

УДК 691.32:620.193.21

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-183-193](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-183-193)

EDN: JNGUDK

ИССЛЕДОВАНИЕ МОРОЗОСТОЙКОСТИ/МОРОЗОСОЛЕСТОЙКОСТИ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА КЛАССА В60–В100

В.Ф. СТЕПАНОВА, д-р техн. наук

Г.В. ЧЕХНИЙ[✉], канд. техн. наук

И.М. ПАРШИНА

С.А. ОРЕХОВ

А.И. КРУГЛОВ

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. Освоение нефтяных и газовых месторождений в северной части Атлантического океана и обустройство Арктики приводит к увеличению объемов производства конструкций из высокопрочных бетонов, а придание таким бетонам с низкой проницаемостью повышенной морозостойкости становится все более актуальной задачей.

Цель. Провести экспериментальные исследования для получения достоверных данных с целью разработки стандартизированного подхода к нормированию показателей морозостойкости и морозосолеустойкости высокопрочных бетонов.

Материалы и методы. Работа выполнена на восьми составах бетона класса по прочности на сжатие В60–В100. Морозостойкость/морозосолеустойкость высокопрочных бетонов определена третьим ускоренным методом при насыщении, замораживании и оттаивании образцов в растворе 5 % хлорида натрия с оценкой морозостойкости по прочности, изменению массы и динамического модуля упругости. Проверены различные способы увеличения водонасыщения высокопрочного бетона с целью ускорения сроков испытаний высокопрочных бетонов на морозостойкость.

Результаты. Исследования морозостойкости/морозосолеустойкости высокопрочных бетонов классов по прочности В60–В100 показали их высокую морозостойкость. Через 37 циклов замораживания-оттаивания нижняя граница доверительного интервала прочности основных образцов выше значения нижней границы доверительного интервала прочности контрольных образцов, умноженного на коэффициент 0,9. Бетоны характеризуются маркой по морозостойкости более F₂300. Критического снижения динамического модуля упругости не отмечено, что свидетельствует о наличии значительного запаса морозостойкости/морозосолеустойкости высокопрочного бетона во всех исследованных составах.

Выводы. На основании выполненных сотрудниками НИИЖБ им. А.А. Гвоздева исследований морозостойкости высокопрочных бетонов получены экспериментальные данные для формирования в дальнейшем стандартизированного подхода к нормированию показателей морозостойкости/морозосолеустойкости высокопрочных бетонов.

Ключевые слова: высокопрочный бетон, морозостойкость, морозосолеустойкость, критерий оценки морозостойкости, замораживание-оттаивание

Для цитирования: 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)

Вклад авторов

Степанова В.Ф. – общее руководство.
Чехний Г.В. – научное руководство.
Паршина И.М., Орехов С.А., Круглов А.И. – выполнение экспериментальных исследований.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 18.04.2022

Поступила после рецензирования 13.05.2022

Принята к публикации 17.05.2022

STUDY INTO THE FREEZE-THAW/FROST-SALT RESISTANCE OF HIGH-STRENGTH B60-B100 CONCRETE

V.F. STEPANOVA, Dr. Sci. (Engineering)
G.V. CHEHNIY✉, Cand. Sci. (Engineering)
I.M. PARSHINA
S.A. OREKHOV
A.I. KRUGLOV

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

Abstract

Introduction. The development of the Arctic Region and oil and gas fields in the North Atlantic Ocean leads to an increase in the production of high-strength concrete structures. Thus, it is becoming increasingly vital to make such low-permeability concretes more freeze-thaw resistant.

Aim. To conduct experimental studies for obtaining reliable data required to develop a standardized approach to the normalization of freeze-thaw / frost-salt resistance parameters characterizing high-strength concretes.

Materials and methods. The study was performed using concretes of eight compositions (B60–B100 compressive strength grades). The freeze-thaw/frost-salt resistance of high-strength concretes was determined using the third rapid method involving the saturation, freezing, and thawing of samples in a 5 % sodium chloride solution, as well as assessment of freeze-thaw resistance in terms of strength, mass variation, and the dynamic modulus of elasticity. A variety of methods for increasing the water saturation of high-strength concrete were examined in order to expedite the testing process of high-strength concrete for freeze-thaw resistance.

