

УДК 666.972.5+624.012.45.042.5

DOI 10.52928/2070-1683-2023-33-1-19-26

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ДОЛГОВЕЧНОГО БЕТОНА ДЛЯ МОРСКИХ ПОРТОВЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ МОРОЗНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В.В. МАЛЮК¹⁾, канд. техн. наук, доц. **В.Д. МАЛЮК²⁾**,
 д-р техн. наук, проф. **С.Н. ЛЕОНОВИЧ³⁾**, **А.В. КОЛОДЕЙ⁴⁾**
^{1), 2)}ООО «Трансстрой-Тест», Южно-Сахалинск,
^{3), 4)}Белорусский национальный технический университет, Минск,
³⁾Институт Циндао, Китай)
¹⁾mvv.77@mail.ru, ²⁾mvd46@bk.ru, ³⁾sleonovich@yandex.ru,
⁴⁾zhuravskaya.alin@yandex.by

В настоящее время проектирование конструкций со сроком службы 50 лет в условиях морозного воздействия проводится на основе нормативных документов, которые рекомендуют требования к показателям качества бетона, его составу и материалам для его изготовления. В определенной степени – это предписывающий принцип, поскольку рекомендуемые требования, принятые во время проектирования, являются обязательными на этапе строительства. Уровень требований зависит от агрессивности среды и параметров температурных воздействий. В результате лабораторного подбора определяется рабочий состав бетона, на основании которого отработывается технология бетонных работ. Для обеспечения срока службы бетона 50 лет в агрессивной среде класса XF 4 при морозном воздействии рекомендовано применять следующие ограничения к составу и показателям качества бетона: водоцементное отношение (В/Ц) – не выше 0,45; расход цемента – не менее 340 кг/м³; воздухововлечение – не менее 4%; класс прочности бетона – не менее В35; марка по морозостойкости – в зависимости от температуры воздуха зимой в районе строительства. Ряд ограничений установлен к качеству материалов для бетона (цемента, щебня, песка, воды) и показателям технологических свойств бетонной смеси.

Расчетных методов подбора состава требуемой морозостойкости не разработано. Поэтому состав бетона требуемой марки по морозостойкости определяется методом подбора. В связи с этим подбор состава бетона по морозостойкости представляет продолжительный, сложный и трудоемкий процесс, выполняемый специалистами-технологами высокого уровня. Расчетные методы прогноза долговечности разрабатываются для оптимизации проектных решений за счет учета реальных условий эксплуатации сооружений и применения материалов с показателями качества, достаточными для обеспечения требуемого срока службы конструкций в конкретных условиях эксплуатации. Разработка методов расчета долговечности бетона предопределяет необходимость исследовать эффективность технологических приемов, используемых при изготовлении конструкций, и граничные пределы требований к технологии бетона для обеспечения долговечности конструкций в условиях морозного воздействия.

Ключевые слова: бетон, долговечность, морские портовые сооружения, транспортные сооружения, проектирование, технология, морозное воздействие.

Введение. Состояние вопроса. Современный подход к проектированию бетонных конструкций по долговечности в условиях морозного воздействия основан на обязательном выполнении предписывающих требований. Рассмотрен методологический подход к проектированию долговечности для морских портовых и транспортных сооружений. На рисунке 1 представлена принципиальная схема методологии создания долговечных бетонов при морозном воздействии. В общем виде ее можно представить как систему, состоящую из подсистем, каждая из которых характеризуется критическими показателями. В настоящее время для этих показателей рекомендованы параметры, позволяющие обеспечить срок службы бетона 50–100 лет в различных агрессивных средах.

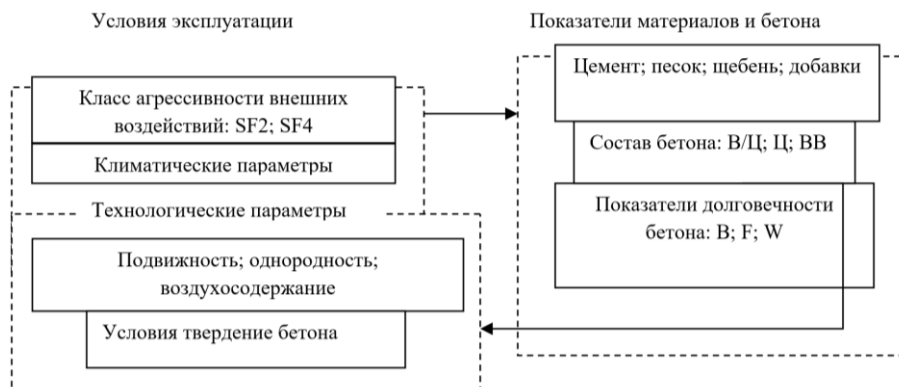


Рисунок 1. – Схема критических параметров для организации технологии бетонных работ в соответствии с нормативными требованиями

Опыт строительства и эксплуатации морских портовых сооружений показывает, что обоснованное назначение параметров на этапе проектирования долговечности и реализации этих параметров на этапе изготовления конструкций позволяет обеспечить безремонтный срок службы конструкций в агрессивных средах класса SF 4 не менее 50 лет. Наши исследования показали, что традиционные технологии позволяют обеспечить срок службы конструкциям не менее 100 лет при марке морозостойкости F₅₀. Это показывает, что бетон, изготовленный по современным требованиям, имеет морозостойкость на порядок выше, чем это требуется для обеспечения долговечности.

