

УДК 691.32:620.193.21

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3\(38\)-128-142](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-128-142)

EDN: VDKWWY

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОРОЗОСТОЙКОСТИ БЕТОНА

Н.К. РОЗЕНТАЛЬ¹, д-р техн. наук

Г.В. ЧЕХНИЙ^{2,✉}, канд. техн. наук

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

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

Аннотация

Введение. Проблема морозостойкости бетона является одной из сложнейших в бетоневедении. Особое место здесь занимает вопрос о методах испытаний бетона на морозостойкость. Для повышения надежности результатов существующие стандартные методы требуют более детальной регламентации процесса испытаний.

Цель работы – анализ нормативных методов испытаний бетона на морозостойкость с целью подготовки предложений по совершенствованию стандартов.

Материалы и методы. Материалом для рассмотрения и анализа явились отечественные и зарубежные стандарты и публикации о методах испытаний бетона на морозостойкость.

Результаты. Выполнен анализ методов испытаний бетона на морозостойкость, включенных в отечественные и некоторые зарубежные стандарты. Показано, что для повышения качества определения морозостойкости бетона необходим контроль температуры при замораживании и оттаивании, гарантирующий оценку температуры в бетоне испытываемых образцов; контроль температуры воздушной среды в морозильной камере следует признать недостаточным. Следует продолжить проверку критериев состояния бетонных образцов в процессе и после циклического замораживания и оттаивания. Необходимо продолжить натурные испытания бетона в суровых климатических условиях с учетом реальных условий замораживания и оттаивания бетона в конструкциях, сопоставляя результаты лабораторных и натурных исследований, в том числе образцов-спутников.

Выводы. По результатам анализа сделаны выводы о необходимости продолжить исследования по уточнению методики испытаний и критериев оценки состояния бетонных образцов после циклов замораживания и оттаивания, целесообразно воссоздать приборы для определения динамического модуля упругости образцов в процессе испытания замораживанием и оттаиванием, возобновить длительные натурные испытания бетонов в суровых климатических условиях, разработать пособие по созданию морозостойких бетонов с учетом современного уровня технологии бетона. Устранение существующих недостатков методики позволит повысить надежность результатов испытаний.

Ключевые слова: морозостойкость бетона, методы определения морозостойкости, критерии оценки результатов испытаний, лабораторные исследования, натурные исследования

Для цитирования: Розенталь Н.К., Чехний Г.В. Анализ методов определения морозостойкости бетона. Вестник НИЦ «Строительство». 2023;38(3):128–142. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3\(38\)-128-142](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-128-142)

Вклад авторов

Розенталь Н.К. – научное руководство, написание статьи.

Чехний Г.В. – участие в экспериментах, написание статьи.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 01.05.2023

Поступила после рецензирования 28.05.2023

Принята к публикации 04.06.2023

ANALYSIS OF TEST METHODS FOR FROST RESISTANCE OF CONCRETE

N.K. ROZENTAL¹, Dr. Sci. (Engineering)

G.V. CHEKHNI^{2,✉}, Cand. Sci. (Engineering)

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

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

Abstract

Introduction. Frost resistance of concrete is one of the most challenging problems in concrete studies. Particularly important is the issue of methods of testing concrete for frost resistance. The existing standard methods require more detailed regulation of the test process in order to improve the reliability of the results.

Aim. To analyze the regulatory procedures of testing concrete for frost resistance with a view to make suggestions for improving standards.

Materials and methods. The analysis involved Russian and foreign standards and publications on methods of testing concrete for frost resistance.

Results. The authors analyzed the methods of testing concrete for frost resistance, included in Russian and some foreign standards. The quality of determining the frost resistance of concrete can be improved by controlling the temperature while freezing and thawing, in particular, by assessing the temperature in the concrete of the test samples. Controlling the air temperature in the freezer should be recognized as insufficient. The criteria for the state of concrete samples during and after cyclic freezing and thawing should be further verified. It is necessary to continue full-scale testing of concrete under severe climatic conditions, taking into account the real conditions of freezing and thawing of concrete in structures, and comparing the results of laboratory and full-scale tests, including satellite samples.

Conclusion. The analysis revealed the necessity to continue the research on clarifying the test methodology and criteria for assessing the state of concrete samples after freezing and thawing cycles. It is advisable to recreate devices for determining the dynamic modulus of elasticity of samples in freeze-thaw testing, to resume long-term full-scale tests of concrete under severe climatic conditions, and to develop a manual for creating frost-resistant concrete, taking into account the current level of concrete technology. Elimination of the existing drawbacks of the methodology will improve the reliability of test results.

Keywords: frost resistance of concrete, test methods for frost resistance, test criteria, laboratory tests, full-scale tests

For citation: Rozental N.K., Chekhni G.V. Analysis of test methods for frost resistance of concrete. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;38(3):128–142. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3\(38\)-128-142](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-128-142)

Author contribution statements

Rozental N.K. – scientific guidance, writing the manuscript.

Chekhni G.V. – experimental study, writing the manuscript.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 01.05.2023

Revised 28.05.2023

Accepted 04.06.2023

Активная разработка проблемы морозостойкости бетона развивалась в России примерно с середины прошлого века. Наиболее интенсивно исследования выполнялись в 1960–1980-х годах. В исследованиях участвовали НИИЖБ, ЦНИИС, ВНИИГ им. Веденеева, ЛИИЖТ, НИИЖТ МПС, СоюздорНИИ, МИСИ им. В.В. Куйбышева, НИС Гидропроекта и многие другие организации. Опубликованы сотни работ, посвященные морозостойкости бетона, в том числе методам испытаний. К сожалению, в настоящее время объем научных исследований в этой области существенно сократился. Ушли из жизни многие ученые, внесшие большой вклад в исследование этой проблемы. В последние десятилетия сократилось число лабораторий, занимающихся исследованиями морозостойкости бетона, существенно снизилось финансирование экспериментальных работ в этом направлении. Большинство оставшихся лабораторий не имеет современного приборного оснащения.

