых параметров смеси [16–19]. Предписывающий подход в определенной степени игнорирует многообразие характеристик различных типов цемента и минеральных добавок или самого бетона, а также тип заполнителя, и, что глав-

ное, не позволяет учесть влияние практики на стройплощадке в процессе строительства. Он также не позволяет однозначно учесть поведение конструкции при одновременном воздействии среды и нагрузки, конкретные требования к сроку ее службы. Кроме того, предписывающий подход является препятствием для использования новых или переработанных материалов. Концепции проектирования с учетом эксплуатационных характеристик, напротив, основаны на количественном прогнозировании долговечности (или срока службы) на основе преобладающих условий воздействия и измеренных параметров материала. Устойчивость конструкции к разрушению, измеряемая с помощью показателей стойкости фактически используемого бетона, сравнивается с нагрузкой окружающей среды. Исходя из этого, износ (деструкция, разрушение) конструкции в течение срока службы оценивается количественно с помощью соответствующих моделей износа и вероятностных (полувероятностных) расчетов. В этой концепции состав бетона важен только в той степени, в которой он контролирует свойства бетона.

Поскольку срок службы железобетонных конструкций в значительной степени зависит от толщины и качества защитных слоев, необходимы надежные испытания для их прямого измерения. Эти методы также включают ускоренные испытания, которые были разработаны для получения полезной проектной информации в сроки, соответствующие техническим условиям проекта. Поскольку проверка проникновения вредных веществ, в том числе углекислого газа, обычно занимает слишком много времени, методы ускоренных испытаний обычно оценивают структуру пор и в некоторой степени химический состав поровой жидкости в бетоне, при этом наиболее распространенные методы испытаний измеряют проницаемость или удельное сопротивление (или обратную его характеристику – проводимость). Используя вероятностные модели прогнозирования разрушения или эмпирические зависимости, значения проницаемости и удельного сопротивления можно связать с соответствующими механизмами разрушения.

Карбонизация бетона, как было указано выше, исторически связана с уменьшением pH, который определяется с помощью раствора фенолфталеина. Проведенный Техническим комитетом РИЛЕМ ТС 281-ССС анализ привел к двум основным выводам, связанным с этой процедурой:

1. До обнаружения определенных проканцерогенных свойств фенолфталеин более полутора веков использовался в медицине. Однако сегодня его использование может быть исключено из существующих стандартов, вместо фенолфталеина необходимо подобрать и рекомендовать альтернативные синтетические или натуральные индикаторы pH.

2. Использование индикатора pH среды не полностью отражает все реакции карбонизации, протекаю-

щие в бетоне. Для портландцементного бетона можно утверждать, что изменения щелочности, вызванные карбонизацией, имеют особое значение в контексте коррозии стали. Для портландцемента с минеральными добавками (бетона с минеральными добавками) карбонизация может привести к более быстрому снижению несущей способности и повышению пористости материала, поэтому независимо от изменений щелочности, которые могут быть связаны с карбонизацией, важно определить и степень микроструктурных изменений, вызванных карбонизацией, которые индикатор pH выявить никоим образом не может. Ограниченнная точность методик, используемых для определения глубины карбонизации, продвижения ее фронта, сопутствующего массопереноса, требует выбора подходящих подходов для ответа на вопросы, поднятые при планировании таких экспериментов. Коэффициенты карбонизации, определенные по показаниям глубины карбонизации с использованием индикатора pH, могут не быть по-настоящему representativeными для фактической карбонизации, которую испытывает материал при формировании новообразований, включающих оксикарбонатные фазы. Это прямо касается применимости моделей прогнозирования срока службы, особенно для бетона с минеральными добавками.

Коррозия арматуры, вызванная карбонизацией, хотя и встречается достаточно часто, как правило, не представляет серьезной угрозы для безопасности и работоспособности конструкции, поскольку в естественных условиях с концентрацией углекислого газа около 0,04 % (непромышленные районы) она протекает очень медленно. Необходимо, чтобы условия воздействия на железобетонные конструкции, подвергающиеся карбонизации, принимались только в качестве ориентиров и при необходимости корректировались с учетом местных условий. BS EN 206:2013+A2:2021 [15] содержит пример такой классификации среды карбонизации. Однако принятый в европейском стандарте принцип классификации не учитывает динамику изменения концентрации углекислого газа в окружающей среде и ее сезонные колебания. Например, в промышленных зонах концентрация углекислого газа обычно высока, поэтому скорость карбонизации может увеличиваться, если имеется достаточное количество влаги для поддержания процесса. В гаражах и туннелях также может наблюдаться крайне высокое содержание CO₂.

