

С. Н. Ковшар
М. Гольшани
В. В. Бабицкий

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОРОЗОСТОЙКОСТИ
БЕТОНА И КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СТАЛЬНОЙ
АРМАТУРЫ В БЕТОНЕ ПРИ ДЕЙСТВИИ АГРЕССИВНЫХ СРЕД

Минск
БНТУ
2021

УДК 691.32

Ковшар, С. Н. Оценка и прогнозирование морозостойкости бетона и коррозионной стойкости стальной арматуры в бетоне при действии агрессивных сред/ С. Н. Ковшар, М. Гольшани, В. В. Бабицкий. – Минск: БНТУ, 2021. – 208 с. – ISBN 978-985-583-705-4.

В монографии подробно рассматриваются существующие методы оценки и прогнозирования морозостойкости и коррозионной стойкости бетонов, а также методы оценки защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре. В работе приведены результаты экспериментальных исследований авторов по изучению кинетики изменения структурно-механических характеристик бетона при циклических воздействиях. Подробно рассмотрено влияния хлор-ионов на коррозионное состояние стальной арматуры.

Книга предназначена для инженерно-технических работников строительных лабораторий, специалистов, занимающихся исследованиями и испытаниями строительных материалов и может быть полезна для студентов, магистрантов и аспирантов строительных специальностей.

Табл. 41. Ил. 87. Библиогр. 170 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
Белорусского национального технического университета
(протокол №6 от 22.06.2021 г.)

Рецензенты:

главный научный сотрудник ГП «БелдорНИИ»,
доктор технических наук, профессор *А. В. Бусел*;
профессор кафедры химической технологии вяжущих
материалов УО «БГТУ», доктор технических наук,
профессор *М. И. Кузьменков*

ISBN 978-985-583-705-4

© Ковшар С. Н., Гольшани М.,
Бабицкий В. В., 2021

© Белорусский национальный
технический университет, 2021

ПРЕДИСЛОВИЕ

Бетон и железобетон являются одними из основных строительных материалов. В связи с этим, минимизация материального и социального ущерба от преждевременного выхода из строя бетонных и железобетонных конструкций является исключительно важной задачей.

Долговечность бетонных и железобетонных конструкций в комплексе определяется, как условиями эксплуатации, так и структурными особенностями и составом бетона. Получение бетона, способного без образования дефектов эксплуатироваться в течение всего проектного срока эксплуатации – одна из самых важных проблем строительства. К наиболее распространенным агрессивным воздействиям эксплуатационных сред на бетон можно отнести попеременное замораживание и оттаивание, а также циклическое воздействие жидких агрессивных сред, содержащих растворенные соли, в первую очередь хлориды, широко применяемые в качестве противогололедных реагентов, а также хлоридно-сульфатные агрессивные среды, как наиболее распространенные на территории Республики Беларусь. Кроме коррозионного (или морозного) разрушения бетона неизбежно проникновение хлор-ионов в защитный слой бетона и при накоплении агрессивных ионов сверх критического значения верояна коррозия стальной арматуры с последующим разрушением железобетонных конструкций.

Количество научных исследований, посвященных вопросам изучения морозо- и коррозионной стойкости бетона просто огромно. Однако до настоящего времени эта, проблема остается актуальной. До сих пор проводятся углубленные исследования, казалось бы, хорошо изученных вопросов придания бетону требуемой коррозионной стойкости и морозостойкости. Открываются новые аспекты данной проблемы, связанные с использованием новых вяжущих и модификаторов. Накопленный обширный материал по данной проблеме требует обобщения и предложения новых методов и способов придания бетону требуемой долговечности.

Критическое значение хлор-ионов, несмотря на достаточно многочисленные исследования, имеет не «скользящую», зависящую от многочисленных факторов, величину, а обычно принимается постоянным. Интерес представляют и исследования коррозионного со-

стояния стальной арматуры в присутствии химических добавок, повышающих защитные свойства бетона по отношению к стали, так называемых ингибиторов коррозии арматуры.

Качество и долговечность конструкций зданий и сооружений могут быть обеспечены, применением материалов (бетонов), стойких в данных эксплуатационных условиях. Требуемая же стойкость бетона и железобетона 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.

Разработка методов оценки и прогнозирования долговечности, основанных на изучении кинетики протекания коррозионных процессов должна 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. Исключительно важно связать долговечность железобетонных со структурными особенностями бетона.

1. МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МОРОЗОСТОЙКОСТИ И КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ БЕТОНА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

1.1. Методы оценки и прогнозирования морозостойкости бетона

Прежде, чем рассмотреть существующие методы оценки и прогнозирования морозостойкости бетона, кратко рассмотрим основные гипотезы для объяснения причин разрушения бетона в условиях многократного попеременного замораживания и оттаивания. Существует несколько основных гипотез.

Гипотеза об общем кристаллизационном давлении льда. Предложена Р. Коллинзом [1]. В основе предложенной Р. Коллинзом гипотезы реализовано известное физическое свойство воды увеличивать свой объем при фазовом переходе в лед (до 9 %) и оказывать существенное кристаллизационное давление на стенки пор и капилляров материала.

Гипотеза о гидравлическом давлении. Предложена Т. Пауэрсом [2]. Она, объясняет причину разрушения материала при замораживании возникновением в порах и капиллярах гидравлического давления воды, отжимаемой из зоны замерзания в результате фазового перехода части воды в лед и соответствующего увеличения ее объема.

Гипотеза о термической несовместимости компонентов бетона. Гипотеза, предложенная М. Валента [3], объясняет причину разрушения бетона при замораживании и оттаивании различием температурных деформаций составляющих бетона, включая и лед.

Гипотеза о роли осмотических сил. Предложена О. Е. Власовым [4] и развита в работах В. И. Бабушкина [5]. В основе данной гипотезы лежит предположение об изменении осмотического давления в порах бетона при его промораживании, что приводит к диффузии влаги и соответствующим влажностным деформациям бетона.

Каждая из предложенных гипотез вносит определенный вклад в изучение морозостойкости бетона и факторов, ее определяющих.

Существующие методы оценки и прогнозирования морозостойкости бетонов предлагается условно разделить на следующие группы:

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

Методы первой группы. Наибольшее распространение получил метод, разработанный в центральной лаборатории коррозии НИИЖБ под руководством В. М. Москвина [6, 7]. Ускорение процесса разрушения достигается за счет снижения температуры замораживания образцов до минус 50 °С и использования в качестве среды для насыщения, замораживания и оттаивания образцов раствора хлористого натрия [6]. За счет ужесточения воздействия на бетон продолжительность испытания по предложенной методике сокращается в 6–10 раз. Граничным критерием морозостойкости служит 5 %-ное снижение прочности или 3 %-ная потеря массы образцов. Марку бетона по морозостойкости, выраженную в стандартных циклах замораживания-оттаивания, устанавливают по градуировочной таблице, в зависимости от количества ускоренных циклов. Разработанный метод в настоящее время нашел отражение в действующем межгосударственном стандарте [8].

В работе [9] для ускоренной оценки морозостойкости дорожных изделий предложена методика, воспроизводящая воздействия, которым подвергается дорожный бетон при эксплуатации. Метод включает циклическое замораживание образцов под слоем воды и их оттаивание в растворе хлористого натрия.

Интересная методика для оценки морозостойкости предложена в работе [10]. Бетонные образцы-кубы с ребром 100 мм насыщаются водой в соответствии с требованиями [11] и устанавливаются в специальную климатическую камеру рабочей гранью вниз. В процессе испытаний в камере поддерживается температура минус 30 °С. Через 1 час, после достижения заданной температуры в камере и далее через каждые 30 минут по поддону, на котором установлены образ-

цы, осуществляется пролив 15 %-ного раствора антигололедного реагента АНС таким образом, чтобы глубина погружения образцов в раствор составляла не менее 5 мм. Температура раствора составляет 20 °С, а продолжительность пролива 3 мин. Оценку морозостойкости ведут по показателю объема разрушения поверхностного слоя, который не должен превышать 0,04 см³/см².

За рубежом также предпринимаются попытки усовершенствовать методику испытаний на морозостойкость путем сокращения продолжительности испытаний. Так, в США [7, 12] разработаны и используются два ускоренных метода оценки морозостойкости бетонов, которые внесены в действующие стандарты ASTM C290 и ASTM C291. Стандарт ASTM C290 предусматривает испытание бетонных образцов при быстром замораживании и оттаивании в воде, а стандарт ASTM C291 – быстрое замораживание на воздухе и оттаивание в воде. Существует также метод замораживания и оттаивания образцов в растворе соли хлористого кальция (ASTM C 666), по которому степень деструкции бетона оценивают изменением динамического модуля упругости (ΔE) в процентах к этой величине для образцов эквивалентного возраста (E). Испытания заканчивают, если отношение $\Delta E/E$ снижается более чем на 44 %.

В работе [12], приведена методика «ДР» которая заключается в замораживании образцов до минус 20 °С в ванне с растворами солей хлорида кальция или натрия и оттаивании в ванне с проточной водой. Время замораживания образцов от + 20 °С до минус 20 °С составляет всего 8 минут, а оттаивание образцов занимает 5 минут. Такая высокая скорость замораживания и оттаивания позволяет значительно сократить продолжительность испытаний (более 40 циклов в сутки). В качестве критерия морозостойкости служит относительное удлинение образцов L

$$L = \frac{\Delta l}{l} \geq 0,1 \% , \quad (1.1)$$

где Δl – деформация на фиксированной базе образца, мм;

l – длина между реперами, мм.

Заканчивая обзор методов первой группы, следует отметить, что рассмотренные методы ускоренных испытаний бетона на морозостойкость являются лишь небольшой частью всего многообразия существующих методик, выбор и обоснование которых ограничи-

ваются лишь наличием необходимого оборудования и возможностью установления переходного коэффициента к стандартным циклам испытаний, а также соблюдением условия идентичности воздействий при разрушении бетона.

Методы второй группы. Наибольшее распространение получили методы, основанные на установлении связи между морозостойкостью и показателями, описывающими строение порового пространства. Изучению влияния на морозостойкость бетона структурных характеристик материала было посвящено множество работ, среди которых следует отметить работы, выполненные Г. И. Горчаковым, Ю. М. Баженовым, А. Е. Шейкиным, А. П. Меркиным, Ю. М. Буттом [7, 13–20]. Исследованиями [7] была показана возможность разделения порового пространства с точки зрения влияния на морозостойкость. Установлено, что основным дефектом структуры цементного камня и бетона являются капиллярные поры. При этом подчеркивается положительное влияние на морозостойкость контракционных пор. В работе [19] предложен критерий оценки морозостойкости – «компенсационный» фактор Φ_k , который определяется по зависимости:

$$\Phi_k = \frac{V_v + V_k}{V_l}, \quad (1.2)$$

где V_v – объем воздуха или газа в уплотненной смеси, %;

V_l – объем замерзающей воды в бетоне при температуре минус 20 °С, %;

V_k – объем контракционных пор, %.

$$V_k = 12 \cdot \frac{\Pi}{\rho_c}, \quad (1.3)$$

$$V_l = 100 \cdot \frac{\Pi}{\rho_v} \cdot \left(\frac{B}{\Pi} - 0,27 \right), \quad (1.4)$$

где Π – расход цемента, кг/м³;

ρ_c, ρ_v – соответственно плотность цемента и воды, кг/м³;

B/Π – водоцементное отношение.

Марку бетона по морозостойкости устанавливают по значению «компенсационного» фактора Φ_k значение которого зависит и от наличия в бетонной смеси воздухововлекающей добавки (рис. 1.1).