Попытаемся кратко проанализировать процесс развития методов испытаний бетона на морозостойкость за последние полвека, отраженный в стандартах, чтобы выявить пути дальнейших исследований в данной области.

Изначально методы испытаний на морозостойкость основывались на процессе замораживания и оттаивания бетонных образцов. Варьировались длительность и температура замораживания, состав среды, в которой осуществлялось замораживание, контролируемые показатели состояния образцов, их количество и размеры. Практика бетонных работ требовала ускоренной оценки морозостойкости бетона, при этом всегда оставалось требование надежности получаемых результатов. Методы испытаний бетона на морозостойкость пересматривались и уточнялись при каждом переиздании стандарта. В настоящее время активное освоение северных территорий страны настоятельно требует совершенствования методов испытаний бетона на морозостойкость.

Краткий обзор показывает, как развивалась разработка стандартного метода испытаний бетона на морозостойкость по сравнению с первым изданием стандарта 1949 г. Испытания в пресной воде дополнены испытаниями в растворах солей, в естественных минерализованных водах, в том числе в морской воде. Ужесточились показатели состояния образцов после испытаний, понижалась критическая величина уменьшения прочности бетона и допустимое снижение массы образцов. Со временем выяснилось, что это отразилось на точности определения морозостойкости. В публикациях появились предложения доводить испытания до разрушения бетона, проводить испытания при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, учитывать наличие в водной среде солей.

Сводка показателей, при достижении которых прекращались испытания, приведена в табл. 1.

Таблица 1

Критерии оценки испытаний образцов на морозостойкость

Table 1

Criteria for frost resistance test

Источник	Критерии				
	Уменьшение прочности, %	Уменьшение массы, %	Уменьшение динамического модуля упругости, %	Уменьшение скорости ультразвука, %	Деформации удлинения, %
ГОСТ 4800–49	25	5	–	–	–
ОСТ 34–4618–73	15	–	–	–	–
ГОСТ 10060–76	15	5	–	–	–
ГОСТ 10060–87	5	3	–	–	–
ГОСТ 10060.0–95	5	3	–	–	–
ГОСТ 10060–2012	Нижняя граница доверительного интервала прочности основных образцов выше значения нижней границы доверительного интервала прочности контрольных образцов, умноженного на коэффициент 0,9				
	–	2	25	15	0,1
ГОСТ 26134–2016	Точка перелома на графике «логарифм числа ЦЗО – логарифм времени распространения ультразвука»				
В. М. Москвин [1]	–	–	–	–	При 0,85–1,1 полное разрушение
О. В. Кунцевич [2]	15	–	–	–	0,25
СТБ ЕН 1339–2007	–	1000 г/м ²	–	–	–
СТБ ЕН 1138–2007	–	1000 г/м ²	–	–	–
ГОСТ 17608–2017	5	500 г/м ²	–	–	–

Изменение прочности при сжатии

Стандарт ГОСТ 10060-87 подвергся критике. В работе [3] было указано, что использование критерия «снижение прочности бетона после заданного числа ЦЗО на 5%» при существующем разбросе результатов определения прочности контрольных и основных образцов не дает надежной оценки морозостойкости. Отмечено, что по мере увеличения числа ЦЗО коэффициент вариации прочности увеличивается и превышает значения, характерные для контрольных образцов. Указано, что при повышенных коэффициентах вариации прочности бетона критерий «потеря прочности 15%» более оправдан.

В статье [4] отмечено, что основным недостатком нормированных методов является недоведение испытаний образцов до критического состояния, т. е. образцы могли разрушиться после следующих нескольких ЦЗО или были способны еще длительно сопротивляться разрушению. В итоге конструкции изготавливаются из бетона с неопределенной морозостойкостью. Это не позволяет, анализируя состояние бетона в дорожных и аэродромных покрытиях, корректировать требования к бетону. При 5%-ном критерии прочности образцов после испытаний любой бетон может быть признан неморозостойким. Предельно допустимое снижение прочности после требуемого числа циклов замораживания и оттаивания рекомендовалось принять равным 10%, что позволит определять соответствие бетона требуемой

марке по морозостойкости с доверительной вероятностью 0,90–0,95. Для сокращения объема испытаний при неизвестной однородности прочности бетона предложено дополнительно определять динамический модуль упругости или скорость ультразвука.

Лабораторные испытания показывают, что разрушение образцов в процессе замораживания-оттаивания происходит с поверхности. Это означает, что по сечению образца прочность бетона после ЦЗО различна, а при испытании образца на прессе определяется некоторая условная усредненная прочность. Из практики испытаний бетонных образцов на прочность известно, что даже небольшая непараллельность рабочих граней сильно искажает результаты испытаний. В равной степени это относится к испытаниям образцов после ЦЗО, когда рабочие грани повреждаются (шелушение или скалывание наружного слоя).

При испытании кернов, выбуренных из конструкций Красноярской ГЭС, авторы [5] отметили необходимость выполнять тщательную шлифовку торцов. Подливка и другие подобные методы выравнивания рабочих поверхностей недопустимы.

В действующем ГОСТ 10060-2012 не прописана процедура выравнивания поверхности образцов, о чем следует ввести уточнение и дополнение в стандарт.