Results. The studies into the freeze-thaw/frost-salt resistance of high-strength B60-B100 concretes revealed their high freeze-thaw resistance. Following 37 freeze-thaw cycles, the lower confidence limit for the strength of test samples was higher than that of control samples multiplied by a coefficient of 0.9. The frost-resistance grade of these concretes is above F_2300 . No critical decrease in the dynamic modulus of elasticity is observed, which indicates a significant freeze-thaw/frost-salt resistance of all tested high-strength concrete compositions.

Conclusions. The freeze-thaw resistance studies of high-strength concretes carried out at NIIZHB named after A.A. Gvozdev yielded experimental data required to subsequently develop a standardized approach to the normalization of freeze-thaw/frost-salt resistance parameters characterizing high-strength concretes.

Keywords: high-strength concrete, freeze-thaw resistance, frost-salt resistance, freeze-thaw resistance evaluation criterion, freeze-thaw

For citation: 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. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 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)

Author contribution statements

Stepanova V.F. – general supervision.

Chehniy G.V. – scientific guidance.

Parshina I.M., Orekhov S.A., Kruglov A.I. – experimental studies.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 18.04.2022

Revised 13.05.2022

Accepted 17.05.2022

Введение

В связи с увеличением объема применения цементных бетонов в железобетонных конструкциях зданий и сооружениях различного назначения, использованием химических и минеральных добавок в технологии производства бетонных работ возникают проблемы в получении бетонов требуемой долговечности. Из всех вопросов, связанных с обеспечением долговечности бетонных и железобетонных конструкций на территории России, большая часть которой расположена в суровых климатических условиях, особое внимание уделяют изучению и обеспечению морозостойкости/морозосолеустойкости бетона, эксплуатируемого как на воздухе, так и в контакте с различными агрессивными жидкостями.

В последние годы в мировой практике строительства все чаще применяют высокопрочные и сверхвысокопрочные (прочность на сжатие 60–80–100 МПа) бетоны низкой проницаемости на основе органоминеральных модификаторов. В связи с открытием и освоением громадных нефтяных и газовых месторождений в северной части Атлантического океана, обустройством Арктики перспектива значительного увеличения объемов производства конструкций из таких бетонов становится реальной, а задача придать высокопрочным бетонам с низкой проницаемостью также повышенную морозосолеустойкость становится все более актуальной.

Цель

Работа, в которой проведены экспериментальные и теоретические исследования, выполнена с целью получения достоверных данных для разработки стандартизированного подхода к нормированию показателей морозостойкости и морозосолеустойкости высокопрочных бетонов.

Материалы и методы

Исследований по морозостойкости/морозосолеустойкости высокопрочных бетонов крайне мало. Выполненный обзор технической литературы показал, что принцип испытания высокопрочных или высокофункциональных бетонов на морозостойкость в зарубежных стандартах аналогичен отечественным. Различия, в основном, имеются в продолжительности замораживания-оттаивания и оценке результатов испытаний. При этом прослеживается тенденция в различии специфики методик различных стран в зависимости от их климатических условий. Однако на сегодня в нормативной отечественной и зарубежной базе стандартный метод оценки морозостойкости высокопрочных бетонов отсутствует. В каждой стране метод испытания привязан к климатическим условиям, свойствам материалов и применяемым технологиям получения морозостойких бетонов. В России испытание высокопрочного бетона на морозостойкость выполняют при низких отрицательных температурах – до минус 50 °С по ГОСТ 10060-2012 [1], учитывая, таким образом, расширение бетона при замерзании воды в микропорах.