Потенциально вводят в заблуждение на техническом уровне существующие упрощенные рекомендации по расчету поглощения CO₂ бетоном с использованием стандартов, изначально разработанных для определения скорости именно ускоренной карбонизации, и, соответственно, определение характеристик устойчивости цементов, бетона или конструкций исходит из неких постоянных значений коэффициента карбонизации. Коэффициенты карбонизации, оцененные

по результатам определения глубины карбонизации в соответствии с различными стандартизованными методиками испытаний, являются неабсолютными и уникальными для индивидуальных составов бетонных смесей и условий воздействия конкретной окружающей среды. Часто прямая корреляция между коэффициентом карбонизации и прочностью на сжатие в бетоне с минеральными добавками не выявляется вовсе, особенно когда эксплуатационные характеристики определяются в условиях ускоренных испытаний. Поэтому рекомендации, основанные на использовании коэффициентов карбонизации, приведенных в таблицах ряда существующих стандартов, необходимо подвергать определенному сомнению при их применении в расчетах долговечности и срока службы железобетонных конструкций.

Выводы

- Глубина карбонизации в смешанных цементах выше, чем в рядовых портландцементах, и увеличивается при увеличении степени замещения цемента минеральной добавкой.

- Умеренная сжимающая механическая нагрузка (30 % от разрушающей нагрузки), приводящая к некоторому уплотнению структуры бетона, снижает глубину карбонизации (в отдельных случаях – вплоть до 16 %).

- Существующие стандарты на определение глубины карбонизации имеют значительные отличия друг от друга, в частности, в вариантах подготовки образцов, их твердения (ухода за образцами), условиях при испытании в камере карбонизации (концентрация CO_2 , влажность, температура). Эти отличия приводят к различным результатам испытаний по разным стандартам и повышают статистическую неопределенность измерений, т. е. параметр, связанный с результатом измерения и характеризующий разброс значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине.

Важно отметить, что по ГОСТ 31383-2008 [5] выдержка образцов перед испытаниями регламентирована не временем выдерживания, а моментом установления постоянной массы у образцов в камере карбонизации перед включением подачи газа. Этот момент для бетонов с разной плотностью структуры может наступить в разное время и косвенно отражает ее особенности.

- Для портландцемента с минеральными добавками карбонизация может привести к более быстрому снижению несущей способности и повышению пористости материала, поэтому независимо от изменений щелочности, которые могут быть связаны с карбонизацией, важно определить степень и характер микроструктурных изменений, вызванных карбонизацией, которые индикатор pH выявить не может.

- Часто не выявляется прямая корреляция между коэффициентом карбонизации и прочностью на сжатие в бетоне с минеральными добавками, особенно когда эксплуатационные характеристики определяются в условиях ускоренных испытаний. Поэтому рекомендации, основанные на использовании коэффициентов карбонизации, приведенных в таблицах таких стандартов, вызывают определенное сомнение.

6. Подход к оценке долговечности и сроков службы железобетонных конструкций на основе эксплуатационных характеристик можно считать важным шагом вперед в проектировании. Существующие ограничения в этом подходе связаны с тем, что различные процессы разрушения, влияющие на поведение железобетонных конструкций, в настоящее время не полностью изучены и описаны не во всех необходимых деталях, методы испытаний, используемые в лаборатории, не всегда отражают реальные условия эксплуатации, а изменение качества бетона в пределах конструкции или ее отдельного элемента не является достаточно известным. Однако проблема разницы между условиями на стройплощадке и в лаборатории может быть в определенной степени преодолена путем использования физических и виртуальных моделей, учитывающих условия испытаний и основанные на явлениях старения микроструктурные изменения и т. д. Это обуславливает продолжение работ, связанных с созданием моделей коррозии различных бетонов в различных условиях эксплуатации, переходом к вероятностным прогнозам обеспечения долговечности железобетонных конструкций и их сроков службы при одновременном воздействии среды и нагрузки.

