

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 666.972.53

КОВШАР  
Сергей Николаевич

**ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОРОЗО-  
И СОЛЕСТОЙКОСТИ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА С УЧЕТОМ  
ИЗМЕНЕНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И ДЕСТРУКТИВНЫХ ФАКТОРОВ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности  
05.23.05 – Строительные материалы и изделия

Минск, 2010

Работа выполнена на кафедре «Технология бетона и строительные материалы» Белорусского национального технического университета

**Научный руководитель**

**Бабицкий Вячеслав Вацлавович,**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология бетона и строительные материалы» БНТУ

**Официальные оппоненты:**

**Блещик Николай Павлович,**

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник РУП «Институт БелНИИС»;

**Васильев Александр Анатольевич,**

кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Промышленные и гражданские сооружения» БелГУТ

**Оппонирующая организация**

Государственное предприятие «БелдорНИИ»

Защита состоится «17» декабря 2010 г. в 13<sup>00</sup> часов на заседании Совета по защите диссертаций Д02.05.05 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220114, г. Минск, пр. Независимости, 150, корпус 15, аудитория 839. Тел. 265-95-87.

Отзывы в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, следует направлять по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, на имя ученого секретаря.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский национальный технический университет».

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь

Совета по защите диссертаций

кандидат технических наук, доцент

Мытько Л.Р.

© Ковшар С.Н., 2010

© БНТУ, 2010

## **ВВЕДЕНИЕ**

Бетон и железобетон был, есть и в перспективе будет одним из основных строительных материалов, поэтому минимизация материального и социального ущерба от преждевременного выхода из строя бетонных и железобетонных конструкций по причине их низкой морозо- и солестойкости является исключительно важной народнохозяйственной задачей.

Число работ в области изучения и повышения морозо- и солестойкости бетонов, выполненных как в Республике Беларусь, так и за рубежом, просто огромно. Однако следует констатировать, что данная проблема до настоящего времени остается весьма актуальной. Накопленный обширный материал по данной проблеме требует обобщения и предложения новых методов и способов придания бетону требуемой долговечности.

Требуемая стойкость бетонов может быть обеспечена комплексом мероприятий, важное место среди которых занимает разработка научно обоснованных методов оценки и прогнозирования, основанных на обобщении экспериментальных данных и изучении кинетики протекания коррозионных процессов. И это должно помочь технологам-бетонщикам в определении оптимальных рецептур и структуры материалов, выяснить условия их применения, при которых они гарантированно могут выполнять свои функции в течение проектных сроков эксплуатации конструкций и сооружений.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с программой Министерства образования Республики Беларусь: ГБ 00-114 «Разработка теории физико-химической коррозии бетона и строительных материалов, проблемы повышения долговечности конструкций зданий и сооружений на предприятиях по производству минеральных удобрений», № г.р. 20001479.

### **Цель и задачи исследования**

Цель работы: разработка системы аналитических зависимостей для оценки и прогнозирования морозостойкости и коррозионной стойкости при действии растворов хлористого натрия на стадии проектирования составов тяжелого бетона с учетом совместного влияния конструктивных и деструктивных процессов.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

– выполнен анализ существующих методов оценки и прогнозирования морозостойкости и коррозионной стойкости бетонов при действии растворов со-

лей хлоридов и на этой основе выявлены основные факторы, определяющие де-струкцию бетонов;

– экспериментально исследована кинетика изменения степени гидратации цемента, показателя среднего размера открытых капиллярных пор и прочности на сжатие цементного камня при циклическом воздействии замораживания и оттаивания/насыщения в растворе хлористого натрия и высушивания;

– основываясь на полученных результатах, выявлены основные факторы, оказывающие влияние на кинетику изменения исследуемых характеристик цементного камня при циклических воздействиях внешней среды;

– предложена и теоретически обоснована система аналитических зависимостей для оценки и прогнозирования морозо- и солестойкости бетона, которая позволяет совместно учитывать влияние конструктивных и деструктивных процессов;

– проведена оценка достоверности предложенной системы аналитических зависимостей;

– обоснована возможность использования разработанной системы аналитических зависимостей для оценки морозостойкости и солестойкости тяжелого бетона на стадии проектирования состава бетона и разработана методика проектирования состава бетона с учетом его морозо- и солестойкости;

– обоснована возможность использования для ускоренной оценки морозостойкости бетона методики, включающей циклическое насыщение и высушивание образцов в растворе хлористого натрия.

### **Положения диссертационной работы, выносимые на защиту**

1. Экспериментальная методика для комплексного исследования кинетики изменения степени гидратации, показателя среднего размера открытых капиллярных пор и прочности на сжатие цементного камня при циклическом замораживании и оттаивании, насыщении в растворе соли и высушивании.

2. Система аналитических зависимостей для оценки и прогнозирования морозо- и солестойкости цементного камня и тяжелого бетона, включающая зависимость, основанную на изменяющемся во времени соотношении конструктивных и деструктивных факторов и систему коэффициентов, учитывающих влияние загрязненности смеси заполнителей, объема вовлеченного в бетонную смесь воздуха и содержания трехкальциевого алюмината в цементе.

3. Расчетно-графическая методика проектирования составов тяжелого бетона, модифицированного химическими добавками, основанная на полученной системе аналитических зависимостей, которая позволяет проектировать рациональные составы бетонных смесей с заданной морозостойкостью и коррозионной стойкостью.

4. Ускоренный метод оценки морозостойкости бетона по количеству циклов насыщения образцов в растворе хлористого натрия и высушивания, позволяющий, в отличие от существующих методик, отказаться от дефицитного и дорогостоящего оборудования для низкотемпературного замораживания бетонных образцов.

#### **Личный вклад соискателя**

Диссертационная работа представляет собой самостоятельный труд соискателя. Автору принадлежат выбор направления и постановка задач исследований, выбор экспериментальных методик и проведение эксперимента, анализ, обобщение и интерпретация полученных результатов исследований. Совместно с В.В. Бабицким разработан расчетно-графический метод проектирования состава тяжелого бетона. С М.С. Бибицом проведены совместные исследования влияния тонкомолотых минеральных добавок на морозостойкость бетона.