При этом отмечается, что морозостойкость высокопрочных бетонов в значительной степени зависит от характеристик пористости и степени насыщения бетона, количества замерзающей воды, фактора расстояния, скорости замораживания и др. Высокопрочные бетоны могут иметь высокую морозостойкость вследствие отсутствия насыщения водой до критического значения, при котором расширение замерзающей воды способно вызвать повреждение бетона. Однако реальная долговечность высокопрочного бетона в конструкции при морозном воздействии может быть как ниже, так и выше уровня, который определяется маркой бетона по морозостойкости.

На протяжении длительного времени делали попытки приблизить испытания к условиям эксплуатации. Помимо этого, необходимо было максимально ускорить испытания, сделать их методом оперативного контроля морозостойкости бетона, что позволило бы быстро корректировать состав бетона и технологию в процессе изготовления конструкций и в условиях строительства.

Существует объективное противоречие между требованием ускорения испытаний и необходимостью учитывать медленно развивающиеся процессы деструкции бетона. Ускорение испытаний достигают выполнением их в более жестких условиях при низкой температуре, высокой степени насыщения бетона водой или раствором соли. Ужесточая условия испытаний, необходимо устанавливать, в какой степени ускоряется процесс разрушения бетона, т. е. вводить переходные коэффициенты. При этом необходим эталонный метод испытаний в постоянно заданных условиях, относительно которого оценивают результаты ускоренных испытаний.

Ряд авторов предпринимал попытки максимально ускорить оценку морозостойкости бетона по показателям, получаемым без замораживания бетона. Практически все они имеют определенные недостатки.

Наиболее надежным остается метод многократного замораживания и оттаивания. При этом для определения морозостойкости высокопрочных бетонов требуется метод, в котором предусматривается доведение образцов в испытании до критических значений. В противном случае истинная морозостойкость высокопрочного бетона останется неизвестной.

Результаты

В лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций совместно с лабораторией химических добавок и модифицированных бетонов НИИЖБ им. А.А. Гвоздева выполнена научно-исследовательская работа по исследованию морозостойкости/морозосолеустойкости высокопрочного бетона [2]. Согласно Программе экспериментальных исследований были изготовлены образцы восьми составов высокопрочного бетона с органоминеральным модификатором, различающиеся прочностью (класс прочности В60, В80, В100) и структурой (марка по удобоукладываемости П2, П3 и П4 с воздухововлекающей добавкой и без нее). В основу выбора составов бетона положены полученные ранее результаты исследований морозостойкости тяжелых бетонов.

Как было отмечено, при испытании на морозостойкость бетонов высокой прочности и низкой проницаемости такие бетоны не насыщаются водой/растворами за стандартный срок насыщения (4 сут согласно ГОСТ 10060-2012), что приводит к увеличению сроков испытания образцов и, как следствие, завышению марки бетона по морозостойкости/морозосолеустойкости. При этом на степень морозного повреждения существенное влияние оказывает скорость замораживания бетона [3].

Результаты исследований морозостойкости/морозосолеустойкости высокопрочных бетонов показали, что бетоны с низким водоцементным отношением имеют структурные характеристики, отличающиеся от характеристик обычных бетонов [4, 5]. Вследствие снижения объема капиллярных пор и увеличения гелевой пористости эти бетоны, как правило, обладают высокой стойкостью к воздействию отрицательных температур и минерализованных вод. При этом отмечалось, что высокопрочные бетоны могут быть как высокоморозостойкими, так и с невысокой морозостойкостью [6–8]. Нужно учитывать, что поверхностные слои бетона легче насыщаются водой, чем находящиеся на большей глубине.

На первом этапе исследований уточняли возможность ускорения насыщения образцов высокопрочного бетона с целью сокращения времени испытания и повышения надежности определения марки по морозостойкости/морозосолеустойкости.

Для проведения эксперимента были выбраны образцы бетона класса В80 без воздухововлекающей добавки. Ускорение насыщения высокопрочного бетона водой достигали высушиванием образцов при различной температуре (60 и 100 °С) и с вакуумированием при давлении 0,1 МПа.

Сводные результаты определения влияния высушивания и вакуумирования на степень насыщения образцов высокопрочного бетона представлены в таблице.