Опыт применения ГОСТ 10060-2012 показал, что в ряде случаев бетон выдерживает испытания по ГОСТ 10060-2012 при использовании приведенного в нем критерия $X_{\min}^{\text{II}} \geq 0,9X_{\min}^{\text{I}}$, но прочность бетона при этом снижается на 5–10 % и более.

В статье С. Л. Нерубенко и В. А. Гвоздева [4] рассмотрены свойства случайных величин при их нормальном распределении и сделан вывод, что количество параллельных образцов в каждый срок испытаний должно быть 3–6 штук в зависимости от внутрисерийного коэффициента вариации прочности. При 5%-ном критерии прочности образцов после испытаний любой бетон может быть признан неморозостойким. Предельно допустимое снижение прочности после требуемого числа циклов замораживания и оттаивания предложено принять равным 10 %. Это позволит определять соответствие бетона требуемой марке по морозостойкости с доверительной вероятностью 0,9–0,95.

Аналогичные результаты были получены и в наших исследованиях. Целесообразно вернуться к критерию «снижение прочности основных образцов на 10 или 15 % по сравнению с прочностью контрольных образцов». При этом следует прочность бетона в серии контрольных образцов определять с учетом внутрисерийного коэффициента вариации прочности. Серию образцов, внутрисерийный коэффициент вариации прочности которых превышает 9 %, не принимать к испытаниям. Требуются дальнейшие исследования.

При разработке бетона с повышенными требованиями при определении морозостойкости испытание образцов целесообразно выполнять до числа ЦЗО, превышающего критическое значение показателя, принятого в методе испытаний. Это позволит сравнивать морозостойкость бетонов различных составов и технологии изготовления. В дальнейшем в процессе производства разработанного бетона достаточно выполнять контрольные испытания по оценке морозостойкости с количеством ЦЗО, соответствующим проектной марке бетона по морозостойкости.

Остаточные деформации

Авторы [6, 7] указывают, что при медленном замораживании со скоростью изменения температуры 2 °С в час наиболее существенно изменяется прочность бетона, но не модуль упругости. Авторами сделан вывод, что только измерение остаточных продольных

деформаций позволяет выявить небольшие повреждения бетона. В работе О. В. Кунцевича в качестве максимально допустимых значений при испытании бетона на морозостойкость названы остаточные деформации 0,25 % и снижение прочности на 15 %.

В работе [8] при испытании на морозостойкость образцов, выпиленных из центрифугированного бетона, определяли остаточные деформации бетона. В качестве критерия были приняты относительные деформации – не более 0,1 %. Кроме того, применялось сквозное прозвучивание; погрешность измерения составляла 0,08 %. При испытании бетона на морозостойкость при температуре $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ с замером остаточных деформаций следует иметь в виду, что при расширении 0,85–1,1 % происходит полное разрушение бетона [1].

Фактор расстояния

В [9] рассмотрены работы четырех независимых лабораторий. Проверялась надежность критерия «фактор расстояния» по Пауэрсу. Варьировались вид и дозировка воздухововлекающих добавок, оценивалась роль длительности виброуплотнения, давления на бетонную смесь при уплотнении. Определялась роль общего объема вовлеченного воздуха, фактора расстояния, удельной поверхности воздушных пор при многократном замораживании в растворе соли и оттаивании. Величина фактора расстояния находилась в пределах 0,07–0,25 мм, удельная поверхность воздушных пор – 500–3800 м²/м³ бетона. Определяли количество бетона, отделившегося (scaling) от образцов. Установлено, что в исследовании морозостойкости бетона в растворе соли удельная поверхность воздушных пор более точно характеризует морозостойкость бетона. Высокая морозостойкость бетона наблюдалась в случаях, когда удельная поверхность пор превышала 1000 м²/м³. Полученный результат объясняют следующим. Разрушение бетона происходит при замерзании воды в капиллярах и не происходит при замерзании в воздушных порах, где остается некоторый объем воздуха. При увеличении удельной поверхности пор большее количество капилляров имеет выход в воздушные поры и меньшее количество капилляров такого выхода не имеет, что в конечном счете повышает морозостойкость бетона.

Однако следует иметь в виду, что критерий оценки по фактору расстояния сформулирован Пауэрсом для обычных бетонов. Современные бетоны имеют существенные структурные отличия. По мнению А. В. Шейнфельда [10], введение комплексных модификаторов вместе с воздухововлекающими добавками изменяет параметры условно-замкнутой пористости мелкозернистого бетона, повышая концентрацию мелких пор и уменьшая значение «фактора расстояния». При этом важную роль наряду с фактором расстояния играют суммарный объем пор и их численное содержание в единице объема. Определение фактора расстояния и удельной поверхности воздушных пор не позволяет определить марку бетона по морозостойкости.

Шелушение бетона

Для изделий и конструкций для дорожного и аэродромного строительства важным показателем является стойкость к разрушению рабочей поверхности при воздействии растворов противогололедных реагентов и мороза. Соответствующие методики испытаний разработаны в СоюздорНИИ, НИИ 26 Министерства обороны, V.J. Setzer в работе [11] изложил метод CDF. Указанный метод введен в стандарты СТБ ЕН 1339-2007, СТБ ЕН 1138-2007, ГОСТ 17608-2017. Отечественный и зарубежный методы различаются деталями. Общим

является то, что образцы замораживают и оттаивают при одностороннем контакте с соответствующим раствором.