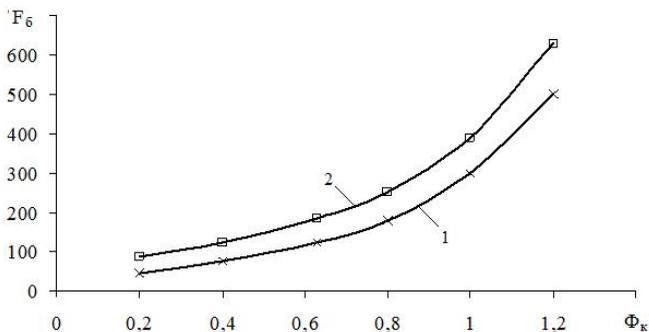


Рис. 1.1. Зависимость морозостойкости бетона (F_6) от «компенсационного фактора» (Φ_k):

1 – бетон без добавок; 2 – бетон с воздухововлекающей добавкой

Метод прогнозирования морозостойкости бетона на стадии проектирования его состава приведен в работе [20]. Морозостойкость бетона предложено оценивать по «критерию морозостойкости» (K_F), который определяют как отношение условно-замкнутой пористости образца (Π_{y3}) к интегральной пористости (Π_n)

$$K_F = \frac{\Pi_{y3}}{0,09 \cdot \Pi_n}, \quad (1.5)$$

где Π_{y3} – условно-замкнутая пористость, которая зависит от степени гидратации и расхода цемента в бетонной смеси, %;

Π_n – интегральная пористость, зависящая от расхода цемента, степени гидратации и коэффициента уплотнения бетонной смеси, %.

Зависимость количества циклов замораживания-оттаивания от «критерия морозостойкости» приведена на рис. 1.2.

При исследовании связи морозостойкости с характеристиками поровой структуры цементно-песчаного раствора [7] было получено уравнение для расчета функции морозостойкости P

$$P = V_{ц.т.} \cdot \left(\frac{B}{Ц} - 0,2 \right), \text{ 1/цикл}, \quad (1.6)$$

где $V_{ц.т.}$ – объем цементного теста, % к объему цементно-песчаного раствора;

$B/Ц$ – водоцементное отношение цементно-песчаного раствора.

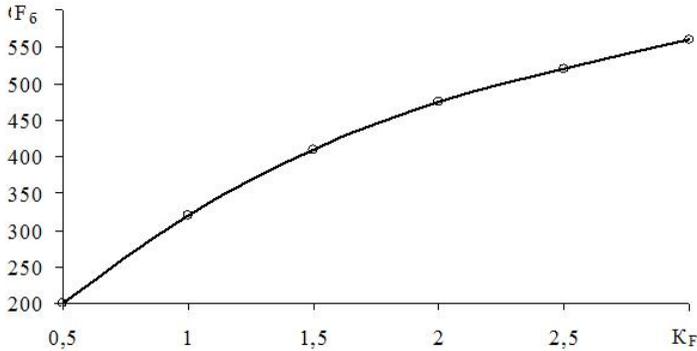


Рис. 1.2. Зависимость морозостойкости бетона (F_6) от «критерия морозостойкости» (K_F)

В уравнении (1.6) величина, которая вычитается из значения водоцементного отношения (0,2), соответствует количеству химически связанной воды, принятой авторами на основании работ Т. К. Пауэрса и Т. Л. Броунарда [21], равной 20 % от массы цемента.

На основании обобщения многочисленных экспериментальных данных по влиянию на морозостойкость бетона качества используемых материалов, а также цементно-водного отношения, для получения бетона высокой морозостойкости в работе [22] предложена следующая зависимость для оценки морозостойкости бетона F

$$F = A \cdot R_{ц} \cdot \left(\frac{Ц}{B} - 0,5 \right), \text{ циклы}, \quad (1.7)$$

где A – коэффициент, зависящий от качества материалов и бетона;
 $R_{ц}$ – активность цемента, МПа.

Автором [22] разработана номограмма для уточнения коэффициента (A) при подборе состава бетона, учитывающая характеристики исходных материалов и технологические параметры бетонной смеси.

В работе С. Ф. Бугрима [23] была предложена следующая формула для оценки морозостойкости F :

$$F = \frac{K \cdot R_{сж}}{U}, \text{ циклы}, \quad (1.8)$$

где K – коэффициент пропорциональности;

$R_{сж}$ – прочность на сжатие бетонного образца, МПа;

U – количество испаряющейся влаги из материала за заданный промежуток времени, отнесенное к условному зеркалу испарения, кг/м²·с.

Нами [24] была сделана попытка развить идею Бугрима С. Ф. [23], оценивая величину U с использованием уравнения миграции влаги в капиллярно-пористых телах [25]. После соответствующих преобразований предложена следующая зависимость для оценки морозостойкости [24]:

$$F = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \frac{R_{сж}}{a_m \cdot (1+\delta)} \cdot 10^{-12}, \text{ циклы}, \quad (1.9)$$

где K_1, K_2, K_3 – соответственно коэффициенты, зависящие от размеров образцов, минералогического состава цемента и количества во-влеченного воздуха;

a_m – коэффициент диффузии влаги, м²/с;

δ – относительный коэффициент термодиффузии влаги, 1 °С/м.

Последующая обстоятельная проверка предложенной схемы прогнозирования морозостойкости бетона показала, что уравнение (1.9) не обеспечивают должной точности расчетов при существенной неопределенности диффузионных характеристик материала.

Т. Пауэрс, выполнив для гипотетической модели цементного камня количественный анализ уравнения, определяющего величину фактора расстояния (\bar{L}), показал [2, 26], что морозостойкость бетона определяется соотношением

$$\bar{L} \leq L, \quad (1.10)$$

где \bar{L} – величина фактора расстояния, определяемая по данным измерений в шлифах бетона;

L – расчетная величина фактора расстояния.

Считается, что высокая морозостойкость бетона обеспечивается при $\bar{L} \leq 0,25$ мм.

Для расчета L предложено уравнение

$$L = \frac{30}{s_n} \left[1,4 \left(\frac{V_{илк}}{V_{в.п}} + 1 \right)^{-1/3} - 1 \right], \quad (1.11)$$

где $V_{ц.к}$ – объем цементного камня в бетоне, %;

S_n – удельная поверхность системы воздушных пор, m^2 ;

$V_{в.п}$ – объем воздушных пор в бетоне, %.

При выводе формулы (1.11) Т. Пауэрсом принято допущение о том, что модель распределения воздушных пор является идеализированной. Она имеет тот же объем и количество воздушных пор, что и реальная система, но принимает размеры пор и их расположение не хаотичным, а так, что эти поры одинаковы и расположены на равном расстоянии друг от друга.

Используя «теорию интервала между порами», исследования бетонов с добавками ПАВ [27] позволили установить, что морозостойкость бетона в значительной степени определяется прочностными показателями и содержанием (объемом) воздуха в порах размером $(50-500)10^{-6}$ м, а также расстоянием между их центрами l , которое определяли по зависимости

$$l = \frac{V_m}{90V_3 + 4,72V_4} \cdot 10^{-3}, \text{ м}, \quad (1.12)$$

где V_t – объем цементного теста в бетоне, m^3 ; V_3, V_4 – объем воздуха, % в порах размером $(50-200)10^{-6}$ м и $(200-500)10^{-6}$ м соответственно.

Одна из первых попыток связать морозостойкость с величиной капиллярной пористости была сделана в работе [13]. Для бетона нормального твердения, изготовленного на стандартных материалах, предложена зависимость вида

$$F = K \cdot (P_{нач} - P_k)^n \quad F = K \cdot (P_{нач} - P_k)^n, \text{ циклы}, \quad (1.13)$$

где F – число циклов замораживания (вызывающее определенную степень разрушения); $K, P_{нач}, n$ – параметры, зависящие от качества материалов, состава бетона, производственных факторов; P_k – капиллярная пористость бетона, %.

Показатель n для испытанных бетонов и цементно-песчаных растворов колебался в пределах от 2,7 до 3. Статистическая обработка позволила Г. И. Горчакову [13] конкретизировать зависимость (1.13) эмпирическим уравнением

$$F = (12 - P_k)^{2,7}, \text{ циклы}. \quad (1.14)$$

Формулу (1.14) предлагается использовать с учетом отношения контракционной пористости к капиллярной не менее 0,25–0,3. Зависимость (1.14) позволила предложить метод определения состава бетона с требуемой морозостойкостью [13]. В зависимости от необходимой марки по морозостойкости, с учетом качества применяемого цемента и условий твердения, данный метод предлагает находить величину капиллярной пористости проектируемого бетона, устанавливать по справочным данным степень гидратации цемента, а затем рассчитывать расход цемента, необходимый для получения требуемой капиллярной пористости. При этом найденный расход цемента должен быть не меньше требуемого из условия прочности. Позволив, в отличие от метода прогнозирования морозостойкости по степени насыщения, перейти от качественных оценок к количественным, вместе с тем зависимость (1.14) и предложенный на основе ее метод проектирования составов [13] обладают рядом недостатков. Главный из них заключается в том, что не учитывается в должной мере влияние на морозостойкость бетона основного структурного параметра - соотношения замкнутых резервных и открытых капиллярных пор. Это резко ограничивает применение предлагаемой зависимости (1.14) – лишь для бетонов без воздухововлекающих добавок.

В. В. Стольников [7, 28] предлагает характеризовать морозостойкость бетона его способностью впитывать воду, которая, в свою очередь характеризует капиллярные ходы, состоящие из двух систем: капилляров цементного камня и капилляров зоны контакта цементного камня и заполнителя.

Зависимость морозостойкости от градиентов «условной пористости» [7] предложена Г. А. Туркестановым. Автором разработан метод исследования порового пространства, основанный на положениях седиментационного анализа. Весь объем пористости, которая участвует в поглощении воды, разделен на частные объемы капилляров различного сечения. Установлена связь между морозостойкостью и значением первого градиента поперечных сечений, характеризующего крупные капиллярные поры.

Более поздние исследования [7, 29] позволили учесть совместное влияние показателей микро- и макроструктуры бетона на его морозостойкость. Под макроструктурой бетона понимается объемная

концентрация цементного камня в бетоне, под микроструктурой – содержание пор различных размеров.

Для оценки морозостойкости был предложен критерий (M), определяемый по зависимости

$$M = \frac{C+P_3}{P_2}, \quad (1.15)$$

где C – объемная концентрация цементного камня (макроструктура), m^3 ;

P_2, P_3 – соответственно, объем пор, заполняющихся водой при водонасыщении при атмосферном давлении и под вакуумом (микроструктура), m^3 .

При изучении влияния добавок на морозостойкость F и долговечность бетона в работе [12] в результате обработки экспериментальных данных получено уравнение регрессии вида

$$F = -25 + 204,4 \cdot KM^0, \text{ циклы.} \quad (1.16)$$

В формуле (1.16) «показатель морозостойкости» – KM^0 , предложено определять по формуле [12]:

$$KM^0 = \frac{P_{o,и} - F_t + P_{y,з}}{F_{-10^\circ C}}, \quad (1.17)$$

где $P_{o,и}$ – открытая пористость;

$P_{y,з}$ – условно-замкнутая пористость;

F_t – объемное содержание льда при замораживании до заданной температуры;

$F_{-10^\circ C}$ – объемное содержание льда при температуре $-10^\circ C$.

Показатели, входящие в формулу (1.17), определяются экспериментально на образцах нормального твердения в возрасте 28 сут. Авторы [12, 30] показали наличие линейной зависимости между показателем KM^0 и морозостойкостью бетона.