Однако наблюдаемые случаи преждевременного разрушения конструкций вызывают необходимость исследовать причины этого несоответствия¹ [1–13]. Поэтому целесообразно установить, на каких технологических переделах возникают риск несоответствий и их причины.

Модель прогноза долговечности. Результаты исследований показали, что если принять в качестве определяющего критического параметра долговечности степень насыщения пор бетона S_{ACT} , модель прогноза долговечности бетона при морозном воздействии должна строиться на установлении условий сочетания факторов, при которых возникают условия критического водонасыщения S_{CR} . В этом случае основная цель проектирования бетона по долговечности в условиях морозного воздействия – обосновать назначение показателей бетона, которые за период службы в конкретных условиях эксплуатации конструкций исключают возможность критического водонасыщения пор бетона, т.е. обеспечить условие $S_{ACT} \leq S_{CR}$.

Результаты исследований дают основания считать, что долговечность бетона при морозном воздействии в преобладающих случаях определяется стойкостью к морозной нагрузке в первый зимний сезон. Долговечность бетона следует привязывать к условиям эксплуатации, поскольку критическая степень насыщения бетона S_{CR} зависит от морозной нагрузки. Поэтому для прогнозирования долговечности необходимо знать сочетание показателей S_{ACT} и P_F , при котором сохраняется условие $S_{ACT} \leq S_{CR}$, поскольку в этом случае появляются благоприятные условия для дальнейшего совершенствования структуры порового пространства, с точки зрения морозостойкости, за счет процессов гидратации цементного камня. Следовательно, долговечность бетона при морозном воздействии – это период сохранения в структуре бетона условия $S_{ACT} \leq S_{CR}$.

При условии $S_{ACT} > S_{CR}$ высокая вероятность образования в стенках пор микротрещин, появление которых в поровом пространстве создает новую структуру пор. Образование пор в виде микротрещин характеризует начало этапа деградации в двухстадийном процессе коррозии бетона при морозном воздействии. Это принципиально меняет не только поровое пространство, но и механизм коррозии бетона. Поэтому целесообразно рассматривать процессы коррозии бетона при морозном воздействии отдельно на стадии инициации и деградации. Продолжительность периода инициации характеризуется условием $S_{ACT} < S_{CR}$ и является показателем долговечности. Этап деградации характеризуется условием $S_{ACT} > S_{CR}$, а его продолжительность определяется уровнем эксплуатационной пригодности конструкции. Исходя из этого, срок службы бетона в конструкции следует прогнозировать из условия долговечности и эксплуатационной пригодности.

Проектирование бетона на принципах эксплуатационных характеристик предопределяет необходимость иметь модель прогноза долговечности с учетом реальных условий эксплуатации. Результаты проведенных исследований дают возможность представить концепцию, которую целесообразно использовать для построения модели долговечности бетона в условиях морозного воздействия.

Графики на рисунке 2 визуализируют сценарии кинетики насыщения бетона в период службы сооружения на примере эксплуатации сооружения К1. Срок службы сооружения К1 составляет 90 лет, и на рисунке 2

¹ Leonovich, S.N. The aggressive influence on the concrete and the modes to provide it's corrosion resistance // Materials Science and Restoration: Proc. 3-rd Intern. Colloq. – Esslingen, 1992. – Vol. 3. – P. 1443–1449.

Leonovich S.N., Shevchenko V.I. The structure of the concrete and it's durability // Materials Science and Restoration: Proc. 3-rd Intern. Colloq. – Esslingen, 1992. – Vol. 3. – P. 1652–1658.

ГОСТ 29167-91. Бетоны. Методы определения характеристики трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 15 с.

Leonovich S.N. The influence of cyclic freezing and thawing on cracking of concrete // Durability and service life of bridge structures: Proc. of 2-nd Intern. Scien. Conf. – Poznan, 1994. – P. 163–166.

Leonovich S.N. Fracture Mechanics Parameters of Concrete: Test Methods Development and Harmonization of Standards // Concrete in The Service of Mankind: Intern. Congress. – Dundee, 1996.