Специалистами НИИЖБ разработана методика по определению шелушения поверхности бетона тротуарных плит. Морозостойкость бетона в плитах определяют на образцах размерами 100×100 мм и толщиной от 40 до 100 мм, изготовленных специально или выпиленных из изделий после достижения бетоном проектного возраста. Перед выполнением испытаний на боковые грани образцов наклеивают бортики, что позволяет в конце испытаний собрать отделившийся материал и после сушки взвесить. Образцы замораживают в 5%-ном растворе хлорида натрия при температуре минус $(50 \pm 5)^\circ\text{C}$ и оттаивают в том же растворе при температуре плюс $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$.

Режим испытаний:

- снижение температуры раствора до минус $(50 \pm 5)^\circ\text{C}$ – $(5 \pm 0,5)$ ч;
- выдерживание температуры раствора при температуре минус $(50 \pm 5)^\circ\text{C}$ – $(3 \pm 0,5)$ ч;
- оттаивание до температуры раствора $(16 \pm 5)^\circ\text{C}$ – $(16 \pm 0,5)$ ч.

Критерии:

- снижение прочности при сжатии – не более 5 %;
- количество отделившегося материала – не более 500 г/м^2 ;
- отсутствуют трещины и сколы бетона.

Ученые НИИЖБ провели испытания тротуарных плит на морозостойкость с контролем шелушения рабочей поверхности бетона и подтвердили возможность его использования в качестве второго дополнительного метода оценки морозостойкости тротуарных плит согласно ГОСТ 17608. В настоящее время метод успешно применяется на предприятиях, выпускающих тротуарные плиты. Целесообразно его включение как дополнительного метода в стандарт ГОСТ 10060 для оценки шелушения поверхности бетона дорожных и аэродромных покрытий, а также бетонов, к которым предъявляют требования по декоративности.

Наш опыт применения стандарта показал, что в ряде случаев значения морозостойкости, найденные методами определения динамического модуля упругости и скорости ультразвука, не совпадают [12]. Одной из причин этого несоответствия является поврежденная поверхность бетонных образцов под воздействием циклов замораживания-оттаивания, что затрудняет качественный контакт ультразвуковых датчиков с бетоном.

Исследование морозостойкости, выполненное НИИЖБ совместно с АО «ЯкутПНИСС» [12, 13], показало отсутствие корреляции при испытании бетонных образцов на морозостойкость по второму и третьему ускоренным методам с определением морозостойкости по изменению скорости прохождения ультразвука. По результатам испытаний по всем режимам четко определено, что ультразвуковой метод завышает оценку морозостойкости бетона. Выполненные исследования по оценке морозостойкости бетона по изменению скорости ультразвука при сквозном продольном прозвучивании с помощью экспоненциальных преобразователей 54 кГц (предназначенных для работы на грубых поверхностях и без применения контактной жидкости) указывают на необходимость корректировки допускаемого нормативного значения данного показателя, например понизить с 15 до 5 %. Требуются дальнейшие исследования.

Исследование по уточнению критерия определения морозостойкости бетона по величине снижения динамического модуля упругости показало, что для указанных целей оптимальным решением является выполнение испытаний резонансным методом. Ранее в НИИЖБ были

выполнены обширные исследования морозостойкости неразрушающим резонансным методом с использованием прибора ИЧМК-3. Принцип работы на ИЧМК был достаточно прост.

Резонансный метод основан на возбуждении в образце вынужденных изгибных колебаний. При приближении частоты вынужденных колебаний к частоте собственных колебаний возникает явление резонанса. Момент достижения максимальной амплитуды колебаний соответствует частоте собственных колебаний образца.

Достоинство резонансного метода отмечено в работах многих исследователей. Отмечается, что измерение резонансных характеристик обнаруживает повреждение в бетонах при замораживании-оттаивании раньше, чем при определении скорости ультразвука.

В настоящее время аналогичные приборы в России не выпускаются, что исключает применение резонансного метода для оценки морозостойкости бетона.

Увеличение объемов производства конструкций из высокопрочных бетонов низкой проницаемости поставило задачу придания таким бетонам повышенную морозостойкость. При испытании на морозостойкость бетонов высокой прочности и низкой проницаемости такие бетоны не насыщаются водой/растворами за стандартный срок насыщения (4 суток по ГОСТ 10060), что приводит к увеличению сроков испытания образцов и, как следствие, завышению марки бетона по морозостойкости.

В работе [14] были проверены способы увеличения водонасыщения высокопрочного бетона. Длительная выдержка образцов в условиях капиллярного всасывания воды, их вакуумирование, высушивание при температурах 60 и 100 °С, в том числе с последующим вакуумированием при давлении 0,1 МПа, не показали удовлетворительных результатов. Апробированные способы трудоемки и требуют дополнительного оборудования, увеличивают период испытания бетона на морозостойкость и, самое главное, в дальнейшем могут привести к занижению истинной морозостойкости бетона.

За 37 низкотемпературных циклов замораживания-оттаивания образцы не доведены до критических значений. Истинная морозостойкость высокопрочного бетона без добавки и с воздухововлекающей добавкой осталась неизвестна. Результаты позволили наметить программу исследований на будущее в части дополнения третьего ускоренного метода ГОСТ 10060 методами по оценке шелушения поверхности, определения прочности бетона в кернах, отобранных из конструкций.

Недавними исследованиями АО «ЯкутПНИИС» показано, что при особо низких отрицательных температурах (до минус 60–65 °С) разрушение бетона происходит быстрее, чем при температуре до минус 50 °С. Однако потребность в бетонах, стойких в указанных жестких морозных условиях, существует. Соответственно необходимы методы испытаний бетона, учитывающие подобные воздействия.