На основании обобщения многолетних исследований предложена [31] расчетно-экспериментальная методика прогнозирования морозостойкости бетона по показателю открытой пористости, характеризующейся радиальной фильтрацией воздуха сквозь слой бетона при создании разрежения. В качестве критерия морозостойкости

предложен показатель сопротивления структуры прониканию воздуха

$$F = \frac{330 \cdot A}{[1 \cdot 10^{(0,9-0,1 \cdot m)}]}, \text{ циклы,} \quad (1.18)$$

где A – коэффициент, зависящий от свойств применяемых материалов, д. е;

m – сопротивление бетона прониканию воздуха, с/см^3 .

Модель прогнозирования морозостойкости бетона, основанная на критерии морозостойкости ($K_{\text{мрз}}$) и рассматривающая структуру бетона, как функцию динамически изменяющейся степени гидратации цемента, предложена в [32]:

$$F = 78,0 \cdot K_{\text{мрз}}^2 + 122,3 \cdot K_{\text{мрз}} + 125,5, \text{ циклы.} \quad (1.19)$$

Критерий морозостойкости определяется по формуле

$$K_{\text{мрз}} = \frac{0,456 \cdot \alpha}{(В/Ц - 0,271 \cdot \alpha)}, \quad (1.20)$$

где α – степень гидратации цемента, %;

В/Ц– водоцементное отношение бетонной смеси.

По мнению авторов, определяя степень гидратации цемента (α) в зависимости от условий и продолжительности твердения, а не принимая ее постоянной, как это было ранее [20], можно существенно повысить точность прогноза морозостойкости бетона.

Интересная модель оценки морозостойкости бетона по кинетике его водонасыщения и прочностных характеристиках предложена в [33].

«Структурная теория бетона» разработанная Г. И. Горчаковым и Ю. М. Баженовым [7, 34–36], дала новый толчок в обеспечении и прогнозировании морозостойкости бетона. В соответствии со структурной теорией, морозостойкость бетона определяется в первую очередь его строением, т. е. при идентичности структур двух бетонов их морозостойкость будет одинаковой. Помимо структурных характеристик, идентичность двух структур бетона предложено оценивать по интегральной характеристике – «объему капиллярных пор». При совпадении структурных характеристик бетона, а также вычисленной капиллярной пористости бетона с аналогичными характеристиками образца с известной морозостойкостью дела-

ют вывод о том, что исследуемый бетон имеет марку по морозостойкости не ниже бетона, с которым ведут сравнение. Например, было установлено, что для получения бетона с морозостойкостью не ниже F200, изготовленном на портландцементе, необходимо, чтобы величина капиллярной пористости к началу замораживания не превышала 3 % для пропаренного бетона и 4,7 % для бетона нормально-влажностного твердения.

На основании многочисленных dilatометрических исследований цементных материалов, выполненных Г. И. Горчаковым и И. И. Лифановым [7, 14, 37], был предложен метод оценки морозостойкости бетонов по изменению объемных деформаций образцов при однократном глубоком замораживании и оттаивании. Dilатометрическая кривая, полученная авторами, имела характерные пики при температурах минус (5–7) °С и минус (40–45) °С, связанные с замерзанием воды соответственно в макро- и микрокапиллярах. В качестве характеристики морозостойкости предложено относительное удлинение материала (ε_t), определяемое по формуле

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{\text{вл}} - \varepsilon_{\text{сух}}, \quad (1.21)$$

где $\varepsilon_{\text{вл}}$, $\varepsilon_{\text{сух}}$ – относительные удлинения насыщенного водой и высушенного образца соответственно, %.

Данный метод, в настоящее время, внесен в межгосударственный стандарт [38] и используется для ускоренной оценки морозостойкости бетона.

Исследуя температурные деформации, а также количество льда, образующегося в порах керамзитопенобетона, с использованием dilatометра-калориметра [7] установлено, что между морозостойкостью керамзитопенобетона M и показателем льдистости (i – доля воды, перешедшей при замораживании в лед) существует зависимость вида

$$\lg M = (i_{\text{max}} - i) \cdot b, \quad (1.22)$$

где i_{max} , b – эмпирические коэффициенты.

В работе [12, 39] для оценки морозостойкости предлагается использовать в качестве основного параметра объемную льдистость l . Этот параметр измеряется при температуре минус 10 °С в бетоне

марочной прочности или после пропаривания образцов по заданному режиму. Количественная оценка производится по формуле [39]

$$C = l \cdot (В/Ц)^{\frac{1}{3}}, \quad (1.23)$$

где C – обобщенный параметр;

$В/Ц$ – водоцементное отношение бетонной смеси.

Морозостойкость (N), выраженная числом циклов замораживания и оттаивания бетона, находится в обратной зависимости от величины C [39]:

$$N - N_0 = \frac{1}{C - C_0}, \quad (1.24)$$

где N_0 , C_0 – соответственно предельные значения числа циклов и льдистости.

Определяя напряжения во влажных замораживаемых бетонных образцах, О. Я. Печкин [7, 40] установил, что существует зависимость между морозостойкостью бетона и напряжениями, вызываемыми однократным замораживанием образцов, а также прочностью на растяжение влажного бетона. Чем выше напряжение, вызванное однократным замораживанием, тем интенсивнее разрушается структура бетона при попеременном замораживании и оттаивании.

Используя теорию усталостного разрушения бетона, развитую в исследованиях [41], предложена экспоненциальная зависимость числа циклов замораживания и оттаивания (N) от относительных деформаций бетона (ε):

$$N = N_0 e^{-A\varepsilon}, \text{ циклы}, \quad (1.25)$$

где N_0 – предэкспоненциальный множитель;

A – постоянная.

Существуют методы прогноза морозостойкости второй группы, основанные на использовании неразрушающих методов, в частности ультразвука. Так, С. В. Шестоперовым [42] предложена модель, позволяющая связать скорость распространения ультразвукового импульса с морозостойкостью бетона. Модель состоит из следующих элементов: моделирования ошибки технологического процесса,

моделирования параметров технологического процесса, определения скорости ультразвука, определения изменения морозостойкости и статистической обработки. Связь скорости распространения ультразвука V со структурой бетона заимствована из работы [43] и имеет вид

$$V = V_0[(1 - v)\varphi + v \cdot \psi], \text{ м/с}, \quad (1.26)$$

где V_0 – скорость распространения ультразвука в материале скелета, м/с;

v – доля пор, заполненных водой;

φ – коэффициент пропорциональности, учитывающий наличие сухих пор;

ψ – коэффициент пропорциональности, учитывающий наличие пор, заполненных водой.

На основании статистической обработки большого количества экспериментальных данных по исследованию морозостойкости тяжелого бетона с различным расходом цемента и водоцементным отношением, в работе [44] предложена степенная зависимость относительного изменения времени распространения ультразвуковых колебаний $\Delta t/t$ от циклов попеременного замораживания и оттаивания:

$$\frac{\Delta t}{t} = \gamma \cdot \left(\frac{\Delta N}{N}\right)^\alpha, \quad (1.27)$$

где N – количество циклов замораживания-оттаивания, соответствующее началу интенсивного разрушения;

ΔN – количество циклов до полного разрушения материала;

γ, α – коэффициенты регрессии.

На основании выполненных исследований [44] разработаны рекомендации по контролю и прогнозированию морозостойкости бетона ультразвуковым импульсным методом.

Связь морозостойкости с коэффициентами интенсивности напряжений, характеризующих энергетическое состояние структуры бетона, рассмотрена в работе [45]. Разработана методика прогнозирования морозостойкости с использованием коэффициента интенсивности напряжений при нормальном отрыве, который определяют методом отрыва со скалыванием. Зависимость морозостойкости от

коэффициента интенсивности напряжений получена в виде квадратичной функции

$$F = A \cdot K^2 + B \cdot K + C, \text{ циклы,} \quad (1.28)$$

где A , B и C – постоянные коэффициенты, определяемые из экспериментальных данных, $\sqrt{m}/\text{МПа}$;

K – коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве, $\text{МПа}/\sqrt{m}$.

Статистическая обработка экспериментальных результатов, выполненная в работе [46] позволила установить, что зависимость морозостойкости бетона F от критерия F_k описывается показательной функцией вида

$$F = K \cdot (10^{F_k} - 1), \quad (1.29)$$

где K – коэффициент, зависящий от особенностей используемого цемента.

Для расчета критерия F_k предложена следующая формула [46]:

$$F_k = \frac{10V'_{\text{вх}} + 0,06 \cdot \alpha \text{Ц}}{B - 0,5\alpha \text{Ц} + 1000(1 - K_y)}, \quad (1.30)$$

где $V'_{\text{вх}}$ – объем резервных пор, образованных эмульгированным воздухом, м^3 ;

α – степень гидратации цемента, %;

Ц – расход цемента, $\text{кг}/\text{м}^3$;

B – расход воды, $\text{л}/\text{м}^3$;

K_y – коэффициент уплотнения бетонной смеси, д.ед.

Морозостойкость бетона изделий, изготовленных по технологии вибропрессования, предложено оценивать по совокупности двух характеристик: скорость ультразвука и влажность бетона [47]. Морозостойкость бетона определяют исходя из плотности бетона и скорости распространения ультразвука в бетоне. Вибропрессованный бетон по плотности предложено характеризовать двумя стадиями: стадия I и стадия II. К первой стадии относят бетон водопоглощение, которого не превышает 6 % по массе, ко второй стадии – бетон с водопоглощением более 6 % по массе.

На рис. 1.3 и 1.4 приведены зависимости «скорость ультразвука – морозостойкость мелкозернистого бетона» для двух стадий.

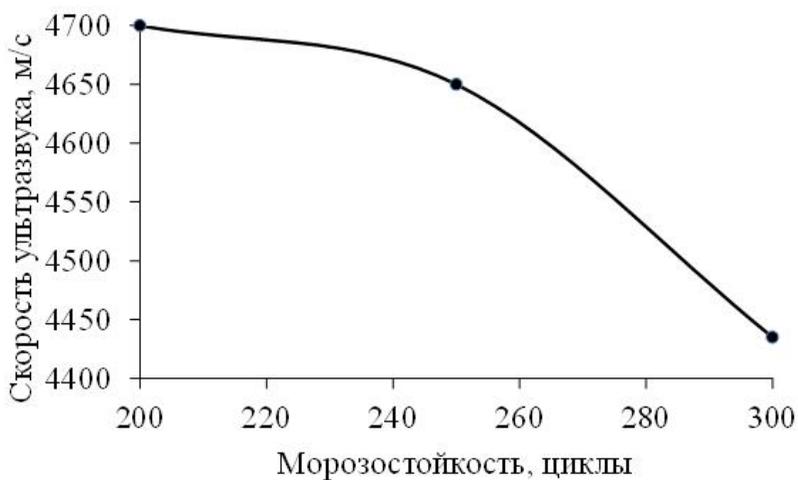


Рис. 1.3. Зависимость «скорость ультразвука – морозостойкость бетона» для стадии I



Рис. 1.4. Зависимость «скорость ультразвука – морозостойкость бетона» для стадии II

Методы третьей группы. Среди методов третьей группы хотелось бы отметить следующие две работы: исследования, выполненные в МИСИ им. Куйбышева [48] и исследования, проводимые в ДальНИИС РААСН по изучению морозостойкости керамзитобетона [49, 50].

В работе [48] процесс разрушения бетона при попеременном замораживании и оттаивании сравнивается с процессом накопления повреждений в структуре материала при многократном повторно-переменном силовом нагружении, в результате чего в структуре бетона постепенно накапливаются повреждения, которые и приводят, в конечном счете, к разрушению материала. Постепенное накопление повреждений (Π) при замораживании-оттаивании предложено выражать уравнением:

$$\Pi = b \cdot N^a, \quad (1.31)$$

где a, b – параметры, зависящие от стойкости материалов в принятых условиях испытания;

N – число циклов нагружения.