Масса образцов высокопрочного бетона после насыщения согласно требованиям ГОСТ 10060 увеличилась на 0,09 %. Масса образцов после вакуумирования и насыщения по ГОСТ 10060 увеличилась на 0,42 %. Предварительное длительное насыщение образцов в условиях капиллярного всасывания привело к увеличению массы образцов на 0,27 % от исходной. Полученные результаты свидетельствуют о незначительной степени насыщения образцов высокопрочного бетона.

Высушивание образцов при температуре 60 °С, также высушивание при температуре 60 °С и последующее вакуумирование незначительно сказалось на степени насыщения бетона водой. Потеря массы образцов в процессе высушивания при температуре 60 °С составила 0,54 %.

Таблица

Сводная таблица по результатам определений массы образцов высокопрочного бетона в процессе высушивания, вакуумирования и насыщения

Table

Results of determining the mass of high-strength concrete samples during drying, vacuum treatment, and saturation (tabulated summary)

Сроки контрольных взвешиваний образцов	Прирост массы, %
После насыщения образцов водой в течение 4 сут согласно ГОСТ 10060	0,09
После насыщения образцов в условиях капиллярного всасывания воды в течение 14 сут и последующей выдержки в условиях полного погружения в течение 4 сут	0,27
После высушивания при температуре 60 °С и насыщения в течение 4 сут по ГОСТ 10060	0,64
После высушивания при температуре 60 °С, вакуумирования и насыщения в течение 4 сут по ГОСТ 10060	0,85
После высушивания при температуре 100 °С и насыщения в течение 4 сут по ГОСТ 10060	3,21
После высушивания при температуре 100 °С, вакуумирования и насыщения в течение 4 сут по ГОСТ 10060	4,19
После вакуумирования и насыщения по ГОСТ 10060	0,42

Почти столько образцы поглотили воды в процессе насыщения. Прирост массы после насыщения равен 0,64 %. Вакуумирование способствовало незначительному увеличению массы водонасыщенных образцов до 0,85 %. Учитывая длительность и трудоемкость определений и небольшую степень насыщения, считаем нецелесообразным использовать указанный прием для насыщения высокопрочного бетона.

Наибольшие показатели водонасыщения бетона (4,19 %) получены после высушивания образцов при температуре 100 °С и последующего вакуумирования. При этом потеря массы при высушивании образцов составила 2,83 %.

По мнению авторов [4, 9], введение в состав цементного камня микрокремнезема приводит к снижению капиллярной и увеличению гелевой пористости. Можно полагать, что при температуре высушивания 100 °С, с одной стороны, происходит дегидратация этрингита с потерей значительного количества кристаллизационной воды, а с другой – удаление воды из гелевых пор диаметром 1×10^{-3} – 5×10^{-3} мкм с деформацией структуры цементного камня, что может негативным образом отразиться в дальнейшем при испытании бетона на морозостойкость/морозосолеустойкость. Кроме этого, перемещение воды в бетоне в зависимости от ее состава может вызывать углубление структурных недостатков и приводить к потере бетоном основных технических свойств.

В.В. Стольников [10] проводил сравнительные опыты, в которых одну серию образцов подвергали непрерывным циклам замораживания-оттаивания, а вторую – предварительно высушивали при температуре 105–110 °С. Образцы первой серии выдержали 125 циклов, образцы второй – практически полностью разрушились к 50 циклу. Автор объясняет снижение стойкости образцов, подвергающихся высушиванию при $t \geq 100$ °С, возникновением в бетоне микроскопических трещин вследствие усадочных напряжений в цементном камне.

Анализ полученных данных, с учетом результатов ранее выполненных исследований, позволил сделать следующие выводы:

- насыщение высокопрочного бетона водой происходит весьма медленно;
- способы увеличить водонасыщение высокопрочного бетона – длительная выдержка образцов в условиях капиллярного всасывания воды, их вакуумирование, высушивание при температурах 60 и 100 °С, в том числе и с последующим вакуумированием при давлении 0,1 МПа, – не показали удовлетворительных результатов. Опробованные способы трудоемки, требуют дополнительного оборудования, существенно увеличивают период испытания на морозостойкость/морозосолеустойкость и в дальнейшем могут привести к занижению истинной морозостойкости вследствие нарушения структуры цементного камня высокопрочного бетона.