Leonovich S.N. The Non-Destructive Diagnostic Methods of Concrete-Lined Tunnels // Proc. of World Tunnel Congress. – Vienna, 1997.

Leonovich S.N. The Influence of Structure of Concrete on Frost-Salt Resistance // Proc. of 13-th International Conference of Building Materials (13 IBAUSIL). – Weimar, 1997. – Vol. 2. – P. 263–268.

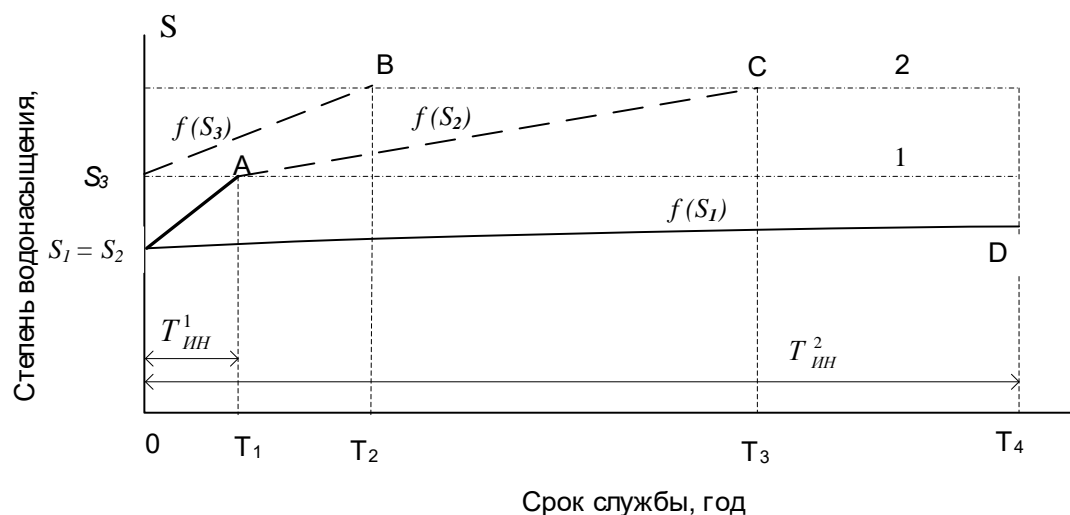
Leonovich S.N. Fracture Mechanism for Estimation of Freeze – Thaw Resistance of Concrete // 15 Internationale Baustofftagung, Germany, 24–27 September 2003. – Weimar, 2003.

Frost Resistance of High-Performance Selfstressed Concrete under Pure Frost Attack / S.N. Leonovich, B.M. Khroustaliyev, W.F. Zverew et al. // Keep Concrete Attractive: Proc. of the fib Symposium. – Budapest, 2005. – C. 275–279.

Leonovich S.N., Al-Fakih O. Durability of self-stressed (expansive) concrete // Proc. of the fib Congress. – Naples, 2006.

Leonovich S.N., Snezkov D.Yu. Complex Method of Strength Estimation of the Monolithic Reinforced Concrete Structures // Concrete Structures – Stimulators of Development: Proc. of the fib Symposium Dubrovnik, 2007. – Zagreb, 2007. – P. 947–954.

он представлен отрезком 0- T_4 . За этот период прочность бетона существенно возросла, что подтверждает обоснованность условия долговечности $S_{ACT} < S_{CR}$. Это условие отображает график $f(S_1)$ и характеризует кинетику водонасыщения S_{ACT} от морозной нагрузки $P_{F1} = f(t_F, N_{FT})$. Реальная нагрузка от внешних воздействий не оказала негативного влияния на прочностные характеристики бетона, что косвенно может характеризовать структуру основной массы бетона как долговечная, поэтому нет оснований полагать, что снижение прочности бетона будет происходить в дальнейший период эксплуатации. С практической точки зрения, бетон имеет беспредельную долговечность.



- 1 – предельный уровень долговечности (S_{CR});
 2 – предельный уровень эксплуатационных характеристик;
 $f(S_1)$; $f(S_3)$ – зависимость долговечности для условий эксплуатации $S_{ACT}^1 = f(t_F, N_{FT})$;
 $f(S_2)$ – зависимость долговечности для условий эксплуатации $S_{ACT}^2 = f(t_F, T_F)$

Рисунок 2. – Схема сценариев долговечности бетона в зависимости от кинетики насыщения бетона S_{ACT} в зоне переменного уровня в зависимости от состава бетона и морозной нагрузки в период срока службы сооружения

Анализ лабораторных исследований. Лабораторные исследования показали, что повышение морозной нагрузки за счет понижения температуры замораживания принципиально изменяет процесс коррозии бетона. Несколько десятков циклов ПЗО при более низкой температуре замораживания приводят к полному разрушению бетона. Причина разрушения, очевидно, связана с тем, что уже при первом замораживании уровень морозной нагрузки привел к насыщению пор до критической степени, т.е. $S_{ACT} \geq S_{CR}$, а последующие циклы развивали деградацию структуры за счет микротрещинообразования. На рисунке 2 отрезок 0- T_1 характеризует начальный этап периода инициации ($T_{ин}^1$), который определяет долговечность после первого зимнего сезона.