#### **Апробация результатов диссертации**

Результаты диссертации представлены на следующих научных конференциях: 2-ой межвузовской научно-технической конференции «Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительства зданий и сооружений» (г. Брест, 21-22 апреля 1998 г.); XI международном научно-методическом межвузовском семинаре «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь» (г. Брест, 25-27 ноября 2004 г.); 62 научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов Белорусского национального технического университета (г. Минск, 12 мая 2009 г.); XVI международном научно-методическом семинаре «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь» (г. Брест, 28-30 мая 2009 г.); международной конференции молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (г. Могилев, 19-20 ноября 2009 г.); международной научно-технической конференции «Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов» (г. Минск, 25-27 ноября 2009 г.); международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (г. Могилев, 22-23 апреля 2010г.); 63 научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов Белорусского национального технического университета (г. Минск, 3 мая 2010 г.); 8 международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (г. Минск, 5 мая 2010 г.); XVII международном научно-методическом семинаре «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь» (г. Гродно, 27-28 мая 2010 г.).

## **Опубликованность результатов диссертации**

Основные положения диссертационной работы отражены в 8 публикациях, в том числе в 4 статьях в журналах по перечню ВАК, 4 материалах и тезисах докладов научно-технических конференций.

Общий объем публикаций составляет 3,2 авторского листа.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, шести глав, заключения, списка литературных источников и приложений. Ее полный объем составляет 207 страниц, включая: 97 листов машинописного текста, 104 рисунка, 44 таблицы, 4 приложения. Библиографический список включает 150 наименований, из которых 11 – авторские работы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Первая глава** посвящена аналитическому обзору литературы. Рассмотрены основные гипотезы разрушения бетона при попеременном замораживании и оттаивании и действии жидких агрессивных сред, содержащих хлориды. Для удобства при обзоре и анализе методов оценки и прогнозирования морозостойкости бетона предложено разделить их на четыре основные группы:

- методы, основанные на установлении связи между морозостойкостью, деформационными и структурными характеристиками материала;
- методы, основанные на описании математическими зависимостями процессов, происходящих в материале при попеременном замораживании и оттаивании;
- комплексные методы, основанные на использовании нескольких критериев либо характеристик материала для оценки его морозостойкости, например, структурных и деформационных;
- методы, основанные на ускорении процессов разрушения материала, за счет ужесточения воздействия.

Выполнен аналитический обзор методов прогнозирования и оценки коррозионной стойкости бетонов, эксплуатирующихся в жидких агрессивных средах, содержащих хлориды.

Установлены основные факторы, определяющие морозо- и коррозионную стойкость бетона. Сделан вывод о том, что между факторами, от которых зависит морозостойкость и коррозионная стойкость, имеется много общего, т.е. основные факторы, определяющие морозостойкость, одновременно являются факторами, определяющими и коррозионную стойкость бетона. Это позволило выдвинуть предположение о возможности разработки общей системы зависимостей как для оценки морозостойкости, так и коррозионной стойкости бетона.

На основе кинетического подхода предложено разрабатываемую систему аналитических зависимостей базировать на детальном изучении кинетики протекания процессов при замораживании и оттаивании, насыщении и высушивании в растворе хлористого натрия (рисунок 4). К процессам, которые требуют комплексного детального изучения, отнесены конструктивные (например, высокие значения плотности и прочности материала, возможность продолжающейся в процессе эксплуатации гидратации цемента) и деструктивные (низкие величины плотности и прочности материала, жесткие условия эксплуатации, недостаток клинкерного фонда для реализации гидратационных процессов), протекающие в цементном камне (бетоне) при циклическом замораживании и оттаивании, насыщении и высушивании.

Выбран предмет и сформулированы задачи исследований.

**Во второй главе** обоснован выбор цементного камня, как объекта исследований. Выполнен анализ и обоснован выбор методов определения степени гидратации цемента, структурных (средняя и истинная плотность, полный объем пор, водопоглощение, показатель среднего размера открытых капиллярных пор) и прочностных (предел прочности на сжатие) характеристик цементного камня. Разработана методика для изучения кинетики изменения структурно-механических характеристик образцов при циклических испытаниях, включая оценку достоверности получаемых результатов. Выбраны режимы и методы циклических воздействий:

*F-1*: замораживание образцов при температуре минус  $(20\pm 3)$  °С, оттаивание – при плюс  $(20\pm 5)$  °С;

*F-2*: замораживание образцов в 5 %-ном растворе NaCl при температуре минус  $(50\pm 5)$  °С, оттаивание – в том же растворе при плюс  $(18\pm 2)$  °С;

*КС-1*: насыщение образцов в насыщенном растворе NaCl при температуре  $(20\pm 5)$  °С, сушка – при  $(60\pm 5)$  °С,

*КС-2*: насыщение образцов в насыщенном растворе NaCl при температуре  $(20\pm 5)$  °С, сушка – при  $(80\pm 5)$  °С.

Обоснован выбор вяжущих (ПЦ-500-Д0 ОАО «Красносельскстройматериалы», ПЦ-500-Д20 ПРУП «Белорусский цементный завод», ШПЦ-400 ПРУП «Кричевцементошифер»), заполнителей (гранитный щебень РУПП «Гранит» и гравий ОАО «Нерудпром», природный песок карьера «Волма»), химических добавок (ускоритель твердения СН, пластифицирующая С-3 и воздухововлекающая СНВ), режимов и условий твердения образцов (нормально-влажностный, воздушно-сухой, тепловлажностная обработка).

Исследовано 45 серий образцов (по 132 шт. в каждой) цементного камня, в которых варьировалось водоцементное отношение в пределах от 0,2 до 0,4, что, согласно воззрениям проф. И.Н. Ахвердова, соответствовало области структурной связности цементного теста.

Для исследования морозо- и коррозионной стойкости бетона запроектированы 36 составов бетонных смесей, которые отличались водоцементным отношением, расходом и видом цемента, видом крупного заполнителя, наличием химических добавок, удобоукладываемостью смеси, а также условиями твердения.

Оценка достоверности получаемых результатов, адекватности системы аналитических зависимостей для оценки и прогнозирования морозостойкости/коррозионной стойкости цементного камня и бетона производилась по коэффициенту вариации, как это часто и принято в бетоноведении.

Для обеспечения требуемой точности измерений осуществлен выбор средств измерений и испытательного оборудования, необходимого для проведения исследований.

**Третья глава** посвящена экспериментальным исследованиям влияния циклических воздействий (замораживания и оттаивания, насыщения и высушивания) на кинетику изменения структурно-механических характеристик цементного камня.