На следующем этапе исследования были уточнены элементы режима испытаний высокопрочного бетона на морозостойкость по скорости понижения температуры при замораживании, продолжительности периода замораживания, времени оттаивания образцов различного размера.

Согласно ранее выполненным учеными НИИЖБ работам по морозостойкости режим понижения температуры при замораживании принимали в зависимости от времени установления температуры минус 50 °С в растворе вблизи образца, находящегося в кассете, установленной в центре морозильной камеры.

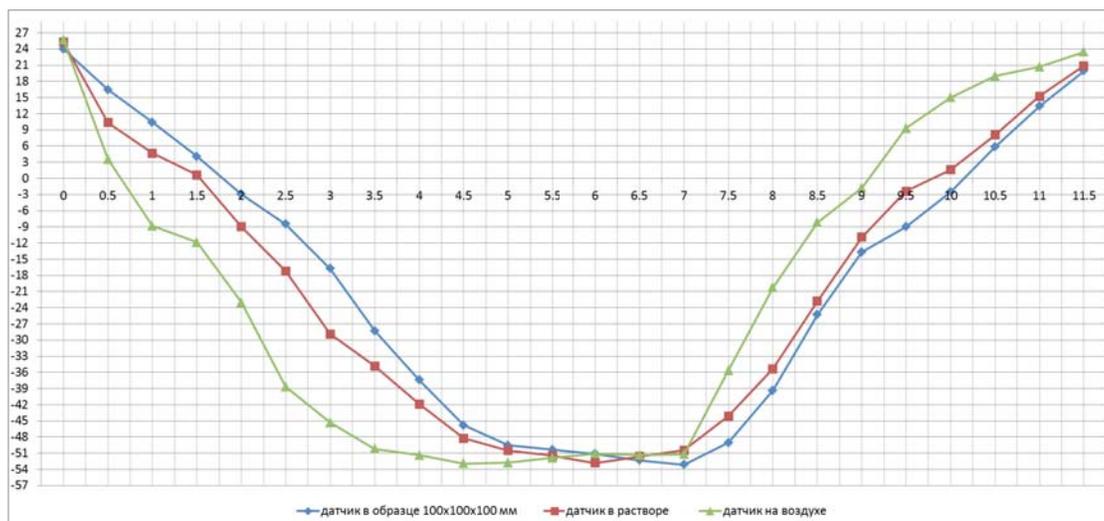


Рис. 1. Режим замораживания-оттаивания образцов размерами 100 × 100 × 100 мм

- понижение температуры от плюс 20 до минус 10 °С – 2,0 ч;
- понижение температуры от минус 10 до минус 50 °С – 2,5 ч;
 - выдержка при температуре минус 50 °С – 2,0 ч;
- повышение температуры от минус 50 до минус 10 °С – 2,0 ч;
- повышение температуры от минус 10 до плюс 20 °С – 2,5 ч

Fig. 1. Freeze-thaw conditions for samples measuring 100 × 100 × 100 mm

- temperature decrease from +20 °С to -10 °С (2.0 hours);
- temperature decrease from -10 °С to -50 °С (2.5 hours);
 - exposure to a temperature of -50 °С (2.0 hours);
- temperature increase from -50 °С to -10 °С (2.0 hours);
- temperature increase from -10 °С to +20 °С (2.5 hours)

Для уточнения режимов испытания высокопрочного бетона на морозостойкость/морозосолеустойкость использовали измеритель температуры многоканальный «Термоизмеритель ТМ-12.2» с 12 термометрами сопротивления.

Испытание проводили на бетонных образцах размерами 100 × 100 × 100 и 100 × 100 × 400 мм при полной загрузке камеры. Результаты термометрических определений приведены на рис. 1 и 2.