Причины разрушения бетона в первый зимний сезон. Сценарии водонасыщения и долговечности на графиках $f(S_2)$ и $f(S_3)$ объясняют возможные причины разрушения бетона в первый зимний сезон. Точки А и В на графиках рисунка 2 характеризуют переход процесса коррозии от стадии инициации в стадию деградации. Как видно (см. рисунок 2), бетоны одного состава $S_1 = S_2$ могут иметь разную долговечность, что обусловлено различием морозной нагрузки. Для сценария $f(S_2)$ после точки А срок службы определяется не долговечностью бетона, а эксплуатационной пригодностью. Несмотря на то, что ресурс долговечности бетона будет исчерпан после первого зимнего сезона, эксплуатационная пригодность конструкции может сохраняться длительное время. Поэтому периоды после точек А и В характеризуют не долговечность, а эксплуатационную пригодность конструкции. При условии, что после первого зимнего периода степень насыщения пор S_{ACT} не достигает критической степени насыщения S_{CR} , в дальнейшем за счет совершенствования структуры бетона степень ее насыщения не должна повышаться. Это должно являться основополагающим положением при проектировании долговечных бетонов в условиях морозного воздействия. График функции $f(S_1)$ иллюстрирует продолжительность долговечности для случая эксплуатации сооружения К1.

В течение первого зимнего периода может происходить внезапный отказ при морозной нагрузке $P_{F2} = f(t_F, T_F)$ в условиях обледенения, который проявляется в виде отслоения бетона толщиной несколько сантиметров, т.е. приводит к разрушению защитного слоя в железобетонных конструкциях. Наиболее актуально это для железобетонных конструкций, поскольку дальнейший процесс развития коррозии конструкции будет зависеть не только от уровня морозной нагрузки и морозостойкости бетона, но и от интенсивности коррозии арматуры. Следовательно, срок службы конструкций в морских портовых и транспортных сооружениях можно рассматривать

из условия долговечности и условия эксплуатационной пригодности. Поэтому методы проектирования и прогнозирования должны строиться с учетом двухстадийности процесса коррозии при морозном воздействии. Разделение процесса коррозии бетона при морозном воздействии на две стадии обусловлено тем, что, исходя из современных теоретических положений, на стадии инициации и деградации преобладают различные физические процессы.

Полученные результаты дают основания считать:

- 1) модель срока службы конструкции по долговечности должна строиться на основе критерия $S_{ACT} < S_{CR}$;
- 2) модель срока службы конструкции по эксплуатационной пригодности должна строиться на кинетике деградации структуры бетона, которая проявляется в снижении прочности R или в скорости разрушения бетона χ .

Исходя из теории вероятности отказа и срока службы, простейшая модель для описания события «отказа» включает переменную нагрузки S и переменную сопротивления R . В принципе переменные S и R могут быть любыми величинами и выражаться в любых единицах. Единственное требование – они должны быть соизмеримы. Отказ происходит при условии:

$$(\text{отказ}) = R < S. \quad (1)$$

При этом вероятность отказа P_f может происходить внезапно

$$P_f = P(R < S). \quad (2)$$

Либо в течение периода эксплуатации t , когда величины R и S изменяются, и отказ происходит при достижении условия (1) в момент времени τ , т.е. происходит деградационный отказ

$$P_f(t) = P[R(\tau) < S(\tau)]. \quad (3)$$

Полученные результаты показывают, что при эксплуатации морских портовых и транспортных сооружений может происходить как внезапный, так и деградационный отказ. Внезапный отказ проявляется после первого зимнего сезона.

Результаты исследований показывают, что для внезапного отказа необходимы следующие условия:

- 1) наличие критической степени водонасыщения пор перед началом замораживания бетона, т.е. наличия условия $S_{ACT} > S_{CR}$;
- 2) возможность перераспределения свободной воды в структуре бетона за счет миграции к зоне промерзания и образования локальных участков с критическим водонасыщением, т.е. переход водонасыщения от $S_{ACT} < S_{CR}$ к состоянию $S_{ACT} > S_{CR}$.

Полученные результаты показывают, что условие водонасыщения вида $S_{ACT} > S_{CR}$ возникает при структурной зрелости бетона $S_f < 1$, т.е. когда система капиллярных пор в цементном камне непрерывная или в структуре бетона имеется свободная вода, способная к перераспределению при температурном градиенте. Поэтому прогноз долговечности бетона делать не имеет смысла из-за высокой вероятности внезапного отказа. В этом случае на строительной площадке необходимо создать условия для формирования требуемой структурной зрелости бетона.