Список литературы / References

- De Belie N., Soutsos M., Gruyaert E. (eds) Properties of fresh and hardened concrete containing supplementary cementitious materials. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 238-SCM, Working Group 4. Springer, Cham. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70606-1>
- Vollpracht A., Soutsos M., Kanavaris F. (2018) Strength development of GGBS and fly ash concretes and applicability of fib model code's maturity function – A critical review. *Construction and Building Materials.* 2018, vol. 162, pp. 830–846. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.054>
- RILEM Recommendations. CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth. *Materials and Structures.* 1988, vol. 21, pp. 453–455. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02472327>
- Bernal S.A., Dhandapani Y., Elakneswaran Y. et al. Report of RILEM TC 281-CCC: A critical review of the standardised testing methods to determine carbonation resistance of concrete. *Materials and Structures.* 2024, vol. 57, article number 173. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02424-9>
- ГОСТ 31383-2008. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний. Москва: Стандартинформ, 2010.

5. State Standard 31383-2008. Protection against corrosion of concrete and reinforced concrete constructions. Test methods. Moscow: Standardinform Publ., 2010. (In Russian).
6. BSI 1881-210:2013. Testing hardened concrete. Determination of the potential carbonation resistance of concrete. Accelerated carbonation method. The British Standards Institute.
7. EN 13295:2004. Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of resistance to carbonation.
8. CUR-Aanbeveling 48:2010. Procedures, criteria and test methods for testing the suitability of novel cements for application in concrete and for the equivalent performance of concrete with fillers. CROW-CUR.
9. EN 12390-12:2020. Testing hardened concrete. Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete – Accelerated carbonation method. European Committee for Standardization (CEN).
10. GB/T 50082-2009. Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete. China Academy of Building Research.
11. ISO/DIS 1920-12:2015. Testing of concrete. Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete – Accelerated carbonation method. International Organization for Standardization (ISO).
12. IS 516 (2021). Hardened concrete – Methods of test. Part 2: Properties of hardened concrete other than strength. Section 4: Determination of the carbonation resistance by accelerated carbonation method. Bureau of Indian Standards.
13. prSIA 262/1:2017-11. Concrete construction – Additional specifications. Swiss Society of Engineers and Architects (SIA).
14. UNE 83993-2:2013. Durability of concrete. Test method. Measurement of carbonation penetration rate in hardened concrete. Part 2: Accelerated method. Organismo de Normalización en España (UNE).
15. BS EN 206:2013+A2:2021. Concrete. Specification, performance, production and conformity. British Standards Institution.
16. Walraven J. Design for service life: how should it be implemented in future codes. *International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Proceedings ICCRRR 2008*, Cape Town, 24–26 November 2008. 2008, pp. 3–10.
17. Alexander M.G., Mackenzie J.R., Ballim Y. Use of durability indexes to achieve durable cover concrete in reinforced concrete structures. *American Ceramic Society, Inc., Materials Science of Concrete VI*. 2001, pp. 483–511.
18. Simons B. Concrete performance specifications: New Mexico Experience. *Concrete International*. 2004, vol. 26, issue 4, pp. 68–71.
19. Day K.W. Perspective on Prescriptions. *Concrete International*. 2005, vol. 27, issue 7, pp. 27–30.

**Информация об авторах /
Information about the authors**

Вячеслав Рувимович Фаликман, д-р материаловедения, канд. хим. наук, действительный член Российской инженерной академии, Почетный пожизненный член ФИБ и RILEM, начальник центра научно-технического сопровождения технически сложных объектов строительства (№ 20), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: vfalikman@yandex.ru

Vyacheslav R. Falikman, Dr. Sci. (Materials), Cand. Sci. (Chem.), Full Member of the Russian Engineering Academy, Honorary Life Member of fib and RILEM, Head of Center for Scientific and Technical Support of Technically Complex Construction Facilities (No.20), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: vfalikman@yandex.ru

Никита Сергеевич Дмитриев[✉], аспирант, АО «НИЦ «Строительство»; младший научный сотрудник, центр научно-технического сопровождения технически сложных объектов строительства (№ 20), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: concrete15@yandex.ru

Nikita S. Dmitriev[✉], Graduate student, JSC Research Center of Construction; Junior Research Associate, Center for Scientific and Technical Support of Technically Complex Construction Facilities (No.20), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: concrete15@yandex.ru

[✉] Автор, ответственный за переписку / Corresponding author