Для моделирования напряженного состояния бетона при попеременном замораживании и оттаивании разработана конструкция специальной напорной камеры, которая позволяет создавать в исследуемом образце внутривещное избыточное давление, что, по мнению авторов [47], моделирует давление, возникающее в порой структуре материала за счет кристаллизационного давления льда, гидравлического давления жидкости и осмотического давления в капиллярах при попеременном замораживании и оттаивании. За критерий морозостойкости принят показатель предельной объемной остаточной деформации, оцениваемый в сравнении с аналогичным показателем для контрольных образцов, который устанавливают на подготовительном этапе работ.

В работах, проводимых ДальНИИС РААСН [49, 50], оценку морозостойкости предложено производить по уровню предельно допустимых напряжений в структуре материала, при которых по действующим нормативным документам допускается снижение прочности до 5 %. В данном методе заложен кинетический способ контроля, который позволяет с помощью математического описания проследить процессы разрушения материала при циклическом воз-

действии замораживания и оттаивания. Математическая модель изменения прочности при попеременном замораживании и оттаивании (R_n) представляет трехпараметрическую функцию

$$R_n = R_0 \cdot [A \cdot N^{1/2} + B \cdot N + C \cdot \sin(\omega \cdot N^{1/2})], \text{ МПа,} \quad (1.32)$$

где R_0 – предел прочности перед началом испытаний контрольных образцов в насыщенном водой состоянии, МПа;

A , B и C – экспоненциальные коэффициенты, выражающие количественное протекание деструктивного и конструктивного процессов в исследуемом материале;

N – количество циклов замораживания и оттаивания;

ω – круговая частота гармонической функции.

Оценку морозостойкости при использовании модели (1.32) ведут по фиктивному коэффициенту предельно-допустимого напряжения на структуру материала.

Исследуя морозостойкость ячеистых бетонов и пути ее повышения, Г. А. Фокин [51] предложил метод прогнозирования, основанный на закономерностях кинетики разрушения материала при попеременном замораживании и оттаивании. В основу прогнозирования положен факт образования единичного микродефекта. Критерием морозостойкости является количество микродефектов. Общую сумму микродефектов (Σn) предложено определять из выражения

$$\Sigma n = K \frac{V}{2\pi^2 D^2 b}, \quad (1.33)$$

где K – объемная плотность материала, $1/\text{м}^3$;

V – объем вяжущего, м^3 ;

D – наиболее вероятный диаметр капиллярных пор, м;

b – критическая длина трещины, м.

Время жизни материала T (количество циклов замораживания-оттаивания до разрушения) предложено определять по формуле

$$T = \frac{\Sigma n}{\bar{y}}, \quad (1.34)$$

где \bar{y} – средняя скорость разрушения материала, определяемая за несколько циклов замораживания-оттаивания, $\Sigma n/\text{цикл}$.

Модель разрушения бетона при попеременном замораживании и оттаивании, предложенная в работе [52] основана на понятии «потеря бетона». «Потеря бетона» характеризует уменьшение размеров поперечного сечения конструкции за счет повреждения бетона при замораживании-оттаивании, которую соотносят с количеством циклов или временем. Скорость разрушения бетона при действии попеременного замораживания и оттаивания r предложено определять как функцию времени по линейной зависимости

$$r = c_{env} \cdot c_{cur} \cdot c_{age} \cdot a^{-0,7} \cdot (f_{ck} + 1)^{-1,4}, \text{ мм/цикл}, \quad (1.35)$$

где c_{env} – коэффициент, зависящий от условий окружающей среды;

c_{cur} – коэффициент, зависящий от возраста бетона;

c_{age} – коэффициент, зависящий от состава вяжущего;

a – содержание вовлеченного воздуха в бетонной смеси, %;

f_{ck} – средняя прочность бетона на сжатие, МПа.

В [52] приведены расчетные зависимости и таблицы для определения указанных коэффициентов.

Следует отметить, что данная модель в основном используется при расчетах конструкций, подвергающихся действию попеременного замораживания и оттаивания, поскольку, зная скорость разрушения, можно оценить изменение поперечного сечения конструкции за заданный промежуток времени.

Методы четвертой группы. К данной группе можно отнести в первую очередь структурно-механический метод ускоренного определения морозостойкости, вошедший в межгосударственный стандарт [53]. В качестве критерия для оценки морозостойкости используют два показателя: капиллярно-открытую пористость (Π_o) и коэффициент повышения прочности (K), который представляет собой отношение прочности образцов в замороженном состоянии (R_3) к прочности насыщенных водой образцов (R_n):

$$K = \frac{R_3}{R_n}, \quad (1.36)$$

Капиллярно-открытую пористость образцов определяют по удельной контракции применяемого цемента либо по величине водопоглощения в нормальных условиях и после кипячения. Морозостойкость бетона M определяют по формуле

$$M = M_{\min} + \frac{(M_{\max} - M_{\min})(K_{\max} - K_i)}{(K_{\max} - K_{\min})}, \text{ циклы}, \quad (1.37)$$

где K_i – фактический коэффициент повышения прочности;

M_{\max} , M_{\min} , K_{\max} , K_{\min} – величины, определяемые по значению капиллярной пористости образца.

Дальнейшим развитием структурно-механического метода оценки морозостойкости явилась работа, выполненная под руководством Н. П. Блещика [54, 55]. Авторами предложен метод, позволяющий прогнозировать морозостойкость бетона с учетом структурных и деформационных характеристик цементного камня и бетона. Разработаны расчетные формулы для определения основных видов пористости, модулей упругости цементного камня и заполнителей, температурных коэффициентов линейного расширения. Количество стандартных циклов замораживания и оттаивания (n) определяют по зависимости

$$n = \left[0,5 - \frac{K_F - 0,35}{0,1 + 3,5 \cdot K_F - 0,12 \cdot K_F^2} \right] \cdot 10^3, \text{ циклы}, \quad (1.38)$$

где K_F – критерий морозостойкости, который определяется по структурным и деформационным характеристикам цементного камня и бетона.

В. И. Савиным [56] при обобщении собственных исследований предложено для оценки морозостойкости легких бетонов использовать величину приведенного удлинения образца (ε_t):

$$\varepsilon_t = \frac{0,028}{1 + a \cdot n}, \quad (1.39)$$

где n – структурная характеристика бетона, которая зависит от объема открытых и условно-замкнутых пор, от степени насыщения их водой, от размера и характера распределения воздушной пористости;

a – отношение модуля упругости скелета бетона к модулю упругости льда.

1.2. Методы оценки и прогнозирования коррозионной стойкости бетона при воздействии растворов солей

Изучением процессов коррозии, протекающих при действии солей хлоридов, исследователи занимаются на протяжении многих десятилетий. Предложено большое количество математических моделей для описания процесса коррозии при действии жидких агрессивных сред. Однако до сих пор не существует общепринятой модели для описания процессов при солевой форме физической коррозии. Это обусловлено двумя причинами: во-первых, отсутствием единого взгляда на причины разрушения бетона и, во-вторых, отсутствием должной количественной оценки влияния различных механизмов взаимодействия среды и бетона на коррозионную стойкость последнего.

На причины, вызывающие разрушения бетона при воздействии водных растворов солей хлоридов, не существует единого мнения. Из рассмотрения различных взглядов исследователей можно предположить следующие основные причины разрушения бетона:

- выщелачивание извести [57–61];
- химическое взаимодействие солей со свободной известью и минералами цементного камня [62–65];
- кристаллизационное давление растущих в порах материала кристаллов соли [66–72];
- давления, возникающие при модификационных переходах кристаллов безводных солей в кристаллогидраты этих же солей при знакопеременных температурах [73];
- давления при фазовых переходах непрогидратированных зерен цемента в кристаллогидратные новообразования в стесненных условиях кольматации пор материала солями [74, 75];
- осмотические явления и осмотическое давление мигрирующих в толще бетона солевых растворов [76];
- расклинивающее действие тонких пленок солевых растворов и воды [77];
- усадка цементного камня и бетона, насыщенного кристаллами соли [78] и пр.

Для описания механизмов взаимодействия жидкой агрессивной среды и бетона при солевой форме физической коррозии можно

воспользоваться работами В. М. Москвина, который предложил общий процесс коррозии разделить на три вида [57]:

- растворение и вынос из бетона его компонентов без протекания химической реакции (выщелачивание);
- химическое взаимодействие между растворяющимися компонентами бетона и агрессивной средой с последующим удалением продуктов реакции во внешнюю среду;
- образование в порах бетона новой кристаллической фазы, как продукта взаимодействия между средой и бетоном, с возникновением кристаллизационного давления.

Исходя из описанных выше причин разрушения бетона при действии солей хлоридов, возможно существование всех трех механизмов коррозионного воздействия, однако какой из них является лимитирующим, зависит от конкретных условий взаимодействия среды и бетона. В случае постоянного погружения бетона в агрессивную среду, процессы коррозии определяются, в основном, механизмами первого и второго вида. Если же конструкция находится в зоне переменного воздействия агрессивной среды или под воздействием знакопеременных температур и постоянно изменяющейся влажности, то агрессивное воздействие солей хлоридного типа многократно возрастает, и в данном случае на разрушение бетона оказывают влияние кристаллизация и дополнительно температурно-влажностные деформации бетона [79].

Рассматривая модели для описания процессов коррозии бетона, авторы в работе [80] отмечают, что для всех видов коррозии обязательным процессом является фазовый переход, связанный с растворением компонентов цементного камня и переход их из твердого состояния в жидкое. Однако лишь в случае солевой формы физической коррозии имеет место обратный процесс – переход из жидкого в твердое состояние. Далее авторы предлагают описывать данные процессы уравнениями теплопереноса, кристаллизации, а также уравнениями механики, описывающими эффекты самонапряжения.

Коррозионную стойкость бетона при солевой форме физической коррозии в многочисленных исследованиях [59–88] связывают, в первую очередь, с проницаемостью бетона для агрессивного компонента, т. е. с характеристиками пористой структуры материала. Так, в работе [88] предложено общую зависимость кинетики развития

процесса коррозии при действии солей хлоридов выражать уравнением

$$КС = C \cdot \sqrt{\tau}, \quad (1.40)$$

где КС – коэффициент стойкости материала, представляющий собой соотношение, например, прочности образцов до и после воздействия агрессивной среды;

C – постоянный коэффициент, характеризующий перемещение фронта коррозии;

τ – время взаимодействия бетона с агрессивной средой, ч.

Уравнение (1.40) представляет закон «квадратного корня из времени», который, как известно, характеризует внутреннюю диффузию. Процесс внутренней диффузии наблюдается в том случае, если агрессивная среда контактирует с бетоном, который имеет определенную влажность, обусловленную явлениями адсорбции и капиллярной конденсации. Движущей силой процесса диффузии является перепад или градиент концентраций агрессивного вещества у поверхности и в теле бетона [89]. Количество агрессивного вещества ($Q_{\text{агр}}$), которое может поступить в тело бетона за определенный промежуток времени при лимитирующем процессе диффузии, предложено определять по следующей зависимости [88]

$$Q_{\text{агр}} = 2C_0 \sqrt{\frac{D}{\tau}}, \text{ м}^3, \quad (1.41)$$

где C_0 – концентрация агрессивного компонента у поверхности бетона, %;

D – эффективный коэффициент диффузии агрессивного вещества, $\text{м}^2/\text{с}$;

τ – время диффузии, с.