В нашей стране марка бетона по морозостойкости назначается на основании опыта эксплуатации конструкций для конкретных условий согласно СП 28.13330.2017. Единицей измерения морозостойкости является стандартный цикл замораживания-оттаивания, что требует проведения испытаний в строго нормируемых условиях. Различия методики проведения испытаний бетона на морозостойкость могут стать причиной недостоверной оценки качества бетона, что может в реальных условиях снизить безопасность зданий и сооружений. При реализации цикла замораживания и оттаивания необходимо в испытании гарантировать, что действительная температура в образцах будет соответствовать заданной стандартом.

В исследованиях [12, 14, 15] было показано, что время замораживания образцов зависит от их вида и размера, а также от степени загрузки и характеристик климатических камер. В испытаниях образцов размерами $100 \times 100 \times 100$ мм время понижения температуры от 20 до минус 50 °С по датчикам, установленным в бетоне и хлоридном растворе в кювете, составило 4 ч. В то же время датчик климатической камеры, установленный в воздушной среде камеры, показал температуру минус 50 °С уже через 2 ч. При этом допускаемая скорость понижения температуры 5%-го раствора хлорида натрия должна быть не более 15 °С/ч.

Полученные результаты стали основой для разработки изменения № 1 к ГОСТ 10060-2012, в котором установлены новые правила контроля температуры режима третьего ускоренного метода по приборам контроля температуры 5%-го раствора хлорида натрия в емкости вблизи образца, расположенной в центре камеры. Перед началом испытания следует установить режим замораживания по контролю температуры раствора 5%-го хлорида натрия в емкости с образцом, который будет зависеть от размеров испытуемых образцов и объема загрузки камеры – не более 50 % ее полезного объема.

Анализ нормативной документации, приведенный в статье [16], показал, что основной принцип испытания материала на морозостойкость в зарубежных странах такой же, как в отечественных стандартах. Различия в методах отдельных стран имеются в основном в продолжительности замораживания-оттаивания и отчасти в оценке результатов испытания. При этом прослеживается различие методик в отдельных странах в зависимости от их климатических условий.

В зарубежных стандартах в качестве критериев используются динамический модуль упругости, критическое расширение замороженных образцов, количество отделившегося при замораживании материала. Рядом зарубежных авторов показано, что в сравнительных испытаниях образцов, изготовленных в лаборатории и вырезанных из конструкций, отсутствует корреляция результатов. Используют критерий «уменьшение динамического модуля упругости бетона» на 20 [17], 25 [18], 40 % [19].

Образцы, изготовленные в лаборатории и отобранные из конструкций, изготовленные из номинально одинакового бетона, могут в действительности существенно различаться. Это обусловлено различными влажностными и температурными условиями твердения, разным напряженным состоянием в процессе твердения в лабораторных образцах и в армированной железобетонной конструкции.

Другая проблема состоит в том, что условия замораживания и оттаивания бетона в лабораторных условиях и в реальных конструкциях существенно различаются. Если в лаборатории назначенный режим замораживания и оттаивания образцов может быть четко реализован, то в реальной конструкции он может изменяться по многим причинам. К числу этих причин относятся:

- воздействие на бетон в сооружениях переменных климатических температур, влажности, солнечной радиации;
- градиенты температуры по сечению бетона;
- напряженное состояние в бетоне конструкции, вызванное температурными градиентами [20, 21], внешней механической нагрузкой, вызывающей различного вида и величины напряжения в бетоне;
- наличие арматуры существенно изменяет напряженное состояние бетона при замораживании и оттаивании.

В опубликованных работах [20, 21] показано, что растягивающие напряжения, вызывая образование трещин, понижают морозостойкость бетона, а сжимающие напряжения сначала повышают, затем по мере увеличения понижают морозостойкость в сравнении с ненапряженным бетоном. Причиной такого поведения бетона является сложение (вычитание) напряжений, возникающих в бетоне при замораживании, с напряжениями, вызванными другими причинами (механической нагрузкой, образованием в бетоне новых продуктов с увеличением объема, например при реакции щелочей с реакционноспособным кремнеземом заполнителей, поздним образованием этtringита и таумасита, разностью деформаций стальной арматуры и бетона при замораживании, деформациями усадки, другими причинами).

Исследования В. М. Москвина [1] показали, что напряжения при изгибе более $0,35 R_{tb}$ сильно ускоряют морозное разрушение бетона, а при $0,5-0,65 R_{tb}$ разрушение бетона происходит уже после нескольких ЦЗО. При осевом растяжении разрушение бетона при замораживании и оттаивании еще сильнее ускоряется. Авторы отмечают, что при расчете конструкций принимают, что коэффициенты термического расширения бетона и арматуры при положительной температуре практически равны: для бетона – $10 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, для стальной арматуры – $(9-12) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. В действительности в зависимости от вида цемента и заполнителя, а также В/Ц значения этого коэффициента для бетона изменяются в пределах $(8-16) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Компоненты бетона тоже имеют различные коэффициенты термического расширения: цементный камень – $(8-18) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, заполнитель – $(5-14) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. На это различие накладывается также нелинейная зависимость от температуры расширения влажного и водонасыщенного бетонов в области отрицательных температур.

В работе [22] предложен подход к исследованию долговечности бетона, согласно которому долговечность должна исследоваться именно в конструкциях, подчеркнута необходимость выявлять механизмы деструкции.