Результаты натуральных исследований. Результаты натуральных исследований показывают, что при условии $S_{ACT} < S_{CR}$ и недостаточной зрелости структуры бетона при длительном обледенении конструкций происходит перераспределение свободной воды к зоне промерзания. В результате происходит разрушение поверхностного слоя в виде корки. Характер и вид разрушения бетона дает основания полагать, что это связано с перераспределением влаги в его структуре и насыщением бетона до критической степени на границе его промерзания. Для внезапного отказа характерно как поверхностное, так и объемное разрушение после первого зимнего сезона.

При деградационном отказе повреждение от морозного воздействия первоначально, как правило, проявляется как уменьшение прочности в поверхностном слое. Повреждение структуры бетона может происходить в объеме материала без внешних признаков за счет микротрещинообразования. Развитие процесса деградации в последующие зимние сезоны будет зависеть как от значения морозной нагрузки (P_{F1} ; P_{F2}), так и от уровня повреждения, которое структура бетона получила после первого зимнего сезона. Результаты исследований показывают, что после первого зимнего сезона может происходить как поверхностное, так и объемное разрушение бетона. В последнем случае происходит, например, полное разрушение бортовых камней, а в массивных конструкциях наблюдается разрушение поверхностного слоя на глубину до 50 мм. Поэтому модель прогноза эксплуатационной пригодности (далее – работоспособности) целесообразно рассматривать исходя из показателей, которые будут приниматься для оценки работоспособности конструкции. При отсутствии видимых разрушений модель прогноза целесообразно строить на основе концепции кинетики снижения прочности (R), а при наличии повреждений – на основе концепции скорости разрушения бетона (χ).

Этапы деградации бетона. Как видно, на стадии деградации бетона тоже целесообразно рассматривать два этапа:

- 1 этап – период потери прочности до уровня, при котором происходит разрушение поверхностного слоя бетона;

2 этап – период повреждения поверхностного слоя до критической величины. Критическая величина разрушения для железобетонных конструкций – это толщина защитного слоя, для бетонных конструкций – потеря эксплуатационной пригодности конструкции или ее элемента.

На рисунке 3 показана схема с периодами долговечности и работоспособности бетона в конструкции, в которой выделены три характерных этапа:

- 1) этап долговечности, который характеризуется периодом инициации ($T_{ин}$);
- 2) этап снижения прочности на стадии деградации ($T_{дг}^R$);
- 3) этап разрушения поверхностного слоя ($T_{дг}^h$).

Безусловно, данная схема является лишь визуализацией продолжительности жизненного цикла бетона в период эксплуатации, однако на основании этого можно переходить к исследованию факторов, определяющих кинетику каждого из выделенных периодов: $T_{ин}$; $T_{дг}^R$; $T_{дг}^h$. Это можно рассматривать как начальный этап разработки модели прогноза для проектирования конструкций по эксплуатационным характеристикам (работоспособности).

Стадию деградации целесообразно рассматривать как двухэтапный период, поскольку характеры повреждения бетона на этапах существенно различаются и по-разному влияют на эксплуатационную пригодность конструкции или сооружения. Степень влияния определяется функциональным назначением конструкции в сооружении.