В реальных условиях эксплуатации при периодическом изменении влажности и температуры бетона механизм взаимодействия агрессивной среды определяется не только диффузионными процессами. При наличии испаряющей поверхности и попеременном насыщении бетона раствором соли и высушивании создаются условия для проявления капиллярного механизма поглощения агрессивного компонента. Для описания перемещения влаги и агрессивного

вещества в материалах при капиллярном поглощении также используют уравнение «корня квадратного из времени» [88]

$$Q = K \cdot \sqrt{\tau}, \quad (1.42)$$

где Q – количество вещества, поглощенного единицей поверхности образца, $\text{м}^3/\text{м}^2$;

K – коэффициент капиллярного поглощения, который характеризует капиллярно-пористое строение материала, $\text{м}^3/\text{м}^2\text{ч}$;

τ – время взаимодействия с агрессивной средой, ч.

Сравнение уравнений (1.40) и (1.42) показывает, что лимитирующим процессом при коррозии бетона в растворах солей хлоридов является скорость капиллярного поглощения.

В [90] предложено связывать коррозионное состояние бетона с его структурными характеристиками. Структура бетона определяет также и его сорбционные свойства [91].

При циклическом изменении температуры на процесс взаимодействия агрессивного вещества с бетоном накладывается влияние эффекта термовлагопроводности [89], который в одном случае способен тормозить процесс поглощения бетоном агрессивного компонента, а в другом случае – ускорять. Хорошо известно влияние на коррозионную стойкость бетона совместного действия замораживания и растворов солей, понижающих, температуру замерзания [6, 9, 12, 57, 92].

При изучении влияния влажностной деформативности (усадки и набухания) цементного камня и бетона на коррозионную стойкость показано [74–77, 93, 94], что снижение влажностных деформаций цементного камня способствует повышению его стойкости к солевой форме физической коррозии. Уменьшения влажностных деформаций добиваются повышением степени закристаллизованности геля (повышение степени гидратации) за счет рационального выбора режимов твердения.

В качестве критерия для оценки коррозионной стойкости в работе [95] предложен эффективный коэффициент диффузии хлоридов. Определяя эффективный коэффициент диффузии и зная критическое количество поглощенных хлоридов по уравнению (1.42), можно определить время начала разрушения бетона.

В работе [88] глубину коррозионного поражения бетона (L) при коррозии III вида предложено рассчитывать по формуле

$$L = K_{III} \cdot h \cdot \tau, \quad (1.43)$$

где h – глубина проникновения агрессивного вещества, м;
 τ – время взаимодействия с агрессивной средой, с.

В (1.43) K_{III} является константой скорости процесса коррозии и которую определяют по формуле

$$K_{III} = \frac{2D \cdot \omega_k}{m} \cdot C_0, \text{ м}^{-1}\text{с}^{-1}, \quad (1.44)$$

где D – эффективный коэффициент диффузии агрессивного вещества в бетоне, $\text{м}^2/\text{с}$;

ω_k – остаточная пористость, при которой наступает разрушение при кристаллизации;

m – содержание агрессивного вещества в единице объема бетона;

C_0 – концентрация агрессивного вещества у поверхности бетона, %.

При исследовании коррозионной стойкости автоклавных сланцезольных бетонов [96] в качестве критерия оценки предложен показатель «тангенс подъема кривой капиллярного поглощения» ($\text{tg}\alpha$), который, по мнению автора, характеризует количество пор, принимающих участие в процессах движения и обмена агрессивного вещества с бетоном

$$\text{tg}\alpha = \frac{W}{\sqrt{\tau}}, \text{ см}/\sqrt{\text{ч}}, \quad (1.45)$$

где W – количество агрессивного раствора, поглощенного единицей поверхности бетона, $\text{см}^3/\text{см}^2$;

τ – время взаимодействия поверхности бетона с агрессивным раствором, ч.

Было показано, что автоклавные сланцезольные бетоны являются стойкими против солевой коррозии, если значение $\text{tg}\alpha$ не превышает $0,12 \text{ см}/\sqrt{\text{ч}}$. Цементный бетон, который имел показатель $0,163 \text{ см}/\sqrt{\text{ч}}$, оказался нестойким против действия солей.

Исследования морозостойкости цементного камня и бетона на различных видах заполнителя [97] позволили установить связь коррозионной стойкости от показателя микротвердости цементного камня ($M_{ТВ}$), которую предложено определять по следующей эмпирической зависимости:

$$M_{ТВ} = a \cdot R_{ц} \cdot \left(\frac{Ц}{В} + C \right), \quad (1.46)$$

где a – коэффициент, который учитывает вид заполнителя;

$R_{ц}$ – активность цемента, МПа;

$\frac{Ц}{В}$ – исходное цементно-водное отношение;

C – количество воды, поглощенной заполнителем, %.

Оценку проницаемости бетона для агрессивных ионов (K) и, следовательно, его коррозионной стойкости, в работе [98] предложено определять по диффузной проницаемости:

$$K = 0,125 \cdot K_{Д} \cdot \bar{r}^2 \cdot 10^8, \text{ м/ч}, \quad (1.47)$$

где $K_{Д}$ – диффузная проницаемость бетона, которую определяют по удельной электропроводности бетона, м³/ч;

\bar{r} – средний радиус пор бетона, м.

В работе [99] после обработки экспериментальных данных (рис. 1.4) получена зависимость кристаллизационного давления (q) от величины относительного соленакопления (рис 1.5):

$$q = C \cdot S^2, \quad (1.48)$$

где C – постоянный коэффициент, зависящий от состава бетона;

S – величина соленакопления, которая является функцией количества циклов попеременного насыщения и высушивания образцов $S = f(N)$ (рис. 1.6).

Исследования коррозионной стойкости бетона в растворах солей хлоридов, выполненные под руководством И. Н. Ахвердова [74, 78], позволили установить, что деструкция цементного камня происходит в результате перераспределения в нем жидкой фазы, при которой снижается прочность структурных связей и достигается полная кольматация пор солью.

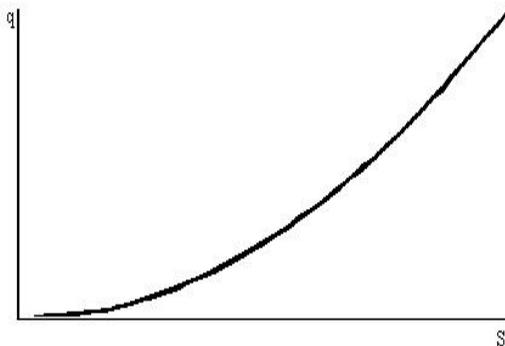


Рис. 1.5. Общий вид зависимости $q = C \cdot S^2$

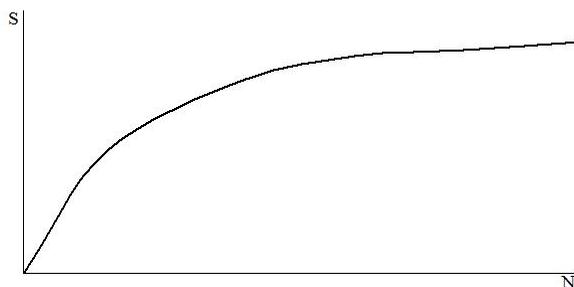


Рис. 1.6. Общий вид зависимости $S = f(N)$

Разрушение цементного камня при попеременном насыщении и высушивании авторы связывают с возникновением расклинивающего давления за счет продолжающихся процессов структурообразования цементного камня, поры которого заполнены солями в виде безводных соединений. Для характеристики процессов структурообразования предложен показатель «плотность твердой фазы» ($\rho_{т.ф.}$), который складывается из плотности цементного ядра и новообразований и определяется по зависимости

$$\rho_{т.ф.} = \frac{\left(\frac{\rho_c^0}{\rho_c^0 - \rho^0} - 1\right)}{\frac{1 - m_c}{\rho_c^0 - \rho^0} - \frac{1}{\rho_c}}, \text{ кг/м}^3, \quad (1.49)$$

где ρ_c^0 , m_c – соответственно плотность (кг/м³) и пористость (д. ед.) образца, насыщенного раствором соли;

ρ^0 – плотность ненасыщенного образца, кг/м³;

ρ_c – плотность соли, кг/м³.

В работе [78] долговечность бетона, насыщаемого раствором соли, автор связывает с деформационными свойствами цементного камня – деформациями усадки (ε_y), которые предложено определять по формуле:

$$\varepsilon_y = -2,74 \cdot 10^{-2} \cdot (X - 0,63) \cdot K_{нт} \cdot \frac{\rho_{ц}}{(1 + \varepsilon_r) \cdot \rho_{т.ф.}} \times \left(1 - \frac{\rho_{т.ф.} - \rho_{н.о.}}{\rho_{ц} - \rho_{н.о.}} \right) \cdot \frac{\rho_{н.о.}}{\rho_k}, \quad (1.50)$$

где X – относительное водосодержание цементного теста;

$K_{нт}$ – коэффициент нормальной густоты цемента;

$\rho_{ц}$ – истинная плотность зерен цемента, кг/м³;

ε_r – коэффициент пористости цементного геля;

$\rho_{т.ф.}$ – плотность твердой фазы гидратированного цемента, кг/м³;

$\rho_{н.о.}$ – плотность новообразования гидратированного цемента, кг/м³;

ρ_k – плотность цементного камня, кг/м³.

Для разработки расчетной модели для оценки морозостойкости и коррозионной стойкости бетона из рассмотренных методов оценки и прогнозирования наибольший интерес представляют методы второй, третьей и четвертой групп (по предложенной классификации). Выбор данных методов обусловлен тем, что, во-первых, накоплен достаточно обширный материал по влиянию структурно-механических характеристик на морозостойкость бетона, во-вторых, использование данных моделей позволяет оценивать морозостойкость еще на стадии проектирования составов бетона и, в-третьих, они позволяют отказаться от прямых циклических испытаний. Что касается коррозионной стойкости бетона при солевой форме физической коррозии, то все существующие методы прогнозирования, связывают стойкость бетона, в первую очередь с его проницаемостью для агрессивного компонента, т.е. с характеристиками пористой структуры материала. В связи с этим, важной и актуальной задачей является дальнейшее изучение влияния структурно-механических ха-

рактических характеристик бетона на морозостойкость и коррозионную стойкость бетона, а также изучение кинетики изменения структурно-механических характеристик при циклических воздействиях. Данные исследования позволят предложить новые и совершенствовать имеющиеся методы прогнозирования, а также выявить общие факторы, определяющие как морозостойкость, так и коррозионную стойкость (солестойкость) бетонов.

Обобщение и анализ методов оценки и прогнозирования, уже на данном этапе, позволяет провести аналогию между морозостойкостью и коррозионной стойкостью. Проиллюстрируем это схемами, на которых представлены основные факторы, определяющие морозостойкость и коррозионную стойкость, полученные на основе анализа расчетных зависимостей (рис. 1.7 и 1.8).

Из представленных схем следует, что большинство факторов, определяющих морозостойкость бетона, одновременно являются факторами, определяющими его коррозионную стойкость. Следовательно, возможно предложить общую модель для оценки и прогнозирования морозостойкости и коррозионной стойкости бетона.

Основываясь на современном кинетическом подходе, который заключается в том, что разработка научно-обоснованных методов оценки и прогнозирования стойкости бетонов при различных эксплуатационных воздействиях должна базироваться на детальном изучении кинетики протекания коррозионных процессов, предметом исследований должны являться процессы, происходящие в структуре цементного камня (бетона), которые возникают в результате циклических воздействий.

При циклических воздействиях на бетон параллельно протекают два процесса конструктивный и деструктивный. Так, в работе [12] указывается, что «...при определении морозо- и морозосолестойкости бетона нужно учитывать, что в нем протекают взаимно противоположные процессы, о чем свидетельствует и кинетика изменения физико-механических и упругих свойств испытываемых образцов: экспериментальные кривые обычно имеют экстремальный характер во влажном бетоне, подвергаемом попеременному замораживанию и оттаиванию протекают конструктивные и деструктивные процессы.»