Кинетику изменения структурно-механических характеристик исследуемого материала оценивали по изменению относительных показателей:

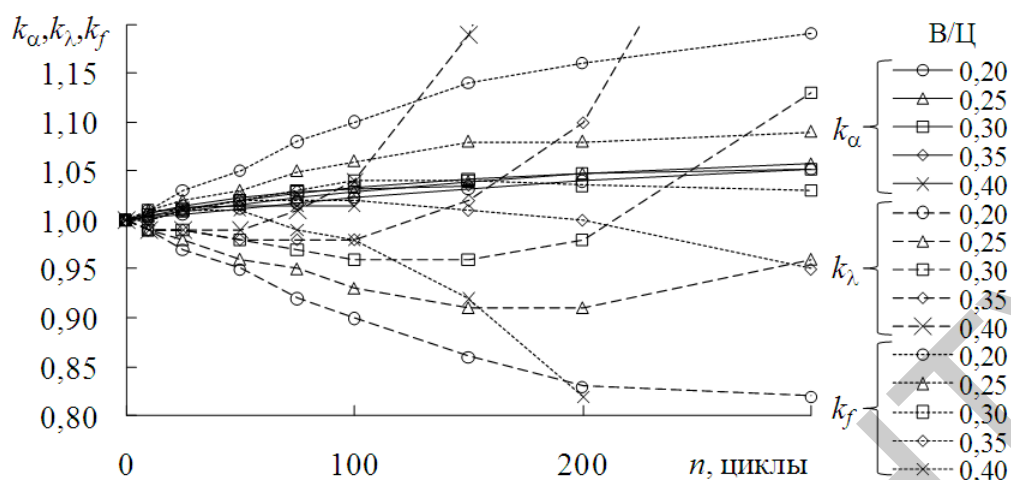
$$k_{\alpha} = \frac{\alpha_n}{\alpha_0}, k_{\lambda} = \frac{\lambda_n}{\lambda_0}, k_f = \frac{f_n}{f_0}, \quad (1)$$

где  $k_{\alpha}$ ,  $k_{\lambda}$ ,  $k_f$  – относительные показатели изменения степени гидратации цемента, среднего размера капиллярных пор и прочности на сжатие цементного камня соответственно;  $\alpha_n$ ,  $\lambda_n$ ,  $f_n$  – степень гидратации цемента, показатель среднего размера капиллярных пор и прочность на сжатие основных образцов цементного камня к определенному количеству циклов  $n$  замораживания и оттаивания, насыщения и высушивания соответственно;  $\alpha_0$ ,  $\lambda_0$ ,  $f_0$  – контрольных образцов цементного камня до начала циклических испытаний соответственно.

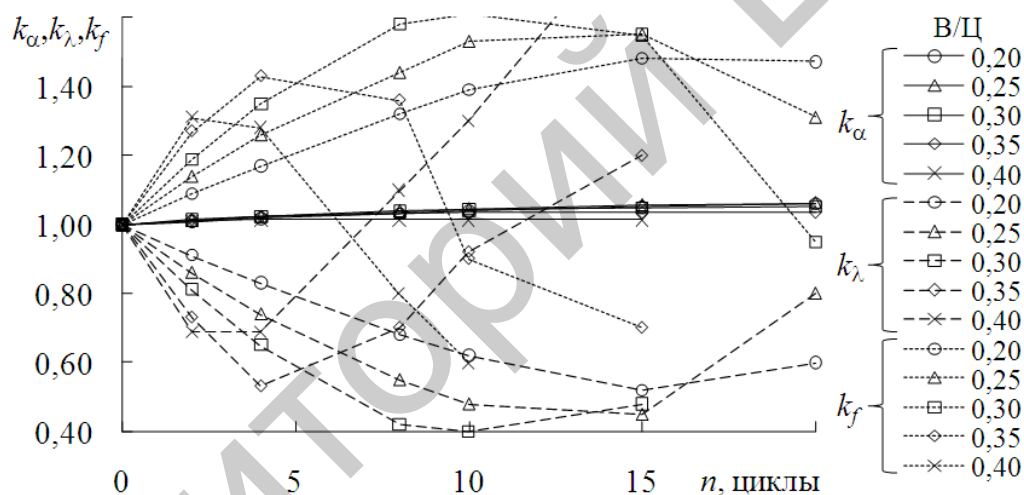
На рисунках 1 и 2, как пример (образцы нормально-влажностного твердения изготовлены на цементе ПЦ-500-Д0 ОАО «Красносельскстройматериалы»), приведены построенные по экспериментальным данным кривые изменения относительных показателей цементного камня при циклическом замораживании и оттаивании по режиму  $F-1$  (рисунок 1) и насыщении в растворе соли и высушивании по режиму  $КС-1$  (рисунок 2).

Анализ экспериментальных кривых показывает, что изменение относительного показателя степени гидратации вяжущего  $k_{\alpha}$  при циклическом замораживании и оттаивании происходит по определенному закону, а именно: с увеличением количества циклов ( $n$ ) показатель  $k_{\alpha}$  повышается, достигая на некотором этапе максимальной величины. Количественное значение предельного уровня  $k_{\alpha}$  зависит от начального значения водоцементного отношения цементного теста, условий твердения и испытания образцов, а также вида вяжущего.





**Рисунок 1 – Кинетика изменения характеристик цементного камня в процессе циклического замораживания и оттаивания**



**Рисунок 2 – Кинетика изменения характеристик цементного камня в процессе циклического насыщения и высушивания в растворе хлористого натрия**

Очень важный момент заключается в том, что степень гидратации цемента не является некоей «застывшей» величиной, определенной в проектном возрасте, а достаточно динамично изменяется, лежа в основе конструктивного процесса. Интенсивность развития степени гидратации во времени прямо определяется