Анализ полученных данных показал, что режим понижения температуры замораживания-оттаивания, указанный в Изменении № 1 к ГОСТ 10060, можно распространить и на высокопрочные бетоны. Бетонные образцы высокопрочного бетона размерами 100 × 100 × 400 мм промерзают и оттаивают дольше, чем образцы размерами 100 × 100 × 100 мм. Поэтому при испытании в одной камере образцов высокопрочных бетонов режим замораживания-оттаивания следует устанавливать по образцам наибольшего размера в зависимости от показаний датчиков, расположенных в растворе 5 % хлорида натрия вблизи образца в центре камеры.

Исследования морозостойкости/морозосолеустойкости высокопрочных бетонов классов по прочности В60–В100 по ГОСТ 10060 показали их высокую морозостойкость. Морозостойкость высокопрочного бетона определяли по оценке прочности и динамического модуля упругости резонансным методом. Через 37 ЦЗО соотношение $X_{min}^{II} \geq 0,9X_{min}^I$ сохранено

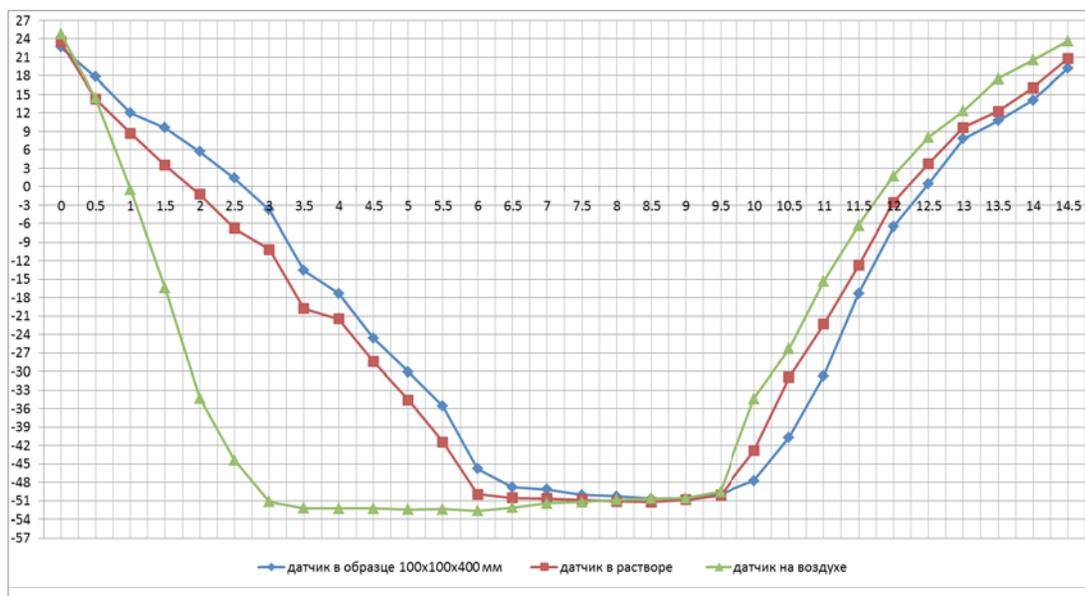


Рис. 2. Режим замораживания-оттаивания образцов размерами 100 × 100 × 400 мм
 – понижение температуры от плюс 20 до минус 10 °С – 3,0–3,5 ч;
 – понижение температуры от минус 10 до минус 50 °С – 2,5–3,0 ч;
 – выдержка при температуре минус 50 °С – 3,0 ч;
 – повышение температуры от минус 50 до минус 10 °С – 3,0 ч;
 – повышение температуры от минус 10 до плюс 20 °С – 2,5 ч

Fig. 2. Freeze-thaw conditions for samples measuring 100 × 100 × 400 mm
 – temperature decrease from +20 °C to -10 °C (3.0–3.5 hours);
 – temperature decrease from -10 °C to -50 °C (2.5–3.0 hours);
 – exposure to a temperature of -50 °C (3.0 hours);
 – temperature increase from -50 °C to -10 °C (3.0 hours);
 – temperature increase from -10 °C to +20 °C (2.5 hours)

во всех составах высокопрочного бетона, изготовленных как с воздухововлекающими добавками, так и без них. Бетон характеризуется маркой по морозостойкости F_{2300} . При этом изменение массы образцов незначительно.