Под конструктивными процессами авторы [12] подразумевают процессы, связанные с возможностью дальнейшей гидратации цемента, а под деструктивными, процессы, связанные с воздействием

на структуру материала циклического замораживания и оттаивания. Таким образом, в последующих разделах монографии будут приведены исследования по изучению влияния циклических воздействий на изменение структурно-механических характеристик (степень гидратации, объем открытых капиллярных пор и прочность на сжатие) цементного камня и бетона.



Рис. 1.7. Основные факторы, определяющие морозостойкость бетона



Рис. 1.8. Основные факторы, определяющие солестойкость бетона

2. ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА КИНЕТИКУ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

2.1. Материалы, образцы и методика проведения исследований

Экспериментальные исследования влияния циклического замораживания и оттаивания, насыщения и высушивания на кинетику изменения структурно-механических характеристик бетона проводили на образцах цементного камня. Бетон является конгломератом, где кроме вяжущего присутствуют и другие структурные элементы (заполнитель, зона контакта заполнителя с цементным камнем, пористость и т.д.), которые вносят свой вклад в долговечность бетона. Наличие дополнительных структурных элементов в бетоне, конечно, будет вносить свои коррективы, однако принципиально не изменит характер влияния изучаемых процессов на морозостойкость и коррозионную стойкость бетона. В связи с этим, изучение кинетики протекания конструктивных и деструктивных процессов проводили на цементном камне, и полученные результаты впоследствии распространяли на бетоны, используя коэффициенты, позволяющие учесть влияние дополнительных структурных элементов.

Для экспериментального исследования влияния циклического замораживания и оттаивания, насыщения и высушивания на кинетику изменения степени гидратации и структурные характеристики цементного камня из-за большого объема определений следует использовать методики, которые должны быть просты, и в тоже время обеспечивать сопоставимость и достоверность результатов. Из всего многообразия методов для оценки и определения степени гидратации [100] этим требованиям отвечает методика оценки степени гидратации по количеству химически связанной воды (w_x). Количество химически связанной воды определяют прокаливанием предварительно высушенной при 105 °С до постоянной массы навески гранул цементного камня. Температура, при которой прокаливают навеску, по различным данным составляет от 600 до 900 °С. При проведении опытов была принята температура прокаливания 800 °С при продолжительности 4 часа [101].

Содержание химически связанной воды определяют по формуле [100]

$$w_x = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100, \%, \quad (2.1)$$

где m – навеска затвердевшего цементного камня, высушенная до постоянной массы при температуре 105°C , г;

m_0 – то же после прокаливании, г.

Зная количество химически связанной воды можно определить степень гидратации вяжущего по формуле [100]

$$\alpha = \frac{w_x}{w_0} \cdot 100, \%, \quad (2.2)$$

где w_0 – количество воды, которое связывается при полной гидратации вяжущего и которое на основании данных работ [21, 105] может быть принято равным 22,7 % или приблизительно 23 % от массы вяжущего.

Под структурными характеристиками цементного камня, прежде всего, понимают количество и размер капиллярных пор, которые по данным многочисленных исследований [5–7, 9, 10, 12, 13, 92, 106, 107 и др.] оказывают наибольшее влияние на стойкость бетона в различных эксплуатационных средах. Для исследования характеристик поровой структуры цементного камня используют большое разнообразие методов. В нашем случае, при выполнении исследований, нас будет интересовать не столько абсолютные значения пористости (размер, количество, распределение по диаметрам и т. д.), сколько относительные, т. е., прежде всего, относительное изменение пористости в процессе циклических воздействий на цементный камень. Для этих целей наиболее проходит метод оценки капиллярно-пористой структуры по кинетике водонасыщения образцов [108]. По данной методике, определяя скорость водопоглощения образцов, косвенно оценивают показатель среднего размера капиллярных пор λ . Данный показатель интегрально характеризует не только размер, но и объем открытых капиллярных пор W_0 .

Поскольку за базовые образцы при проведении исследований, приняты кубы с размером ребра 20 мм (увеличение размера образцов сверх этой величины представляется нерациональным ввиду недостаточной устойчивости цементного камня к трещинообразова-

нию), предварительно необходимо было определить переходной коэффициент к образцам стандартного размера [108] с длиной ребра 70 мм. С этой целью были изготовлены 3 серии образцов базового и стандартного размера из цементного теста с водоцементными отношениями 0,25; 0,35 и 0,45. Каждая серия включала по 3 образца базового и стандартного размера. Объем капиллярных пор (водопоглощение образцов по объему) определяли по методике [109], среднюю плотность затвердевшего цементного камня по методике [110]. Истинную плотность цементного камня определяли по объему вытесняемой жидкости навеской измельченного цементного камня в приборе Ле-Шателье. Полный объем пор определяли по методике [108].

При проведении исследований в качестве критерия, способного интегрально оценить изменение механических характеристик цементного камня при циклических воздействиях была принята прочность образцов на сжатие. Прочность цементного камня на сжатие косвенно отражает процессы, происходящие в структуре материала при циклических воздействиях, а также является основной характеристикой, по изменению которой судят о морозостойкости или коррозионной стойкости материала. Прочность цементного камня определяли по методике [111]. При расчете значения прочности масштабный коэффициент не учитывали, т.к. при обработке результатов использовали относительные величины.

Для изучения влияния циклического замораживания и оттаивания, насыщения и высушивания на кинетику изменения степени гидратации и структурно-механических характеристик цементного камня за базовые образцы были приняты кубы с размером ребра 20 мм. Для изготовления образцов использовали вяжущие трех Белорусских заводов, отвечающие требованиям [112] (табл. 2.1 и 2.2).

Образцы изготавливали из цементного теста с водоцементными отношениями 0,2; 0,25; 0,3; 0,35 и 0,40. Цементное тесто в формах уплотняли на лабораторной виброплощадке или на встряхивающем столике в зависимости от консистенции полученного теста. Для изучения влияния условий твердения, а также для получения цементного камня качественно различной структуры для твердения образцов было принято три режима (табл. 2.3). Тепловая обработка образцов, изготовленных с использованием шлакопортландцемента производилась при температуре изотермической выдержки (90 ± 2) °С.

Таблица 2.1

Вид вяжущих, завод-поставщик

Маркировка	Завод изготовитель, вид и марка вяжущего	Минералогический состав, % по массе			
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Ц-1	ОАО «Красносельскстрой-материалы», ПЦ-500-Д0	56,2	20,5	3,8	17,5
Ц-2	ПРУП «Белорусский цементный завод», ПЦ-500-Д20	58,2	21,1	7,1	10,3
Ц-3	ПРУП «Кричевцемент-шифер, ШПЦ-400	56,1	20,8	5,1	15,9

Таблица 2.2

Характеристики вяжущих

Маркировка	Истинная плотность, кг/м ³	Нормальная густота, %	Удельная поверхность, м ² /кг	Предел прочности, МПа	
				на изгиб	на сжатие
Ц-1	3180	28,5	318,0	6,14	54,7
Ц-2	3120	25,0	305,0	5,93	49,2
Ц-3	2950	24,0	289,0	4,85	41,0

Режимы циклических воздействий на цементный камень были приняты таким образом, чтобы можно было оценить влияние температуры замораживания и сушки на изменение исследуемых характеристик цементного камня (табл. 2.4).

Для проведения исследований использовалось 45 серий образцов, которые отличались видом применяемого вяжущего, условиями твердения, водоцементными отношениями. Каждая серия включала 132 образца (по 33 образца на каждый режим испытаний). Количество образцов на каждый режим определялось из условия получения не менее 11 экспериментальных точек, включая контрольные образцы. В каждой намеченной экспериментальной точке количество образцов, которые подвергали испытанию, составляло не менее трех. Вначале определяли показатель среднего размера капиллярных пор, затем определяли прочность образцов на сжатие, испытанием на прессе до разрушения, а затем из полученных фрагментов отбирали навески материала для определения степени гидратации вяжущего.

Таблица 2.3

Режимы твердения образцов цементного камня

Маркировка	Режим твердения
НВ	Нормально-влажностный: 1 сутки в формах, далее 27 суток в камере нормально-влажностного твердения при температуре $(20 \pm 3) ^\circ\text{C}$ и относительной влажности $(95 \pm 5) \%$
С	Воздушно-сухой: 1 сутки в формах, далее 27 суток при температуре $(20 \pm 3) ^\circ\text{C}$ и относительной влажности 60–75 %
ТО	Тепловая обработка по режиму: выдержка в камере при температуре $(20 \pm 3) ^\circ\text{C}$ – 3 часа; подъем температуры до $80 \pm 2) ^\circ\text{C}$ – 4 часа; изотермическая выдержка при температуре $(80 \pm 2) ^\circ\text{C}$ – 12 часов; остывание образцов вместе с камерой до температуры не более $40 ^\circ\text{C}$ – около 3 часов и далее 27 суток в камере нормально-влажностного твердения

Таблица 2.4

Режимы испытаний образцов

Маркировка	Режим испытаний
F-1	Замораживание и оттаивание образцов: замораживание образцов при температуре минус $(20 \pm 3) ^\circ\text{C}$ - 4 (1)* часа; оттаивание образцов в воде с температурой $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ – 4 (1)* часа [11]
F-2	Замораживание и оттаивание образцов в 5 %-ном растворе NaCl: понижение температуры от минус $10 ^\circ\text{C}$ до минус $(50 \pm 5) ^\circ\text{C}$ – 2,5 часа (30 минут)*; выдержка образцов при температуре минус $(50 \pm 5) ^\circ\text{C}$ – 2,5 часа (30 минут)*; подъем температуры до минус $10 ^\circ\text{C}$ – 1,5 часа (15 минут)*; оттаивание образцов в 5%-ном растворе NaCl с температурой $(18 \pm 2) ^\circ\text{C}$ – 2,5 часа (30 минут)* [8]
КС-1	Насыщение и высушивание образцов: насыщение образцов в насыщенном растворе NaCl с температурой $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ - 2 суток (16 часов)*; сушка образцов при температуре $(60 \pm 5) ^\circ\text{C}$ - 1 сутки (8 часов)* [74]
КС-2	Насыщение и высушивание образцов: насыщение образцов в насыщенном растворе NaCl с температурой $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ - 2 суток (16 часов); сушка образцов при температуре $(80 \pm 5) ^\circ\text{C}$ - 1 сутки (8 часов)* [85]

Промежутки времени для отбора и исследования образцов, выраженные в циклах замораживания и оттаивания, насыщения и высушивания, принимали на основании предварительного прогноза максимальной морозостойкости и коррозионной стойкости, а в особых случаях – проведением предварительных испытаний.

Для изучения морозостойкости и коррозионной стойкости бетонов на различных составах бетона, изготовленных в лабораторных условиях, использовали следующие материалы:

- в качестве вяжущего использовали те же, разновидности вяжущего, что использовали для изготовления образцов цементного камня (табл. 2.1 и 2.2);
- в качестве мелкого заполнителя применяли природный песок, отвечающий требованиям [113] карьера «Волма» с модулем крупности 2,65 и содержанием пылевидных, илистых и глинистых частиц 1,8 % по массе;
- крупным заполнителем служил гранитный щебень РУПП «Гранит» и гравий ОАО «Нерудпром», отвечающие требованиям [114] с наибольшей крупностью зерен до 20 мм, содержащие пылевидных, илистых и глинистых частиц соответственно 0,6 и 1,4 % по массе;
- для затворения бетонных смесей использовалась водопроводная вода, отвечающая требованиям [115].