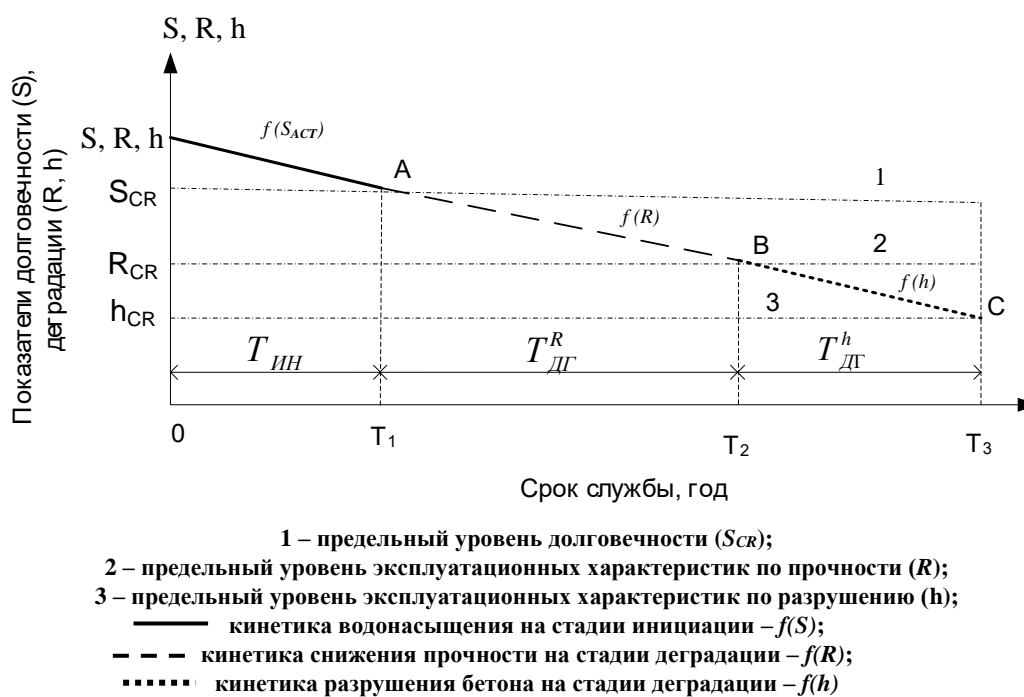


Рисунок 3. – Схема этапов жизненного цикла бетона при эксплуатации в условиях морозного воздействия

Результаты проведенных исследований показывают, что при отсутствии стадии инициации кинетика развития деградационных процессов на этапах $T_{дг}^R$ и $T_{дг}^h$ в значительной степени будет зависеть от вида морозной нагрузки и среды замораживания бетона. Есть основания полагать, что наибольшая скорость развития деградационных процессов будет при нагрузке вида $P_{FI} = f(t_F, N_{FT})$. Первоначально при снижении прочности бетона в поверхностном слое поврежденный слой некоторое время будет выполнять защитные, но не конструктивные (расчетные) функции. Защитные функции поврежденного слоя при условии $S_{акт} > S_{CR}$ заключаются в том, что он будет сдерживать продвижение границы промерзания и насыщения поверхностного слоя. За счет этого будет замедляться деградация последующих слоев бетона. Однако при достижении критической прочности R_{CR} возникают условия для разрушения бетона от механических воздействий на него. В конструкциях портовых сооружений это происходит от воздействия волн и плавающего льда, в конструкциях транспортных сооружений – от воздействия снегоуборочной техники при зимнем обслуживании автодорог.

Известен ряд математических моделей для прогноза снижения прочности бетона при морозном воздействии. Анализ этих моделей показывает, что их можно использовать для прогноза долговечности на этапах $T_{дг}^R$ и $T_{дг}^h$ стадии деградации, т.е. эти модели можно применять для прогноза продолжительности деградационного

периода. Проведенные исследования показывают, что в силу неоднородности бетона, разрушение его в конструкциях имеет локальный характер и протекает с непостоянной скоростью, поэтому необходима представительная выборка для статистической обработки.

Наблюдаемые локальные разрушения бетона различной степени повреждения в зоне прилива являются свидетельством того, что показатели бетона носят статистический характер и проявляются в зависимости от значения внешней нагрузки. Результаты исследований показывают, что значение внешней нагрузки может зависеть от конструктивного решения сооружения в зоне переменного уровня воды. На участке действия прилива разрушения имеют локальный характер и отличаются масштабом повреждения. Например, в зоне переменного уровня бетон конструкции сооружения К1 имеет разрушения по глубине от нескольких сантиметров до десятка сантиметров, а площадь повреждения от 0,3 до 2,0 м². Есть все основания полагать: причина этих разрушений связана с тем, что к началу морозного воздействия поры бетона на локальных участках разрушения уже имели критическую степень водонасыщения S_{CR} или критический уровень водонасыщения достигался после непродолжительного периода инициации. Схема долговечности и кинетики водонасыщения бетона (см. рисунок 3) показывает возможность классифицировать бетон как долговечный или недолговечный. Характер и объем разрушений, с одной стороны, позволяют устанавливать преобладающий механизм коррозии бетона, а с другой – позволяют делать объективное заключение о качественных показателях бетона, необходимых для обеспечения долговечности конструкций в конкретных условиях эксплуатации. При этом пробы бетона следует отбирать из неповрежденных участков конструкций, а влияние морозных воздействий оценивать кинетикой набора прочности бетона за период эксплуатации. На этой основе должны строиться прогнозные методы долговечности и проектирование бетона по эксплуатационным характеристикам. Это позволит определять:

- критические параметры технологии бетона для обеспечения требуемой долговечности конструкций;
- направления дальнейшего совершенствования технологии долговечного бетона в условиях морозного воздействия с учетом требований эксплуатационной пригодности сооружения.

Заключение. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Морозная нагрузка и механизм замораживания бетона предопределяют как кинетику насыщения пор, так и механизмы разрушения бетона. Даже в одной конструкции в процессе эксплуатации возможна трансформация механизмов разрушения и значимости факторов, определяющих работу этих механизмов.