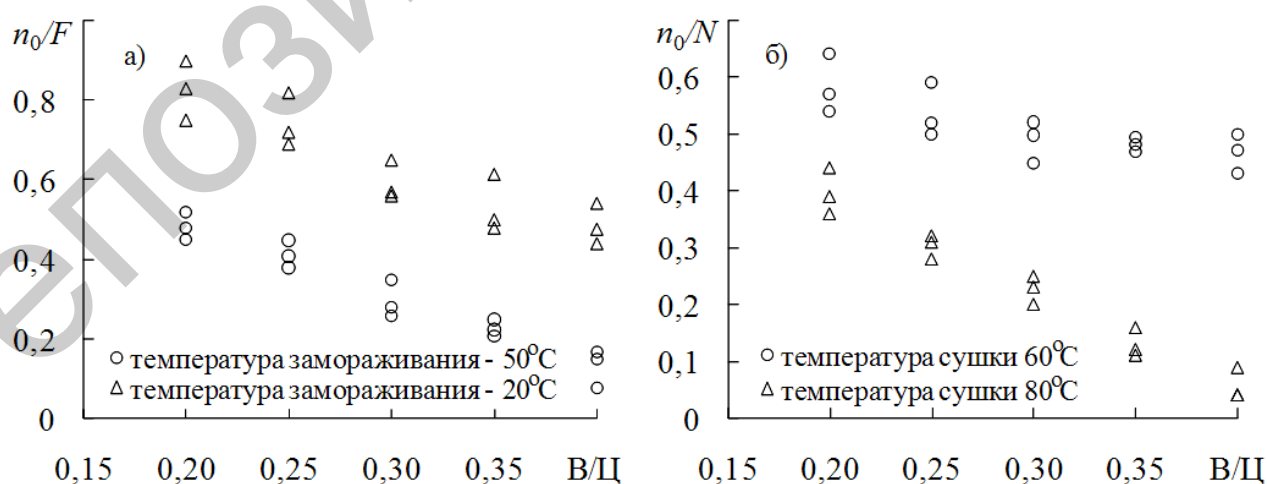
величиной водоцементного отношения, а, следовательно, и первоначальным запасом клинкерного фонда.

Кривые изменения показателя  $k_\lambda$  подтвердили результаты по изменению степени гидратации  $k_\alpha$  и свидетельствуют о протекании конструктивного процесса при циклическом замораживании и оттаивании, насыщении и высушивании образцов.

В свою очередь, кинетика изменения прочности образцов цементного камня  $k_f$  согласуется с данными по изменению степени гидратации  $k_a$  и среднего размера открытых капиллярных пор  $k_\lambda$ . При снижении значений  $k_\lambda$  величина  $k_f$  увеличивается. Таким образом, оказалось, что все характеристики цементного камня логически изменяются в процессе циклических испытаний, причем четко прослеживается их взаимосвязь.

Испытания же образцов при насыщении в растворе соли и высушивании показали, что изменение относительных показателей  $k_a$ ,  $k_\lambda$  и  $k_f$  внешне аналогично рассмотренным выше. Однако можно констатировать, что все характеристики имеют больший размах, что свидетельствует о более жестком режиме испытаний.

После обобщения полученных результатов по всем составам и режимам твердения и испытания образцов, были построены графики (рисунок 3) в достаточно удобной системе координат «В/Ц –  $n_0/F$  ( $n_0/N$ )», где  $n_0$  – количество циклов, когда наблюдался рост прочности цементного камня;  $F$  и  $N$  – морозо- и коррозионная стойкость цементного камня соответственно. Отчетливо прослеживается закономерность – при увеличении водоцементного отношения, независимо от всего комплекса влияющих факторов, значения  $n_0/F$  и  $n_0/N$  уменьшаются. При изменении режима испытаний образцов (снижение температуры замораживания или увеличение температуры сушки образцов) тенденция практически не изменяется, но величины отношений  $n_0/F$  и  $n_0/N$  становятся ниже. Это позволило сделать вывод, что ужесточение режима испытаний образцов приводит к снижению  $n_0$ , т.е. изменению соотношения между конструктивными и деструктивными процессами в сторону увеличения доли последних.



**Рисунок 3 – Влияние водоцементного отношения цементного теста (В/Ц) и режима испытаний образцов на изменение значений  $n_0/F$  и  $n_0/N$**

В целом, анализ полученных экспериментальных данных позволил сделать следующий вывод. Циклическое замораживание и оттаивание, а также насыще-

ние в растворе соли и высушивание цементного камня приводит к развитию не только деструктивных, но и конструктивных процессов. Оба процесса протекают параллельно и соотношение между ними в конкретный момент времени (количество циклов) определяет состояние структуры и прочность цементного камня. Обнаружена аналогия между кинетикой изменения структурно-механических характеристик цементного камня при испытании образцов на морозостойкость и коррозионную стойкость.

**Четвертая глава** посвящена предложению и теоретическому обоснованию системы аналитических зависимостей для оценки и прогнозирования морозостойкости и солестойкости цементного камня и тяжелого бетона.

Воспользовавшись представлениями проф. Н.А. Мощанского, можно графически представить процесс коррозионной деструкции материала в процессе эксплуатации как результирующую параллельно протекающих конструктивно-го и деструктивного процессов (рисунок 4).



**Рисунок 4 – Изменение характеристик материала в процессе эксплуатации**

Для описания изменения прочности цементного камня при циклических воздействиях было принято уравнение, которое используют для описания движения тела, брошенного под углом к горизонту (можно отметить внешнюю аналогию кривых движения тела и результирующего процесса, представленного на рисунке 4). Выражение параметров этого уравнения через соответствующие структурно-механические характеристики цементного камня, выбранные на основании анализа собственных экспериментов автора, теоретических воззрений и результатов исследований других авторов, позволило получить следующую зависимость для расчета критического числа циклов ( $n_{кр}$ ), условно определяющих долговечность материала:

$$n_{кр} = \frac{2 \cdot \left(1 + \frac{\delta}{100}\right) \cdot f_0 \cdot \frac{\alpha_{max}}{\alpha_0} \cdot \left(1 - \frac{W_0}{100}\right)}{k_D}, \text{ циклы,} \quad (2)$$

где  $\delta$  – допустимая потеря прочности цементного камня, %;  $f_0$  – начальная прочность цементного камня, МПа;  $\alpha_{max}$  – максимально возможная степень гидратации цемента, %;  $\alpha_0$  – фактическая степень гидратации цемента, %;  $W_0$  – водопоглощение цементного камня, % по объему;  $k_D$  – коэффициент, характеризующий скорость протекания деструктивных процессов, МПа/цикл, и зависящий от режима испытаний и структурных характеристик материала.

Величину  $\alpha_{max}$  можно в соответствии с воззрениями Т. Пауэрса при  $X \leq 1,65$  рассчитать по формуле:

$$\alpha_{max} = 60,6 \cdot X, \%, \quad (3)$$

а при  $X > 1,65$  принять равной 100 %.

В (3)  $X$  – относительное водосодержание цементного теста (по И.Н. Ахвердову), равное отношению водоцементного отношения цементного теста к В/Ц, соответствующему нормальной густоте цемента.