Отдельные составы бетонных смесей изготавливали с химическими добавками, в качестве которых использовали ускоритель твердения, пластифицирующую и воздухововлекающую добавку, наиболее часто применяемые на заводах ЖБИ в Республике Беларусь. Характеристики применяемых добавок приведены в табл. 2.5.

Было подобрано 36 составов бетонных смесей, которые характеризовались различными водоцементными отношениями, расходом цемента, удобоукладываемостью, видом применяемого цемента и крупного заполнителя, наличием химических добавок (табл. 2.6 и 2.7).

Таблица 2.5

Характеристики химических добавок

Наименование	Обозначение	Назначение [116]	Концентрация рабочего раствора, %	Дозировка, % от массы цемента [117]
Сульфат натрия	СН	ускоритель твердения	10,0	0,8
Суперпластификатор С-3	С-3	пластификатор I группы	35,0	0,6
Смола нейтрализованная воздуховлекающая	СНВ	воздуховлекающая	2,0	0,015

Таблица 2.6

Составы бетонных смесей

Маркировка	Расход составляющих на 1 м ³ бетонной смеси, кг					Добавка, % от массы цемента		
	цемент	песок	щебень	гравий	вода	СН	С-3	СНВ
1-1	250	810	1160	-	160	-	-	-
1-2	250	810	1160	-	160	-	-	-
1-3	250	810	1160	-	160	-	-	-
1-4	250	810	1160	-	160	-	-	-
1-5	250	810	1160	-	160	-	-	-
1-6	250	800	-	1180	155	-	-	-
-7	250	810	1160	-	160	0,8	-	-
1-8	250	830	1165	-	135	-	0,6	-
1-9	250	820	1160	-	150	-	-	0,015
1-10	250	760	1250	-	140	-	-	-
1-11	250	840	1110	-	190	-	-	-
1-12	250	880	1060	-	205	-	-	-
2-1	350	740	1140	-	175	-	-	-
2-2	350	740	1140	-	175	-	-	-
2-3	350	740	1140	-	175	-	-	-
2-4	350	740	1140	-	175	-	-	-
2-5	350	740	1140	-	175	-	-	-
2-6	350	720	-	1160	170	-	-	-
2-7	350	740	1140	-	175	0,8	-	-
2-8	350	760	1150	-	150	-	0,6	-
2-9	350	750	1140	-	165	-	-	0,015
2-10	350	690	1200	-	140	-	-	-
2-11	350	760	1100	-	195	-	-	-
2-12	350	790	1080	-	210	-	-	-

Окончание табл. 2.6

3-1	450	690	1100	-	180	-	-	-
3-2	450	690	1100	-	185	-	-	-
3-3	450	690	1100	-	185	-	-	-
3-4	450	690	1100	-	185	-	-	-
3-5	450	690	1100	-	185	-	-	-
3-6	450	670	-	1130	180	-	-	-
3-7	450	690	1100	-	185	0,8	-	-
3-8	450	705	1110	-	165	-	0,6	-
3-9	450	700	1100	-	170	-	-	0,015
3-10	450	620	1180	-	160	-	-	-
3-11	450	710	1070	-	200	-	-	-
3-12	450	750	1040	-	220	-	-	-

Таблица 2.7

Характеристики бетонных смесей

Маркировка	Маркировка вяжущего (табл. 2.1)	Маркировка режимов твердения (табл. 2.3)	ОК, см (Ж, с)	Плотность бетонной смеси, кг/м ³
1	2	3	4	5
1-1	Ц-1	НВ	3,5	2360
1-2	Ц-2	НВ	3,5	2370
1-3	Ц-3	НВ	3,0	2370
1-4	Ц-1	С	3,5	2370
1-5	Ц-1	ТО	3,5	2370
1-6	Ц-1	НВ	3,0	2360
1-7	Ц-1	НВ	4,0	2370
1-8	Ц-1	НВ	2,0	2380
1-9	Ц-1	НВ	3,0	2340
1-10	Ц-1	НВ	(15)	2390
1-11	Ц-1	НВ	9,0	2360
1-12	Ц-1	НВ	13,0	2330
2-1	Ц-1	НВ	3,0	2380
2-2	Ц-2	НВ	3,0	2390
2-3	Ц-3	НВ	3,5	2390
2-4	Ц-1	С	3,0	2390
2-5	Ц-1	ТО	3,0	2390
2-6	Ц-1	НВ	2,5	2370
2-7	Ц-1	НВ	3,5	2390
2-8	Ц-1	НВ	3,0	2405
2-9	Ц-1	НВ	2,5	2360
2-10	Ц-1	НВ	(20)	2410
2-11	Ц-1	НВ	8,0	2370

Окончание табл. 2.7

2-12	Ц-1	НВ	16,0	2350
3-1	Ц-1	НВ	3,0	2405
3-2	Ц-2	НВ	2,5	2400
3-3	Ц-3	НВ	3,5	2410
3-4	Ц-1	С	2,5	2400
3-5	Ц-1	ТО	2,5	2400
3-6	Ц-1	НВ	3,0	2405
3-7	Ц-1	НВ	3,5	2405
3-8	Ц-1	НВ	3,0	2420
3-9	Ц-1	НВ	1,5	2380
3-10	Ц-1	НВ	(10)	2450
3-11	Ц-1	НВ	7,0	2410
3-12	Ц-1	НВ	13,0	2380

К испытанию образцов приступали не ранее 28 суток с момента изготовления. Количество образцов для проведения испытаний принималось согласно ТНПА на методы испытаний [8,11]. Для определения значений степени гидратации цемента в бетоне, средней плотности бетона, показателя среднего размера капиллярных пор и прочности на сжатие бетона использовали методики, принятые для цементного камня. Режимы испытаний бетонных образцов приведены в табл. 2.4.

Бетонную смесь для изготовления образцов приготавливали в лабораторной бетономешалке. Удобоукладываемость бетонных смесей и фактическую плотность определяли по методике [119]. Образцы (размером 100x100x100 мм) формовали с использованием лабораторной виброплощадки. Для твердения бетонных образцов были приняты три режима, которые использовали для твердения цементного камня (табл. 2.3).

В качестве критерия достоверности, полученных результатов был принят коэффициент вариации, как достаточно объективная, на наш взгляд характеристика, широко применяемая в технологии бетона.

При количестве единичных значений (n) в опыте менее 7 коэффициент вариации определяли по формуле [119, 120]

$$V = \frac{x}{i_{\max}^d \cdot i_{\min}^d} \cdot 100, \% \quad (2.3)$$

где x_i^{\max} – максимальное значение показателя (степень гидратации цемента, прочность цементного камня или бетона и т.п.) в опыте;

x_i^{\min} – минимальное значение показателя в опыте;

d – коэффициент, принимаемый по табл. 2.8 [120] в зависимости от числа единичных значений в опыте.

Таблица 2.8

Величина коэффициента d

Число единичных значений	2	3	4	5	6
Значение коэффициента d	1,13	1,69	2,06	2,33	2,50

Если же число единичных значений (n) равно 7 и более, то вначале рассчитывали среднее значение оцениваемого показателя:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (2.4)$$

затем среднее квадратичное отклонение:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}, \quad (2.5)$$

и, наконец, коэффициент вариации

$$V_x = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100, \%. \quad (2.6)$$

Количество параллельных определений массы химически связанной воды составляло не менее 3 [100]. Результат определения химически связанной воды считался достоверным, если значение коэффициента вариации не превышало 5,0 %. Величина коэффициента вариации 5,0 % была принята исходя из обработки результатов предварительных опытов для обеспечения надежности 95 % при малом количестве образцов в серии.

Результаты определения показателя среднего размера капиллярных пор и прочности на сжатие в серии из 3 образцов контрольных образцов перед циклическими испытаниями (контрольных), а также образцов, подвергаемых циклическим испытаниям (основных) считались достоверными, если коэффициент вариации не превышал

соответственно: 5 % – при определении показателя среднего размера капиллярных пор; 8% – при определении прочности и на сжатие.

Величина коэффициента вариации 5,0 % и 8,0 % была принята исходя из обработки результатов предварительных опытов для обеспечения надежности 95 % и 90 % соответственно при малом количестве образцов в серии.

Оценку достоверности модели расчета морозостойкости или коррозионной стойкости проводили сравнением фактических результатов показателя (x_i^ϕ), полученными экспериментально, либо заимствованными из литературных источников [99, 121], либо рассчитанным по методикам [20, 31, 32, 52, 134] с рассчитанными по разработанной модели (x_i^p). Среднее квадратичное отклонение рассчитывали по формуле

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i^\phi - x_i^p)}{n-1}, \quad (2.7)$$

А коэффициент вариации определяли по формуле

$$V_x = \frac{S}{\bar{x}^\phi} \cdot 100, \%. \quad (2.8)$$

За допустимое значения коэффициента вариации (критерий достоверности) можно принять величину относительной погрешности определения прочности бетона неразрушающими методами [122], которая должна составлять не более 12 % при определении прочности серии образцов и 15 % для отдельных образцов. Так, допустимое значение коэффициента вариации 12 % может быть принято при оценке достоверности расчета морозостойкости и коррозионной стойкости по собственным экспериментальным данным, а 15 % – по данным принятым из других источников.

2.2. Влияние вида вяжущего, водоцементного отношения и условий твердения на структурно-механические характеристики цементного камня

В соответствии методикой исследований изучение влияния циклического замораживания и оттаивания начинали с определения влияния технологических факторов на структурно-механические характеристики контрольных образцов цементного камня. Структурно-механические характеристики определяли для образцов, возраст которых составлял 28 суток. Результаты испытаний приведены в табл. 2.9.

Таблица 2.9

Результаты определения структурно-механических характеристик образцов цементного камня

Характеристика	Значение характеристики при В/Ц					V, %
	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	
1	2	3	4	5	6	7
Вяжущее – Ц-1(условия твердения НВ)						
Степень гидратации (α), %	44,9	55,7	65,8	74,6	87,2	3,8–4,6
Средняя плотность образцов (ρ_0), кг/м ³	2021	1813	1618	1425	1303	1,8–2,2
Истинная плотность образцов (ρ), кг/м ³	2796	2722	2659	2608	2539	1,5–3,0
Полный объем пор по объему (Π_n), %	27,7	33,4	39,2	45,4	48,7	1,9–3,9
Водопоглощение по массе (W_m), %	4,8	7,4	10,8	15,8	18,7	
Водопоглощение по объему (W_o), %	9,7	13,3	17,5	22,6	24,4	2,8–5,0
Показатель среднего размера открытых капиллярных пор (λ)	0,50	0,60	0,80	1,10	1,20	
Прочность на сжатие (f), МПа	83,3	66,7	52,3	39,1	33,0	3,5–6,6

Продолжение табл. 2.9

1	2	3	4	5	6	7
Вязущее – Ц-2 (условия твердения НВ)						
Степень гидратации (α), %	47,6	58,8	69,0	77,4	87,5	3,3–4,5
Средняя плотность образцов (ρ_0), кг/м ³	1985	1778	1584	1395	1281	0,9–2,7
Истинная плотность образцов (ρ), кг/м ³	2760	2692	2631	2582	2513	1,3–3,5
Полный объем пор по объему (Π_n), %	28,1	33,9	39,8	46,0	49,1	1,6–4,9
Водопоглощение по массе (W_m), %	5,2	8,0	11,7	16,9	19,6	1,7–4,2
Водопоглощение по объему (W_o), %	10,4	14,2	18,5	23,6	25,1	3,9–4,1
Показатель среднего размера открытых капиллярных пор (λ)	0,55	0,65	0,85	1,15	1,25	1,5–4,8
Прочность на сжатие (f), МПа	82,0	65,3	50,8	37,9	32,4	4,8–7,6
Вязущее – Ц-3 (условия твердения НВ)						
Степень гидратации (α), %	41,9	52,0	61,4	69,8	83,7	3,7–4,9
Средняя плотность образцов (ρ_0), кг/м ³	1908	1712	1528	1349	1254	0,3–4,7
Истинная плотность образцов (ρ), кг/м ³	2645	2585	2533	2490	2423	1,2–3,4
Полный объем пор по объему (Π_n), %	27,9	33,8	39,7	45,8	48,2	3,0–4,4
Водопоглощение по массе (W_m), %	5,6	8,6	12,5	17,9	19,8	
Водопоглощение по объему (W_o), %	10,7	14,7	19,0	24,1	24,8	1,3–3,8
Показатель среднего размера открытых капиллярных пор (λ)	0,55	0,70	0,90	1,20	1,30	
Прочность на сжатие (f), МПа	72,8	55,7	41,1	28,2	23,8	5,8–7,9