Натурные испытания бетона на морозостойкость

Натурными испытаниями на морозостойкость бетона на морском стенде ЦНИИС, выполненными с участием Ф. М. Иванова, было показано, что в условиях периодического насыщения бетона морской водой, замораживания обдувом морозным воздухом с помощью вентилятора и оттаивания в морской воде бетон образцов в течение зимнего периода понижал динамический модуль упругости. В летний период величина динамического модуля упругости восстанавливалась. Объяснялось это самозалечиванием трещин в бетоне, образующихся в зимний период. По-видимому, это явление имеет большое значение для долговечности железобетонных конструкций и отчасти объясняет наблюдающуюся стойкость высококачественных бетонов в морских сооружениях. Нами наблюдалось полное зарастание трещин шириной раскрытия до 0,2 мм, специально организованных в попарно изогнутых армированных балках, находившихся несколько лет в приливно-отливной зоне на стенде в Кольском заливе. При этом коррозия стальной арматуры в этих трещинах была незначительной.

Представляет интерес опыт длительной эксплуатации железобетонных конструкций из бетона с проектной прочностью 40 МПа марки по морозостойкости F1000 в здании приливной электростанции (ПЭС), возведенной в губе Кислая Баренцева моря и сданной в эксплуатацию в 1968 г. После 15 лет эксплуатации бетон имел прочность при сжатии 70–86 МПа.

В последующем состояние бетона в конструкциях ПЭС неоднократно обследовалось [23, 24]. После 50 лет эксплуатации бетон в конструкциях не имел повреждений. Образцы-спутники, изготовленные в период строительства станции и находившиеся на морском стенде в зоне прилива-отлива, к этому времени приобрели шарообразную форму. Состояние их оценивалось баллом 1 по классификации С. В. Шестоперова [25]. Кроме того, в приливно-отливной зоне отдельно от здания станции испытывалась изготовленная из того же бетона железобетонная плита. На момент обследования конструкция не имела повреждений, прочность бетона превышала проектную. Обследование стен здания ПЭС после 50 лет эксплуатации не показало повреждений бетона.

Столь различное состояние бетона в образцах и в конструкциях можно объяснить:

- различием теплового режима в процессе замораживания и оттаивания образцов размерами $100 \times 100 \times 100$ мм и массивных железобетонных конструкций в сооружении и в отдельно установленной плите;
- наличием напряжений сжатия в бетоне конструкции здания;
- наличием стальной арматуры в железобетонных конструкциях.

Сделан вывод: состояние стандартных бетонных образцов и железобетонных конструкций из того же бетона в приливно-отливной зоне Баренцева моря существенно различается. Вероятно, бетон образцов, выдержавших натурные испытания, будет заведомо стойким в морском сооружении.

На том же стенде были установлены образцы бетона, подобранного для возведения морских платформ восточнее острова Сахалин (бетоны подобранного состава при строительстве платформ не были использованы). Бетон изготовлен с применением современных эффективных пластификаторов и микрогазообразующих добавок. За время наблюдения образцы, находившиеся на стенде Кислогубской ПЭС более 15 лет, претерпели более 6000 циклов замораживания и оттаивания и не имели повреждений: шелушения поверхности, трещин и скругления углов.

Высокую морозостойкость показали бетонные массивы, изготовленные с микрогазообразующей добавкой ГКЖ-94 [26]. Массивы были установлены в приливно-отливной зоне Кольского залива и через 10 лет не имели повреждений. Далее наблюдение не проводилось. Аналогичные массивы из бетонов без добавки имели сколы ребер и углов через 4 года испытаний.

Следует учитывать, что лабораторный метод замораживания и оттаивания образцов не может полностью воспроизвести процессы, происходящие в бетоне при воздействии реальных нестабильных условий эксплуатации бетона в конструкциях. Лабораторные испытания бетона на морозостойкость следует дополнять натурными испытаниями лабораторных образцов и конструкций в конкретных условиях эксплуатации. Для этого следует восстановить и создать новые стенды для натурных испытаний в районах с суровыми климатическими условиями.

Существенно важной представляется большая работа, выполненная в Новосибирском институте железнодорожного транспорта И. З. Актугановым [27]. В работе освещены результаты исследований, выполненных НИИЖТ МПС в 1969–1999 гг. Предложена методика оценки влияния климатических температурно-влажностных воздействий на эксплуатационную надежность и долговечность бетонных и железобетонных конструкций. Работа прервана в 1991 г. в связи с прекращением финансирования.

Заключение

Выполненный анализ стандартных лабораторных методов испытаний бетона на морозостойкость показал, что испытание бетона на морозостойкость для железобетонных сооружений, предназначенных для эксплуатации в суровых климатических условиях, следует выполнять только с многоцикловым замораживанием и оттаиванием водонасыщенного бетона. Следует продолжить исследования с целью уточнения численных значений и выбора критериев оценки результатов испытаний из следующего перечня:

- снижение прочности бетона;
- потеря массы образцов;
- величина остаточных деформаций;
- изменение динамического модуля упругости;
- уменьшение скорости ультразвука.

Целями таких исследований должно быть сопоставление результатов и выбор критериев оценки состояния бетонных образцов. Сравнение, обоснование и выбор критериев позволит повысить надежность получаемых результатов, уменьшить длительность и трудоемкость испытаний.

Следует поставить вопрос о воссоздании приборов для определения динамического модуля упругости бетонных образцов резонансным методом.

Важно возобновить длительные натурные испытания образцов и конструкций, наблюдения за состоянием железобетонных сооружений в суровых климатических условиях с анализом информации об использованных материалах и технологиях, с оценкой климатических условий и агрессивности среды.

Назрела необходимость в разработке пособия по производству и оценке качества морозостойких бетонов, в котором должны быть отражены вопросы технологии, начиная от вида и выбора исходных материалов (цемента, заполнителей, добавок), состава бетона (В/Ц, расход цемента, соотношение количества мелкого и крупного заполнителя, содержание вовлеченного воздуха, воды), технологии приготовления, уплотнения, режима твердения/выдерживания, заканчивая методами оценки коррозионной стойкости и морозостойкости бетона в конструкции.