Фактическую же степень гидратации цемента можно либо определить экспериментально, либо рассчитать, используя прогнозные модели проф. Н.П. Блещика или В.В. Бабицкого, позволяющие учесть достаточно широкую гамму влияющих факторов.

Водопоглощение по объему цементного камня, основываясь на представлениях проф. Горчакова Г.И., предложено определять по зависимости:

$$W_0 = \left[ (В/Ц)_T - 0,23 \cdot \frac{\alpha_0}{100} \right] \cdot \frac{Ц}{\rho_B} \cdot 100, \%, \quad (4)$$

где  $(В/Ц)_T$  – водоцементное отношение цементного теста;  $Ц$  – расход цемента, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_B$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент, характеризующий скорость протекания деструктивного процесса, является функцией относительного водосодержания и определяется, например, для стандартного режима F-1 по следующим формулам:

$$\text{при } X \leq 1,4 \quad k_D^{F-1} = 0,07 + 0,22 \cdot (X - 0,5), \text{ МПа/цикл,} \quad (5)$$

$$\text{при } X > 1,4 \quad k_D^{F-1} = 0,27 + 4 \cdot (X - 1,4)^{2-(X-1,4)}, \text{ МПа/цикл;} \quad (6)$$

Аналогичные зависимости получены и для других режимов испытаний.

Переход от морозостойкости и солестойкости цементного камня к морозостойкости и солестойкости тяжелого бетона выполнен посредством системы безразмерных коэффициентов, учитывающих загрязненность смеси заполнителей, минералогический состав цемента, содержание воздуха в бетонной смеси:

$$F_{\delta}(N_{\delta}) = n_{\text{кр}} \cdot k_{\text{пг}} \cdot k_{\text{в}} \cdot k_{\text{C}_3\text{A}}, \text{ циклы.} \quad (7)$$

В свою очередь, для расчета безразмерных коэффициентов, входящих в (7), предложены следующие зависимости:

$$k_{\text{пг}} = 1 - 0,02 \cdot \sqrt{G_{\text{пг}}^3}, \quad (8)$$

$$k_{\text{в}} = 1 + 0,2 \cdot V_{\text{вх}}^2, \quad (9)$$

$$k_{\text{C}_3\text{A}} = 1 - 0,0015 \cdot (C_3A - 2)^2, \quad (10)$$

где  $G_{\text{пг}}$  – загрязненность смеси заполнителей (содержание пылевидных и глинистых частиц), % по массе;  $V_{\text{вх}}$  – объем дополнительно вовлеченного воздуха в бетонную смесь, за счет использования воздухоовлекающих и газообразующих добавок, %;  $C_3A$  – содержание трехкальциевого алюмината в цементе, % по массе.

Водопоглощение бетона по объему определяют с учетом содержания цементного теста в бетонной смеси по следующей зависимости:

$$W_o = V_{\text{т}} \cdot \left[ \left( \frac{B}{\text{Ц}} \right)_{\text{т}} - 0,23 \cdot \frac{\alpha}{100} \right] \cdot \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{в}}} \cdot 100, \%, \quad (11)$$

где  $V_{\text{т}}$  – объем цементного теста в бетонной смеси,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

В свою очередь, основываясь на анализе экспериментальных данных, величина водоцементного отношения цементного теста  $(B/\text{Ц})_{\text{т}}$  может быть рассчитана следующим образом:

$$\left( \frac{B}{\text{Ц}} \right)_{\text{т}} = (0,58 + 0,07 \cdot \text{Мк}) \cdot \left( \frac{B}{\text{Ц}} \right)_{\delta}, \quad (12)$$

где  $\text{Мк}$  – модуль крупности песка;  $(B/\text{Ц})_{\delta}$  – водоцементное отношение бетонной смеси.

Эти и иные, известные в бетоноведении зависимости, положены в основу методики проектирования состава тяжелого бетона с учетом его морозо- и солестойкости.

**Пятая глава** посвящена оценке достоверности системы аналитических зависимостей для расчета и прогнозирования морозостойкости и коррозионной стойкости цементного камня и тяжелого бетона. Оценку достоверности проводили посредством сравнения значений фактической и расчетной морозо- и солестойкости цементного камня и тяжелого бетона.

Проведенная статистическая обработка показала, что значения коэффициентов вариации при оценке морозостойкости и коррозионной стойкости цементного камня не превышали 12 %, а морозостойкости и коррозионной стойкости тяжелого бетона 15 %, что соответствует критериям, принятым в бетоно-

ведении при оценке, например, точности разнообразных градуировочных зависимостей.

Была проведена сравнительная оценка точности расчетов по предложенной автором системе аналитических зависимостей и имеющимися в литературе, включая и методику, представленную в действующем ГОСТ 10060.4-95 «Структурно-механический метод определения морозостойкости» (рисунок 5).

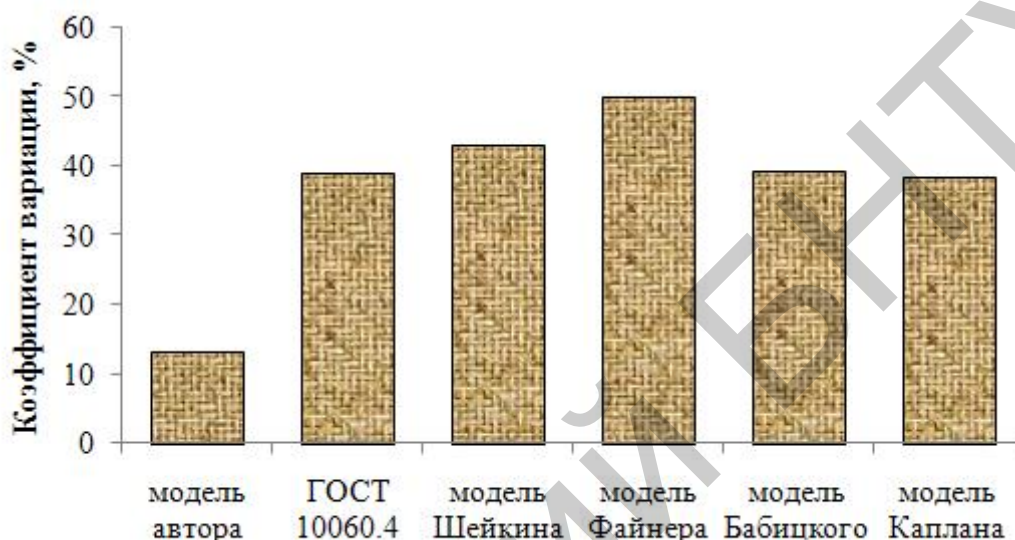


Рисунок 5 – Точность оценки морозостойкости бетона по различным моделям

Сравнение величин коэффициентов вариации показало, что предлагаемая система аналитических зависимостей обеспечивает достаточно хорошую сходимость расчетных и фактических значений морозостойкости.