2. При проектировании конструкций необходимо вести расчет по долговечности и работоспособности. Поэтому должны назначаться требования как к показателям качества бетона, так и к организации технологии бетонных работ, которая должна учитывать реальные условия строительной площадки и условия эксплуатации конструкций в сооружении.

3. Наши исследования показывают, что проектирование долговечности бетона в условиях морозного воздействия целесообразно проводить на основе принципов, принятых для технологии высокой морозостойкости, уделяя особое внимание этапам, которые связаны с формированием структурной зрелости бетона к началу морозного воздействия. Этот этап является определяющим в технологии морозостойкого бетона, поэтому во время проектирования следует особое внимание уделять требованиям не только к составам бетона, но и к условиям формирования его структуры до начала морозного воздействия в зависимости от состава бетона.

4. Проектирование бетона с требуемой долговечностью – это обоснование требований к составу бетона на основании реальных условий эксплуатации конструкций и к технологии бетона с учетом условий строительной площадки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Леонович С.Н. Долговечность центрифугированных железобетонных конструкций при циклическом замораживании и оттаивании // Бетон и железобетон. – 1988. – № 10. – С. 40–42.
2. Леонович С.Н., Иванов Ф.М., Зикеев Л.Н. Структура и морозостойкость центрифугированного бетона с добавками // Исследование и применение химических добавок. – 1988. – С. 59–66.
3. Леонович С.Н., Зикеев Л.Н. Неразрушающие методы контроля морозостойкости центрифугированного бетона // Коррозия бетона и арматуры в агрессивных средах. – 1990. – С. 69–77.
4. Разрушение бетона и его долговечность: моногр. / Е.А. Гузеев, С.Н. Леонович, А.Ф. Милованов и др. – Минск: Тыздзень, 1997. – 170 с.
5. Leonovich S.N. Calculation of Durability of Concrete Monuments using Fracture Mechanics // Internationale Zeitschrift für Bau- und Denkmalpflege. – 1999. – №. 6. – P. 7.
6. Леонович С.Н. Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов в терминах силовых и энергетических критериев механики разрушения: моногр. – Минск: Тыздзень, 2000. – 266 с.
7. Леонович С.Н. Коррозия арматуры: общие подходы к расчету долговечности железобетонных конструкций // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Стр.-во и архитектура. – 2002. – № 1. – С. 38–43.
8. Прочность конструктивных бетонов при циклическом замораживании-оттаивании с позиции механики разрушения: моногр. // Под ред. С.Н. Леоновича. – Брест: БрГТУ, 2006. – 379 с.

9. Schneider U., Leonovich S. Recommendation of RILEM TC 200-HTC: Mechanical Concrete Properties at High Temperatures – Modeling and Applications. Part. 1: Introduction – General Presentation and Oth // *Materials and Structures*. – 2007. – Vol. 40, № 9. – P. 841–853.
10. Characterization of the Influence of Carbon Nanomaterials on the Mechanical Behavior of Cement Stone / J. Eberhardsteiner, S. Zhdanok, P. Samtsouw et al. // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2011. – Vol. 84, № 4. – P. 753–760.
11. Зайцев Ю.В., Леонович С.Н., Шнайдер У. Структура, прочность и механика разрушения бетонов при двухосном и трехосном сжатии: моногр. – Минск: БНТУ, 2011. – 382 с.
12. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях: моногр. в 2 ч. / С.Н. Леонович, Д.А. Литвиновский, О.Ю. Чернякевич и др. – Ч. 1. – Минск: БНТУ, 2016. – 390 с.
13. Гузеев Е.А., Леонович С.Н., Пирадов К.А. Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики: моногр. – Брест: БПИ, 1999. – С. 71–85.