Список литературы

1. Москвин В.М., Капкин М.М., Савицкий А.Н., Ярмаковский В.Н. Бетоны для строительства в суровых климатических условиях. Ленинград: Стройиздат; 1973.
2. Кунцевич О.В. Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера. Ленинград: Стройиздат; 1983.
3. Подвальный А.М. Об испытании бетона на морозостойкость. Бетон и железобетон. 1996;[4]:26–29.
4. Нерубенко С.Л., Гвоздев В.А. О совершенствовании методов и испытаний бетона на морозостойкость. Бетон и железобетон. 1998;[5]:21–23.
5. Кунцевич О.В., Жуков Ю.А. Применение добавки ГЖ-94 на строительстве Красноярской ГЭС. В: Применение железобетонных конструкций транспортных сооружений в суровых климатических условиях. Москва; 1974, с. 101–105.
6. Pigeon M., Lemaire F. Etude des propriétés fondamentales de bétons courants soumis à de longs cycles de gel-dégel. Canadian Journal of Civil Engineering. 1980;7(3):407–420. <https://doi.org/10.1139/l80-050>

7. *Pigeon M., Regourd M.* The effects of freeze-thaw-cycles on the microstructure of hydration products. *Durability of Building Materials*. 1986;4(1):1–19.
8. *Зикеев Л.Н., Леонович С.Н.* Неразрушающие методы контроля морозостойкости центрифугированного бетона. В: Коррозия бетона и арматуры в агрессивных средах. Москва: НИИЖБ; 1990, с. 69–77.
9. *Hashold M.T.* Air void structure and frost resistance: a challenge to Powers' spacing factor. *Materials and Structures*. 2014;47(5):911–923. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0102-9>
10. *Шейнфельд А.В.* Научные основы модифицирования бетонов комплексными органоминеральными добавками на основе техногенных пущолоанов и поверхностно-активных веществ [диссертация]. Москва; 2015.
11. *Setzer V.J., Fagerlund G., Janssen D.J.* CDF-Test method for the freeze-thaw resistance of concrete-tests with sodium chloride solution (CDF). *Materials and Structures*. 1996;29(9):523–528. <https://doi.org/10.1007/bf02485951>
12. *Степанова В.Ф., Чехний Г.В., Паршина И.М., Орехов С.А.* Исследование морозостойкости бетона с целью корректировки стандарта ГОСТ 10060-2012. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2021;30(3):78–87. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3\(30\)-78-87](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3(30)-78-87)
13. Исследования по выявлению оптимальной продолжительности циклов замораживания-оттаивания бетонных образцов, как наиболее достоверно отражающие реальные условия эксплуатации бетон конструкций гражданских, промышленных, транспортных и гидротехнических сооружений. Отчет по научно-исследовательской работе. Москва; 2020.
14. *Степанова В.Ф., Чехний Г.В., Паршина И.М., Орехов С.А., Круглов А.И.* Исследование морозостойкости/морозосолеустойкости высокопрочного бетона класса В60-В100. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2022;33(2):183–193. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-183-193](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-183-193)
15. *Степанова В.Ф., Розенталь Н.К., Чехний Г.В., Паршина И.М., Орехов С.А., Джейранов С.Э.* Исследование морозостойкости бетона с целью уточнения методов определения его морозостойкости/морозосолеустойкости. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2020;24(1):108–117.
16. *Фаликман В.Р., Степанова В.Ф., Чехний Г.В.* О нормировании морозостойкости бетона в зарубежной и отечественной практике. *Бетон и железобетон*. 2021; 603(1):8–15.
17. *Palecki S.* Data of CIF test with high performance concrete. Duisburg – Essen: IBPM University.
18. ZTV-W LD 215 (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen des Wasserbaus – Leistungsbereich 215), Neubau von Wasserbauwerken, 2005.
19. Japanese Standards Association (JSA). JIS A 6204. Chemical admixtures for concrete. JSA; 2011.
20. *Лукьянов В.С., Денисов И.И.* Защита бетонных опор мостов от температурных трещин. Москва: Трансжелдориздат; 1959.
21. *Еремеев Г.Г.* Термоупругие напряжения в бетонах при испытаниях на морозостойкость. *Бетон и железобетон*. 1960;(9):393–395.
22. *Чернышов Е.М.* Морозная деструкция бетонов. Часть 1. Механизм, критериальные условия управления. *Строительные материалы*. 2017;(9):40–46.
23. *Усачев И.Н., Розенталь Н.К.* Строительные материалы для морских энергетических сооружений Крайнего Севера. Гидротехническое строительство. 2009;(7):13–21.
24. *Розенталь Н.К., Усачев И.Н., Галашов А.В.* Долговечность железобетонных конструкций Кислогубской ПЭС в Арктике. *Технологии бетона*. 2014;(1):22–26.
25. *Шестоперов С.В.* Долговечность бетона транспортных сооружений. Москва: Транспорт; 1966.
26. *Батраков В.Г.* Повышение долговечности бетона добавками кремнийорганических полимеров. Москва: Стройиздат; 1967.
27. *Актуганов И.З.* Методика оценки влияния климатических температурно-влажностных воздействий на эксплуатационную надежность и долговечность бетона строительных конструкций. Новосибирск: Изд-во СТУПСа; 2005.