**Шестая глава** диссертационной работы посвящена практическому использованию полученных результатов.

В существующих нормативных документах регламентируется назначение минимального класса бетона по прочности на сжатие в зависимости от предполагаемых условий эксплуатации конструкций (применительно к замораживанию-оттаиванию классы сред по условиям эксплуатации XF1, XF2, XF3 и XF4). Сопоставим рассчитываемые по предлагаемой модели классы бетона по прочности на сжатие с регламентируемыми. Преобразуем (2) таким образом, чтобы можно было рассчитывать среднюю прочность бетона ( $f_0$ ), по значению его морозостойкости ( $F_6$ ):

$$f_0 \geq \frac{1}{2} \cdot F_6 \cdot \frac{k_D}{A}, \text{ МПа}, \quad (13)$$

где  $A$  – структурный параметр, равный:

$$A = \frac{\alpha_{\max}}{\alpha_0} \cdot \left(1 - \frac{W_0}{100}\right) \cdot k_{\text{пг}} \cdot k_{\text{в}} \cdot k_{\text{С}_3\text{А}} \cdot \quad (14)$$

Воспользовавшись данными проф. А.М. Подвального по взаимосвязи классов по условиям эксплуатации с марками бетона по морозостойкости, по (13) были проведены расчеты средней прочности бетона и, при нормативном коэффициенте вариации, равном 13,5 %, – класса по прочности на сжатие (таблица 1).

Таблица 1 – Расчетные и регламентируемые классы бетона по прочности на сжатие

Наименование показателя	Соответствие классов бетона по прочности на сжатие и классов среды по условиям эксплуатации конструкций							
	XF1		XF2		XF3		XF4	
	F25	F50	F100	F150	F200	F300	F400	F600
Расчетная средняя прочность бетона, МПа	7,1	14,3	15,3	23,0	23,5	35,3	43,6	65,4
Класс бетона при коэффициенте вариации 13,5 %	B7,5	C <sup>8</sup> / <sub>10</sub>	C <sup>8</sup> / <sub>10</sub>	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	C <sup>20</sup> / <sub>25</sub>	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	C <sup>40</sup> / <sub>50</sub>
Нормированное значение класса бетона по СТБ 1544-2005	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>		C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>		C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>		C <sup>30</sup> / <sub>37</sub>	

Проанализировав приведенные в таблице 1 данные, легко убедиться в том, что если для жестких условий эксплуатации (класс XF4) рассчитываемые величины сопоставимы с регламентируемыми, то для классов XF1, XF2 по СТБ 1544-2005 требуемая прочность бетона существенно выше расчетной. И здесь видится (естественно, в случае корректировки классов) существенная экономия цемента.

Система аналитических зависимостей положена в основу методики проектирования составов бетона, в том числе и с химическими добавками, для назначения технологических факторов, обеспечивающих получение бетона заданной долговечности. Расчетно-графический вариант метода прошел апробацию и внедрение на следующих предприятиях: ОАО «Завод СЖБ №1», ПУ «Нефтьспецстрой», ОАО «Светлогорский завод ЖБИиК» и, как установлено, его практическая реализация может дать экономию цемента до 8 %.

С целью расширения возможной области применения разработанной системы она была опробована для оценки агрессивности эксплуатационной среды и проектировании составов коррозионностойких бетонов, предназначенных для ремонта и восстановления эксплуатационной пригодности железобетонных конструкций ступителей на Солигорском калийном комбинате.

Оценку агрессивности эксплуатационной среды проводили путем расчета параметра  $k_D$ . Трансформировав (2) соответствующим образом, получили зависимость для расчета параметра  $k_D$ :

$$k_D \leq \frac{2 \cdot f_0 \left(1 + \frac{\delta}{100}\right) \cdot \frac{\alpha_{\max}}{\alpha_0} \cdot \left(1 - \frac{W_0}{100}\right)}{n}, \text{ МПа/год}, \quad (15)$$

где  $f_0$  – проектная прочность бетона, которая на основании изучения проектной документации принята равной 35,0 МПа;  $\delta$  – фактическая потеря прочности бетона за время эксплуатации, % (рассчитывали, зная проектную прочность и определяя фактическую прочность бетона на момент обследования);  $\alpha_{\max}$  – максимально возможная степень гидратации цемента (с допустимым приближением приняли равной 100 %);  $\alpha_0$  – начальная степень гидратации цемента (с допустимым приближением приняли равной 70 %);  $W_0$  – водопоглощение бетона по объему, % (определили по значению водопоглощения по массе, которое в свою очередь установили по проектной марке бетона по водонепроницаемости);  $n$  – время эксплуатации конструкции на момент обследования, годы.

Определив значение параметра  $k_D$ , по (13) рассчитывали требуемую прочность бетона. Далее, используя разработанный расчетно-графический метод, проектировали состав бетона, обеспечивающий требуемую удобоукладываемость и прочность бетона. Запроектированный состав бетона использовали для изготовления монолитной конструкции «переливного канала» сгустителя (рисунок 6). Оценка состояния бетона через 9 лет с момента ввода сгустителя в эксплуатацию показала, что бетон находится в вполне удовлетворительном состоянии, признаки коррозионного повреждения отсутствуют, что косвенно свидетельствует о достаточной достоверности заложенных в методику расчетных формул.



**Рисунок 6 – Состояние железобетонных конструкций сгустителей на Солигорском калийном комбинате**

Поскольку, как показал анализ экспериментальных данных, разработанная система зависимостей применима как для оценки морозо-, так и солестойкости тяжелого бетона, то это позволило сделать предположение о возможности расчета морозостойкости бетона (по ускоренному методу) по числу циклов



насыщения образцов в растворе соли и высушивания. В соответствии с данным предположением проведены эксперименты с образцами тяжелого бетона различного состава (расход цемента варьировался от 250 до 450 кг/м<sup>3</sup>). Устанавливали взаимосвязь морозостойкости бетона, испытанного по режиму *F-2*, и солестойкости при испытаниях по режиму *КС-1*. Как оказалось, если при низких расходах цемента (250 кг/м<sup>3</sup>) точность недостаточна (коэффициент вариации равен 30-37 %), то для повышенных (350 кг/м<sup>3</sup> и более) – вполне приемлема: коэффициент вариации равен 15 % при расходе цемента 350 кг/м<sup>3</sup> и 10 % – при расходе 450 кг/м<sup>3</sup>.