Исследования морозостойкости/морозосолеустойкости высокопрочных бетонов с оценкой динамического модуля упругости показали, что через 37 циклов замораживания-оттаивания уменьшение динамического модуля упругости в образцах-призмах составило 6,2 % по сравнению с исходной величиной динамического модуля упругости (при критическом значении 25 %), что свидетельствует о наличии значительного запаса морозостойкости/морозосолеустойкости высокопрочного бетона во всех исследованных составах.

Выводы

Согласно техническому заданию в работе были запланированы испытания на морозостойкость/морозосолеустойкость высокопрочного бетона маркой по морозостойкости не менее F_{2300} . За период 37 циклов замораживания-оттаивания (2 месяца испытаний) образцы не доведены в испытании до критических значений. Истинная морозостойкость высокопрочного бетона без добавки и с воздухововлекающей добавкой СНВ осталась неизвестна.

Выполненный анализ технической литературы по морозостойкости/морозосолеустойкости высокопрочных бетонов показал, что наиболее надежным является многоцикловое определение морозостойкости таких бетонов. Однако испытания длительны, могут выполняться в течение года и не способны оценивать морозостойкость в конструкции. На сегодня в нормативной отечественной базе стандартные методы оценки морозостойкости бетона в конструкции отсутствуют.

Результаты настоящего исследования позволяют наметить программу исследований на будущее.

Целесообразно для определения морозостойкости/морозосолеустойкости высокопрочных бетонов в качестве базового оставить ускоренный третий метод ГОСТ 10060, а в качестве дополнений к нему разработать методы, включающие оценку морозостойкости бетона в конструкции: по оценке шелушения поверхности бетона; по определению прочности бетона в кернах, отобранных из конструкций; по анализу структуры бетона по фактору расстояния.

Необходимо продолжить исследования по существенному уточнению установленных к настоящему времени количественных зависимостей морозостойкости бетона от характеристик его структурных составляющих.

Следует продолжить длительные испытания для установления корреляции между снижением прочности и динамическим модулем упругости с использованием резонансного метода. Решение о включении испытания по снижению динамического модуля упругости в базовые методы может быть принято после накопления экспериментальных данных и уточнения данных по замораживанию образцов различных размеров.

Учитывая длительность испытания высокопрочных и высокофункциональных бетонов на морозостойкость/морозосолеустойкость, следует рассмотреть возможность при проектировании зданий и сооружений повышенного уровня ответственности заблаговременно оценивать качество исходных материалов для изготовления высокопрочного или высокофункционального бетона, осуществлять подбор бетонных смесей и выполнять испытания бетона на морозостойкость.

Необходимо отметить, что для решения поставленных задач по корректировке и дополнению отечественной нормативной базы в части развития ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости» требуются длительные исследования морозостойкости бетона. Пересмотр стандарта ГОСТ 10060 целесообразен после выполнения ряда работ с разработкой и проверкой методов испытаний, что позволит установить единый подход к проблеме испытания морозостойких бетонов для конкретных зданий и сооружений с учетом жизненного цикла, а следовательно, регламентировать сроки межремонтного периода. Это позволит сократить расходы как при строительстве, так и при эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций зданий и сооружений различного назначения.