References

1. Moskvina V.M., Kapkin M.M., Savitsky A.N., Yarmakovskiy V.N. Concretes for construction in harsh climatic conditions. Leningrad: Stroyizdat Publ.; 1973. (In Russian).
2. Kuntsevich O.V. Concretes of high frost resistance for structures of the Far North. Leningrad: Stroyizdat Publ.; 1983. (In Russian).
3. Basalnyi A.M. On testing concrete for frost resistance. Beton i zhelezobeton. 1996;(4):26–29. (In Russian).
4. Nerubenko S.L., Gvozdev V.A. On the improvement of methods and tests of concrete for frost resistance. Beton i zhelezobeton. 1998;(5):21–23. (In Russian).
5. Kuntsevich O.V., Zhukov Yu.A. Application of the additive GKZH-94 on the construction of the Krasnoyarsk HPP. In: Application of reinforced concrete structures of transport structures in harsh climatic conditions. Moscow; 1974, pp. 101–105. (In Russian).
6. Pigeon M., Lemaire F. Etude des propriétés fondamentales de bétons courants soumis à de longs cycles de gel-dégel. Canadian Journal of Civil Engineering. 1980;7(3):407–420. <https://doi.org/10.1139/l80-050>
7. Pigeon M., Regourd M. The effects of freeze-thaw-cycles on the microstructure of hydration products. Durability of Building Materials. 1986;4(1):1–19.
8. Zikeev L.N., Leonovich S.N. Non-destructive methods of frost resistance control of centrifuged concrete. In: Corrosion of concrete and reinforcement in aggressive environments. Moscow: NIIZHB Gosstroy of the USSR; 1990, pp. 69–77. (In Russian).
9. Hashold M.T. Air void structure and frost resistance: a challenge to Powers' spacing factor. Materials and Structures. 2014;47(5):911–923. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0102-9>
10. Sheinfeld A.V. Scientific bases of concrete modification with complex organomineral additives based on technogenic pozzolans and surfactants [dissertation]. Moscow; 2015. (In Russian).
11. Setzer V.J., Fagerlund G., Janssen D.J. CDF-Test method for the freeze-thaw resistance of concrete-tests with sodium chloride solution (CDF). Materials and Structures. 1996;29(9):523–528. <https://doi.org/10.1007/bf02485951>
12. Stepanova V.F., Chehniy G.V., Parshina I.M., Orekhov S.A. Study of frost resistance of concrete in order to adjust the standard GOST 10060-2012. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2021;30(3):78–87. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3\(30\)-78-87](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3(30)-78-87)
13. Studies on the identification of the optimal duration of freezing-thawing cycles of concrete samples as the most reliably reflecting the real operating conditions of concrete structures of civil, industrial, transport and hydraulic structures. Report on research work. Moscow; 2020. (In Russian).
14. Stepanova V.F., Chehniy G.V., Parshina I.M., Orekhov S.A., Kruglov A.I. Study into the freeze-thaw/ frost-salt resistance of high-strength B60–B100 concrete. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022;33(2):183–193. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-183-193](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-183-193)
15. Stepanova V.F., Rosental N.K., Chehniy G.V., Parshina I.M., Orekhov S.A., Jeyranov S.E. Study of frost resistance of concrete in order to clarify the methods for determining its frost / frost resistance. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2020;24(1):108–117. (In Russian).
16. Falikman V.R., Stepanova V.F., Chehniy G.V. On codification of concrete frost resistance in foreign and domestic practice. Beton i zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete. 2021;603(1):8–15. (In Russian).
17. Palecki S. Data of CIF test with high performance concrete. Duisburg – Essen: IBPM University.
18. ZTV-W LD 215 (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen des Wasserbaus – Leistungsbereich h 215), Neubau von Wasserbauwerken, 2005.
19. Japanese Standards Association (JSA). JIS A 6204. Chemical admixtures for concrete. JSA; 2011.
20. Lukyanov V.S., Denisov I.I. Protection of concrete bridge supports from temperature cracks. Moscow: Transzheldorizdat Publ.; 1959. (In Russian).
21. Yermeev G.G. Thermoelastic stresses in concrete during frost resistance tests. Beton i zhelezobeton. 1960;(9):393–395. (In Russian).
22. Chernyshov E.M. Frost destruction of concrete. Part 1. Mechanism, criteria conditions of management. Stroitel'nye materialy = Construction Materials. 2017;(9):40–46. (In Russian).
23. Usachev I.N., Rosental N.K. Building materials for marine power structures of the Far North. Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo. 2009;(7):13–21. (In Russian).
24. Rosental N.K., Usachev I.N., Galashov A.V. Durability of reinforced concrete structures of the Kislogubskaya PES in the Arctic. Tekhnologii betona. 2014;(1):22–26. (In Russian).

- 25.** *Shestoperov S.V.* Durability of concrete transport structures. Moscow: Transport Publ.; 1966. (In Russian).
26. *Batnikov V.G.* Increasing the durability of concrete with additives of organosilicon polymers. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1967. (In Russian).
27. *Aktuganov I.Z.* Methodology for assessing the influence of climatic temperature and humidity influences on the operational reliability and durability of concrete building structures. Novosibirsk: STOOPs Publishing house; 2005. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Николай Константинович Розенталь, д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительные сооружения, конструкции и материалы» АО «НИЦ «Строительство», Москва

Nikolai K. Rozental, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Department of Buildings, Structures, and Materials, JSC Research Center of Construction, Moscow

Галина Васильевна Чехний✉, канд. техн. наук, заведующий сектором коррозии бетона лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: chehniy@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-76-97

Galina V. Chekhii✉, Cand. Sci. (Engineering), Head of Concrete Corrosion Section, Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: chehniy@mail.ru

tel.: +7 (499) 174-76-97

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author