REFERENCES

1. Leonovich, S.N. (1988). Dolgovechnost' tsentrifugirovannykh zhelezobetonnykh konstruksii pri tsiklicheskom zamorazhivanii i ottaivanii. *Beton i zhelezobeton*, (10), 40–42. (In Russ.).
2. Leonovich, S.N., Ivanov, F.M. & Zikeev, L.N. (1988). Struktura i morozostoikost' tsentrifugirovannogo betona s dobavkami. *Issledovanie i primenenie khimicheskikh dobavok*, 59–66. (In Russ.).
3. Leonovich, S.N. & Zikeev, L.N. (1990). Nerazrushayushchie metody kontrolya morozostoikosti tsentrifugirovannogo betona. *Korroziya betona i armatury v agressivnykh sredakh*, 69–77. (In Russ.).
4. Guzeev, E.A., Leonovich, S.N., Milovanov, A.F., Piradov, K.A. & Seilanov, L.A. (1997). *Razrushenie betona i ego dolgovechnost': monogr.* Minsk: Tydzen'. (In Russ.).
5. Leonovich, S.N. (1999). Calculation of Durability of Concrete Monuments using Fracture Mechanics. *Internationale Zeitschrift für Baudenkmalpflege*, (6), 7.
6. Leonovich, S.N. (2000). *Treshchinostoikost' i dolgovechnost' betonnykh i zhelezobetonnykh elementov v terminakh silovyykh i energeticheskikh kriteriev mekhaniki razrusheniya: monogr.* Minsk: Tydzen'. (In Russ.).
7. Leonovich, S.N. (2002). Korroziya armatury: obshchie podkhody k raschetu dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruksii. *Vestn. Brest. gos. tekhn. un-ta. Str-vo i arkhitektura*, (1), 38–43. (In Russ.).
8. Leonovich, S.N. (Eds.) (2006). *Prochnost' konstruksionnykh betonov pri tsiklicheskom zamorazhivanii-otvaivanii s pozitsii mekhaniki razrusheniya: monogr.* Brest: BrGTU. (In Russ.).
9. Schneider, U., Leonovich, S. (2007). Recommendation of RILEM TC 200-HTC: Mechanical Concrete Properties at High Temperatures – Modeling and Applications. Part. 1: Introduction – General Presentation and Oth. *Materials and Structures*, 40(9), 841–853.
10. Eberhardsteiner, J., Zhdanok, S., Samtsouw, P., Khroustalev, B., Batsianouski, E. & Leonovich, S. (2011). Characterization of the Influence of Carbon Nanomaterials on the Mechanical Behavior of Cement Stone. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 84(4), 753–760.
11. Zaitsev, Yu.V., Leonovich, S.N. & Shnaider, U. (2011). *Struktura, prochnost' i mekhanika razrusheniya betonov pri dvukhosnom i trekhosnom szhatii: monogr.* Minsk: BNTU. (In Russ.).
12. Leonovich, S.N., Litvinovskii, D.A., Chernyakevich, O.Yu. & Stepanova, A.V. (2016). *Prochnost', treshchinostoikost' i dolgovechnost' konstruksionnogo betona pri temperaturnykh i korrozionnykh vozdetsivnyakh: monogr. v 2 ch., Ch. 1.* Minsk: BNTU. (In Russ.).
13. Guzeev, E.A., Leonovich, S.N. & Piradov, K.A. (1999). *Mekhanika razrusheniya betona: voprosy teorii i praktiki: monogr.* Brest: BPI. (In Russ.).

Поступила 08.02.2023

DESIGN AND TECHNOLOGY OF DURABLE CONCRETE FOR SEA PORT AND TRANSPORT STRUCTURES IN CONDITIONS OF FROST EXPOSURE

V. MALYUK¹⁾, V. MALYUK²⁾, S. LEONOVICH³⁾, A. KOLODEY⁴⁾

^{1), 2)} LLC "Transstroy-Test", Yuzhno-Sakhalinsk,

^{3), 4)} Belarusian National Technical University, Minsk,

³⁾ Qingdao University of Technology, China

Currently, the design of structures with a service life of 50 years in conditions of frost exposure is carried out on the basis of regulatory documents that recommend requirements for concrete quality indicators, its composition and materials for its manufacture. To a certain extent, this is a prescriptive principle, since the recommended requirements adopted during the design process are mandatory at the construction stage. The level of requirements depends on the aggressiveness of the environment and the parameters of temperature influences. As a result of laboratory selection, the working composition of concrete is determined, on the basis of which the technology of concrete works is being worked out. To ensure the service life of concrete for 50 years in an aggressive environment of class XF 4 with frost exposure, it is recommended to apply the following restrictions to the composition and quality indicators of concrete: water-

cement ratio (V/C) – not higher than 0.45; cement consumption – not less than 340 kg/m³; air intake – at least 4%; concrete strength class – at least B35; brand for frost resistance – depending on the air temperature in winter in the construction area. A number of restrictions are set to the quality of materials for concrete (cement, crushed stone, sand, water) and indicators of technological properties of the concrete mixture.

It should be noted that calculation methods for selecting the composition of the required frost resistance have not been developed. Therefore, the composition of concrete for the required grade of frost resistance is determined by the selection method. In this regard, the selection of the composition of concrete for frost resistance is a long, complex and time-consuming process performed by high-level technologists. Computational methods of durability prediction are developed to optimize design solutions by taking into account the actual operating conditions of structures and the use of materials with quality indicators sufficient to ensure the required service life of structures in specific operating conditions. The development of methods for calculating the durability of concrete determines the need to investigate the effectiveness of technological techniques used in the manufacture of structures and the boundary limits of the requirements for concrete technology to ensure the durability of structures in conditions of frost exposure.

Keywords: *concrete, durability, sea port facilities, transport facilities, design, technology, frost impact.*