Список литературы

1. ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости. Москва: Стандартинформ; 2012.
2. Провести исследования морозостойкости/морозосолеустойкости высокопрочного бетона класса В60-В100 для конструкций зданий и сооружений различного назначения, предназначенных для эксплуатации в условиях вечной мерзлоты: отчет о НИОКР. Рег. № НИОКТР 121061600030-2. Москва: НИИЖБ; 2021.
3. 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.
4. Шейнфельд А.В. Научные основы модифицирования бетонов комплексными органоминеральными добавками на основе техногенных пуццоланов и поверхностно-активных веществ: дис. ... канд. техн. наук. Москва; 2015. 372 с.
5. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кривобородов Ю.Р. Влияние структуры цементного камня с добавками микрокремнезема и суперпластификатора на свойства бетона. Бетон и железобетон. 1992;(7):4–7.
6. Кунцевич О.В. Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера. Ленинград: Стройиздат; 1983.
7. Штарк И., Вихт Б. Морозостойкость и устойчивость бетона к воздействию мороза и размораживающей соли. В: Долговечность бетона. Киев: Оранта; 2004. с. 200–246.
8. Fagerlund G. The influence of slag cement on the frost resistance of the hardened concrete. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute; 1982.
9. Вензель Б.И., Егоров Е.А., Жиженков В.В., Клейнер В.Д. Определение температуры плавления льда в пористом стекле в зависимости от размеров пор. Инженерно-физический журнал. 1982;48(3):461–466.
10. Стольников В.В. О теоретических основах сопротивляемости цементного камня и бетонов чередующимся циклам замораживания и оттаивания. Ленинград: Энергия; 1970.

References

1. GOST 10060-2012 Concrete. Methods for determining frost resistance. Moscow: Standartinform Publ.; 2012. (in Russian).
2. To conduct research on frost resistance/frost and salt resistance of high-strength concrete of class B60-B100 for structures of buildings and structures for various purposes intended for operation in permafrost conditions. R&D report. State registration N NIOKTR 121061600030-2. Moscow: NIIZHB; 2021. (in Russian).
3. Stepanova V.F., Chekhniy G.V., Parshina I.M., Orekhov S.A. Study of the frost resistance of concrete in order to adjust GOST 10060-2012. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2021;30(3):78–87 (in Russian).
4. Sheinfeld A.V. Scientific bases of concrete modification with complex organomineral additives based on technogenic pozzolans and surfactants [dissertation]. Moscow; 2015. 372 p. (in Russian).
5. Kapriyelov S.S., Sheinfeld A.V., Krivoborodov Yu.R. Influence of the structure of cement stone with the addition of microsilica and superplasticizer on the properties of concrete. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 1992;(7):4–7 (in Russian).

6. *Kuntsevich O.V.* Concrete of high frost resistance for buildings in the Far North. Leningrad: Stroyizdat Publ.; 1983 [in Russian].
7. *Shtark I., Wicht B.* Frost resistance and resistance of concrete to frost and thawing salt. In: Durability of concrete. Kyiv: Oranta Publ.; 2004. pp. 200–246 (in Russian).
8. *Fagerlund G.* The influence of slag cement on the frost resistance of the hardened concrete. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute; 1982.
9. *Wenzel B.I., Egorov E.A., Zhizhenkov V.V., Kleiner V.D.* Determination of ice melting temperature in porous glass depending on the pore size. Journal of Engineering Physics. 1985;48(3):346–350. <https://doi.org/10.1007/bf00878204>
10. *Stolnikov V.V.* On the theoretical foundations of the resistance of cement stone and concrete to alternating cycles of freezing and thawing. Leningrad: Energiya Publ.; 1970 [in Russian].

Информация об авторах / Information about the authors

Валентина Федоровна Степанова, д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: vfstepanova@mail.ru

Valentina F. Stepanova, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of Laboratory for Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: vfstepanova@mail.ru

Галина Васильевна Чехний✉, канд. техн. наук, заведующий сектором коррозии бетона, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: chehny@mail.ru

Galina V. Chehny✉, Cand. Sci. (Engineering), Head of Concrete Corrosion Section, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: chehny@mail.ru

Ирина Михайловна Паршина, научный сотрудник, сектор коррозии бетона, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Irina M. Parshina, Researcher, Concrete Corrosion Section, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

Сергей Александрович Орехов, научный сотрудник, сектор коррозии бетона, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Sergey A. Orekhov, Researcher, Concrete Corrosion Section, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

Артем Игоревич Круглов, инженер, сектор коррозии бетона, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Artem I. Kruglov, Engineer, Concrete Corrosion Section, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author