Привлекательность такой методики налицо: не требуется дорогостоящее и дефицитное оборудование для низкотемпературного замораживания образцов, существенно сокращаются сроки получения результатов. В последующем, естественно, после проведения дополнительных исследований в данном направлении, методика экспресс-контроля морозостойкости бетона с использованием циклов насыщения и высушивания образцов может быть включена в действующие ТНПА на методы определения морозостойкости, хотя бы в части корректировки составов бетона. Однако уже и на этом этапе данную методику можно использовать для контроля морозостойкости бетона в рамках действующего СТБ 1482-2004 «Бетоны. Методы коррозионных испытаний». Данный СТБ предусматривает разработку программы испытаний, в которой в обязательном порядке указывают метод и методику проведения испытаний, правила обработки и достоверность получаемых результатов.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты:**

1. Предложена теоретически обоснованная и экспериментально подтвержденная система аналитических зависимостей для оценки и прогнозирования морозо- и солестойкости цементного камня и тяжелого бетона, основывающаяся на изменяющемся во времени соотношении конструктивных (развитие гидратационных процессов цемента, уплотнение и упрочнение структуры материала) и деструктивных (недостаток непрогидратированного цемента, ужесточение эксплуатационного режима) факторов. Точность расчетов по ней, оцениваемая по разнице фактических и прогнозируемых значений морозостойкости, характеризуется коэффициентом вариации около 13 %, что существенно лучше, чем при расчетах по используемым в бетоноведении для корректировки составов бетона моделям А.Е. Шейкина, М.Ш. Файнера, А.С. Каплана, В.В. Бабицкого, а также методике, представленной в ГОСТ 10060.4-95 «Структурно-механический метод определения морозостойкости» (коэффициент вариации равен 35...50 %). [1,7,8].

2. На основе анализа экспериментальных исследований влияния циклического воздействия внешней среды на кинетику изменения структурно-механических характеристик цементного камня установлено [3,5]:

– к основным факторам, оказывающим влияние на кинетику протекания конструктивных и деструктивных процессов, относятся: прочность на сжатие, степень гидратации цемента и объем открытых капиллярных пор;

– ужесточение режима испытаний (снижение температуры замораживания или повышение температуры сушки) приводит к изменению соотношения между конструктивными и деструктивными процессами в сторону увеличения доли последних.

3. Разработана расчетно-графическая методика проектирования составов тяжелого бетона, включая бетоны, модифицированные химическими добавками, основанная на полученной системе аналитических зависимостей, позволяющая учесть проектные требования к бетону по прочности и морозостойкости, а также коррозионной стойкости [2,4].

4. Обоснована возможность снижения предельных значений класса бетона по прочности на сжатие для классов среды по условиям эксплуатации конструкций XF1 и XF2.

5. Обоснован и экспериментально подтвержден метод оценки морозостойкости бетона по количеству циклов насыщения образцов в растворе хлористого натрия и высушивания, позволяющий упростить методику, отказавшись от использования дефицитного и дорогостоящего оборудования для низкотемпературного замораживания бетонных образцов [6].

#### **Рекомендации по практическому использованию:**

1. Расчетно-графическая методика оперативного проектирования составов тяжелого бетона позволяет учесть широкую гамму влияющих факторов (проектные требования к бетону и бетонной смеси, свойства вяжущего, заполнителей, химических добавок) и может быть использована в лабораториях предприятий по производству бетонных и железобетонных конструкций, а также в учебном процессе. Производственная апробация разработанных рекомендаций по проектированию составов тяжелого бетона расчетно-графическим методом показала возможность экономии цемента в среднем до 8 % при производстве изделий и конструкций, к которым предъявляются требования по морозостойкости [2,4].

2. Оценка агрессивности эксплуатационной среды, с помощью предложенной системы расчетных аналитических зависимостей позволяет разрабатывать ремонтные составы коррозионностойких бетонов бетонных и железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в условиях циклического воздействия растворов хлористого натрия.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в научных журналах и сборниках трудов конференций

1. Ковшар, С.Н. Система прогнозирования морозостойкости цементного камня и тяжелого бетона / С.Н. Ковшар, М.С. Бибик, В.В. Бабицкий // Строительная наука и техника. – 2009. – № 6(27). – С. 29–33.

2. Ковшар, С.Н. Прогнозирование морозостойкости на стадии проектирования составов бетона / С.Н. Ковшар, О.В. Глинская // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2010. – № 1. – С. 4–8.

3. Ковшар, С.Н. Изменение структурно-механических характеристик цементного камня при циклическом воздействии внешней среды / С.Н. Ковшар // Строительная наука и техника. – 2010. – № 1–2(28–29). – С. 60–63.

4. Ковшар, С.Н. Проектирование состава бетона с учетом его морозостойкости / С.Н. Ковшар, В.В. Бабицкий // Вестник БНТУ. – 2010. – № 3. – С.15–20.

### Материалы конференций

5. Ковшар, С.Н. Влияние циклического замораживания и оттаивания на изменение степени гидратации цемента и структурно-механические характеристики цементного камня / С.Н. Ковшар, В.В. Бабицкий // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : материалы XVI Международного научно-методического семинара, Брест, 28-30 мая 2009 г. / Брестский государственный технический университет; редкол. : А.А. Борисевич [и др.]. – Брест, 2009. – Ч. 2. – С. 147–151.

6. Ковшар, С.Н. К возможности оценки морозостойкости бетона по его солестойкости / С.Н. Ковшар, В.В. Бабицкий // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров : материалы XVII Международного научно-методического семинара, Гродно, 27-28 мая 2009 г. / Гродненский государственный университет им. Я. Купалы ; редкол.: Т.М. Пецольд [и др.]. – Гродно, 2010. – С. 319–322.

7. Ковшар, С.Н. Система прогнозирования морозостойкости и коррозионной стойкости бетона / С.Н.Ковшар, В.В. Бабицкий //Наука – образованию, производству, экономике : материалы Восьмой международной научно-технической конференции, г. Минск, 5 мая 2010 г. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: Б.М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2010. – Т. 2 – С. 225.

### Тезисы докладов

8. Ковшар, С.Н. Система прогнозирования морозостойкости бетонов / С.Н.Ковшар // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: тезисы докладов международной конференции молодых ученых, Могилев, 19-20 ноября 2009 г. / Белорусско-Российский университет; ред.кол. : И.С.Сазонов [и др.]. – Могилев, 2009. – С. 94.

## РЭЗІЮМЭ

Коўшар Сяргей Мікалаевіч

### **Ацэнка і прагназаванне мароза- і солеустойлівасці цяжкага бетону з улікам змены канструктыўных і дэструктыўных фактараў**

**Ключавыя словы:** ацэнка, прагназаванне, марозаустойлівасць, каразійная ўстойлівасць, канструктыўныя працэсы, дэструктыўныя працэсы, сыстэма аналітычных залежнасцей, цяжкі бетон, склад бетону.

**Мэта работы:** распрацоўка сыстэма аналітычных залежнасцей для ацэнкі і прагназавання мароза- і солеўстойлівасці бетону на стадыі праектавання складаў бетону з улікам сумеснага ўплыву канструктыўных і дэструктыўных фактараў.

**Метады даследавання:** вызначэнне колькасці хімічна звязанай вады; вызначэнне параматраў кінетыкі воданасычэння узораў (хуткасць, максымальное колькасць і аб'ём паглынутай вадкасці); вызначэнне максімальнай нагрузкі пры васевым сціску ўзораў.

Прапанавана і тэарэтычна абгрунтавана сыстэма аналітычных залежнасцей для апісання змены трываласці цэментнага каменя пры цыклічных уздзеяннях, якая дазваляе сумесна ўлічваць уплыў канструктыўных і дэструктыўных фактараў.

Праведзена ацэнка дакладнасці і адэкватнасці сыстэма аналітычных залежнасцей для прагназавання марозаустойлівасці і солеустойлівасці цяжкага бетону, уключаючы бетоны, мадыфікаваныя хімічнымі дабаўкамі. Абгрунтавана магчымасць выкарыстання сыстэма аналітычных залежнасцей на стадыі праектавання складаў бетону з патрабаваннямі па марозаўстойлівасці. Паказана магчымасць выкарыстання сыстэмы аналітычных залежнасцей для прызначэння класаў бетону. Прапанавана і абгрунтавана магчымасць выкарыстання для паскоранай ацэнкі марозаустойлівасці метаду насычэння і высушвання узораў у раствору солі.

**Вобласць прымянення:** распрацаваная сыстэма скарыстана на стадыі праектавання складаў бетону, да якіх прад'яўляюцца патрабаванні па мароза- і солеустойлівасці.

## РЕЗЮМЕ

Ковшар Сергей Николаевич

### **Оценка и прогнозирование морозо- и солестойкости тяжелого бетона с учетом изменения конструктивных и деструктивных факторов**

**Ключевые слова:** оценка, прогнозирование, морозостойкость, коррозионная стойкость (солестойкость), конструктивные процессы, деструктивные процессы, система аналитических зависимостей, тяжелый бетон, состав бетона.

**Цель работы:** разработка системы аналитических зависимостей для оценки и прогнозирования морозостойкости и коррозионной стойкости при действии растворов хлористого натрия на стадии проектирования составов тяжелого бетона с учетом совместного влияния конструктивных и деструктивных процессов.

**Методы исследования:** определение количества химически связанной воды; определение параметров кинетики водонасыщения образцов (скорость, максимальное количество и объем поглощенной жидкости); определение максимальной нагрузки при осевом сжатии образцов.

Предложена и теоретически обоснована система аналитических зависимостей для описания изменения прочности цементного камня при циклических воздействиях, которая позволяет совместно учитывать влияние конструктивных и деструктивных факторов.

Проведена оценка достоверности и адекватности системы аналитических зависимостей для прогнозирования морозостойкости и солестойкости тяжелого бетона, включая бетоны, модифицированные химическими добавками. Обоснована возможность использования разработанной системы на стадии проектирования составов бетона с требованиями по морозостойкости. Показана возможность использования системы аналитических зависимостей для назначения предельных значений классов бетона по прочности на сжатие. Предложена и обоснована возможность использования для ускоренной оценки морозостойкости метода насыщения образцов в растворе соли и высушивания.

**Область применения:** разработанная система применима на стадии проектирования составов бетона, к которым предъявляются требования по морозостойкости и коррозионной стойкости.

## SUMMARY

Kovshar Sergey

### **Assessment and forecasting of frost and salt resistance of concrete with allowance for variation of constructive and destructive factors.**

**Keywords:** assessment, forecasting, frost resistance, corrosion resistance (salt resistance), constructive processes, destructive processes, computational model, concrete, concrete mix.

**Object of research:** computational model development for assessment and forecasting frost and salt resistance of concrete with allowance for combined effects of constructive and destructive factors.

**Methods of research:** definition of quantity of chemical connected water; definition of water saturation parameters (speed, maximum quantity and volume of the absorbed liquid); definition of the maximum load at axial compression of samples.

It's established, that cyclic freezing and thawing, and also saturation and drying of cement samples lead to development not only destructive but also constructive processes in structure of stone. Initial value of degree of hydration and volume of an open capillary pore of a cement stone concerns the major factors defining kinetics of constructive and destructive processes before the beginning of cyclic influences.

The model for the description of change of durability of a cement stone is offered and theoretically proved at cyclic influences which allows to consider in common influence of constructive and destructive factors.

The estimation of reliability and adequacy of model for an estimation and forecasting of concrete frost and salt resistance, including the concrete modified by chemical additives is spent. Possibility of use of model on a design stage of structures of concrete with requirements towards frost resistance is proved. Possibility of use of model for designing of structures corrosion resistance concrete, in particular for appointment of the minimum classes of the concrete providing reception of concrete of set durability is shown. Possibility of use for the accelerated estimation of frost resistance of a method of saturation and drying of samples in a salt solution is offered and proved.

**Application and degree of the use:** the developed model applicable to designing concrete mix with requirements towards frost and (or) corrosion resistance of concrete.

Научное издание

КОВШАР Сергей Николаевич

**ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОРОЗО-  
И СОЛЕСТОЙКОСТИ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА  
С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ  
И ДЕСТРУКТИВНЫХ ФАКТОРОВ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по специальности  
05.23.05 – Строительные материалы и изделия