Продолжение табл. 2.9

1	2	3	4	5	6	7
Вязущее – Ц-1 (условия твердения С)						
Степень гидратации (α), %	43,6	53,4	62,1	69,5	80,1	2,1–4,7
Средняя плотность образцов (ρ_0), кг/м ³	2004	1780	1566	1351	1203	1,0–2,2
Истинная плотность образцов (ρ), кг/м ³	2804	2738	2681	2638	2577	1,7–2,5
Полный объем пор по объему (Π_n), %	28,5	34,9	41,6	48,8	53,3	2,6–4,5
Водопоглощение по массе (W_m), %	5,4	8,6	13,1	19,9	25,2	3,1–4,8
Водопоглощение по объему (W_o), %	10,7	15,3	20,6	26,9	30,3	3,9–4,7
Показатель среднего размера открытых капиллярных пор (λ)	0,55	0,70	0,95	1,40	1,65	
Прочность на сжатие (f), МПа	80,7	62,6	46,8	32,8	25,6	4,8–6,9
Вязущее – Ц-2 (условия твердения С)						
Степень гидратации (α), %	47,6	58,8	69,0	77,4	87,5	2,8–4,1
Средняя плотность образцов (ρ_0), кг/м ³	1985	1778	1584	1395	1281	0,9–3,4
Истинная плотность образцов (ρ), кг/м ³	2760	2692	2631	2582	2513	0,9–4,0
Полный объем пор по объему (Π_n), %	28,1	33,9	39,8	46,0	49,1	3,7–5,0
Водопоглощение по массе (W_m), %	5,2	8,0	11,7	16,9	19,6	3,2–4,4
Водопоглощение по объему (W_o), %	10,4	14,2	18,5	23,6	25,1	1,6–3,7
Показатель среднего размера открытых капиллярных пор (λ)	0,55	0,65	0,85	1,15	1,25	
Прочность на сжатие (f), МПа	82,0	65,3	50,8	37,9	32,4	4,8–5,2

Продолжение табл. 2.9

1	2	3	4	5	6	7
Вязущее – Ц-3 (условия твердения С)						
Степень гидратации (α), %	41,9	52,0	61,4	69,8	83,7	1,1–3,6
Средняя плотность образцов (ρ_0), кг/м ³	1908	1712	1528	1349	1254	0,9–2,7
Истинная плотность образцов (ρ), кг/м ³	2645	2585	2533	2490	2423	1,1–3,9
Полный объем пор по объему (Π_n), %	27,9	33,8	39,7	45,8	48,2	2,8–5,0
Водопоглощение по массе (W_m), %	5,6	8,6	12,5	17,9	19,8	
Водопоглощение по объему (W_o), %	10,7	14,7	19,0	24,1	24,8	3,9–4,1
Показатель среднего размера открытых капиллярных пор (λ)	0,55	0,70	0,90	1,20	1,30	
Прочность на сжатие (f), МПа	72,8	55,7	41,1	28,2	23,8	4,2–6,4
Вязущее – Ц-1 (условия твердения ТО)						
Степень гидратации (α), %	45,6	56,7	67,2	76,4	89,7	1,8–3,3
Средняя плотность образцов (ρ_0), кг/м ³	2012	1794	1586	1378	1240	1,0–1,9
Истинная плотность образцов (ρ), кг/м ³	2800	2731	2673	2627	2563	1,3–2,1
Полный объем пор по объему (Π_n), %	28,1	34,3	40,7	47,5	51,6	4,4–4,9
Водопоглощение по массе (W_m), %	5,1	8,1	12,2	18,3	22,7	
Водопоглощение по объему (W_o), %	10,2	14,5	19,4	25,3	28,2	3,3–4,9
Показатель среднего размера открытых капиллярных пор (λ)	0,60	0,80	1,00	1,35	1,55	
Прочность на сжатие (f), МПа	84,7	68,5	54,4	41,5	35,8	4,3–7,2

Окончание табл. 2.9

1	2	3	4	5	6	7
Вязущее – Ц-2 (условия твердения ТО)						
Степень гидратации (α), %	48,8	60,6	71,3	80,2	91,1	3,2–4,0
Средняя плотность образцов (ρ_0), кг/м ³	1981	1765	1560	1356	1226	1,1–2,8
Истинная плотность образцов (ρ), кг/м ³	2763	2697	2642	2597	2534	1,4–3,2
Полный объем пор по объему (Π_n), %	28,3	34,6	41,0	47,8	51,6	2,5–4,3
Водопоглощение по массе (W_m), %	5,4	8,5	12,8	19,1	23,2	
Водопоглощение по объему (W_o), %	10,6	15,0	20,0	25,9	28,4	2,9–4,8
Показатель среднего размера открытых капиллярных пор (λ)	0,75	0,80	1,15	1,35	1,65	
Прочность на сжатие (f), МПа	83,4	66,6	51,2	38,6	33,2	2,0–6,5
Вязущее – Ц-3 (условия твердения ТО)						
Степень гидратации (α), %	42,8	53,2	62,9	71,6	85,9	2,5–4,1
Средняя плотность образцов (ρ_0), кг/м ³	1920	1727	1547	1372	1281	1,3–3,7
Истинная плотность образцов (ρ), кг/м ³	2640	2578	2525	2480	2412	1,2–3,5
Полный объем пор по объему (Π_n), %	27,3	33,0	38,7	44,6	47,9	1,5–4,3
Водопоглощение по массе (W_m), %	5,2	7,9	11,5	16,5	18,0	
Водопоглощение по объему (W_o), %	9,9	13,7	17,9	22,7	23,0	2,6–4,6
Показатель среднего размера открытых капиллярных пор (λ)	0,60	0,75	1,00	1,30	1,50	
Прочность на сжатие (f), МПа	74,6	57,7	43,3	30,4	26,2	3,5–5,9

Анализ экспериментальных данных приведенных в табл. 2.9 показывает следующее.

Водоцементное отношения цементного теста. Повышение начального водоцементного отношения приводит к закономерному увеличению степени гидратации вяжущего, что подтверждает полученные другими авторами данные [7, 12, 123–126]. Минимальное значение степени гидратации имеют образцы, изготовленные из цементного теста с водоцементным отношением 0,20, максимальное – с В/Ц = 0,40. С повышением В/Ц увеличивается полный объем пор и объем открытых капиллярных пор. Показатель среднего размера капиллярных пор (λ) также зависит от водоцементного отношения [123, 124]. Минимальным значением λ характеризуются образцы с В/Ц = 0,2, максимальным – с В/Ц = 0,4. Увеличение водоцементного отношения приводит к закономерному снижению прочности на сжатие образцов цементного камня [123, 124, 126].

Условия твердения. Характер влияния водоцементного отношения на степень гидратации, структурные и прочностные характеристики цементного камня в данном случае остается неизменным. Однако образцы, твердевшие в сухих условиях, имеют более низкие значения степени гидратации, чем образцы нормально-влажных условий твердения и твердеющие при тепловой обработке. Максимальные значения степени гидратации имеют образцы после тепловой обработки. Условия твердения также сказываются на структурных характеристиках образцов. Так, твердение образцов в сухих условиях и при тепловой обработке для вяжущих Ц-1 и Ц-2 приводит к увеличению общего объема пор и открытой капиллярной пористости по сравнению с образцами нормально-влажного твердения [123, 124, 126, 127]. Тепловая обработка образцов, изготовленных на вяжущем Ц-3 приводит к снижению общего объема пор и объема открытых капиллярных пор [127]. Изменение влажности и температуры твердения образцов влияет на показатель среднего размера открытых капиллярных пор. Снижение влажности при твердении образцов в сухих условиях приводит к снижению степени гидратации и, следовательно, к увеличению среднего размера капиллярных пор [123, 124, 126, 127]. Повышение температуры твердения, несмотря на повышение степени гидратации, также приводит к увеличению среднего размера открытых капиллярных пор [127]. Прочность на сжатие образцов цементного камня также

зависит от условий твердения. Максимальными значениями прочности характеризуются образцы, твердевшие в условиях тепловой обработки, минимальными – в сухих условиях.

Вид вяжущего. Из трех разновидностей вяжущего самые низкими значениями степени гидратации характеризуются образцы, изготовленные на шлакопортландцементе. Высокие значения степени гидратации получены на образцах, изготовленных на вяжущем Ц-2. Вид вяжущего оказывает влияние и на структурные характеристики цементного камня. Например, образцы, изготовленные на вяжущем Ц-1, характеризуются более низкими значениями полного объема пор и объема открытых капиллярных пор, хотя и имеют значение степени гидратации ниже, чем образцы на вяжущем Ц-2. Максимальными значениями полного объема пор и объема открытых капиллярных пор характеризуются образцы, изготовленные на вяжущем Ц-3, что подтверждается данными по степени гидратации. Установленный характер влияния вида вяжущего на значение объема открытых капиллярных пор подтверждаются данными по изменению показателя среднего размера капиллярных пор. При увеличении значений W_0 закономерно повышаются значения λ . Прочность на сжатие образцов цементного камня для различных видов вяжущего, определяется в первую очередь активностью самого вяжущего. Максимальными значениями прочности на сжатие, при прочих равных условиях, характеризуются образцы, изготовленные на вяжущем Ц-1, минимальными - на вяжущем Ц-3.

2.3. Влияние замораживания и оттаивания на кинетику изменения структурно-механических характеристик цементного камня

Изучение влияния циклических воздействий на кинетику изменения структурно-механических характеристик цементного камня начинали с испытаний образцов по стандартному режиму F-1 замораживанием и оттаиванием образцов в воде. Кинетику изменения структурно-механических характеристик исследуемого материала, оценивали по изменению относительных показателей

$$k_\alpha = \frac{a_n}{a_0}, k_\lambda = \frac{\lambda_n}{\lambda_0}, k_f = \frac{f_n}{f_0}, \quad (2.9)$$

где k_α , k_λ , k_f – соответственно относительный показатель степени гидратации, среднего размера капиллярных пор и прочности на сжатие цементного камня;

α_n , λ_n , f_n – соответственно степень гидратации, показатель среднего размера капиллярных пор и прочность на сжатие образцов цементного камня к определенному количеству циклов замораживания и оттаивания n ;

α_0 , λ_0 , f_0 – соответственно степень гидратации, показатель среднего размера капиллярных пор и прочность на сжатие образцов цементного камня перед началом замораживания и оттаивания (табл. 2.9).

Анализ экспериментальных данных.

Показатель степени гидратации k_α , (рис. 2.1). Характер изменения степени гидратации при циклическом замораживании и оттаивании происходит по определенному закону, а именно: с увеличением количества циклов (n) степень гидратации повышается, достигая максимального значения. Количественное значение предельного уровня определяется начальным значением водоцементного отношения и степени гидратации, условиями твердения образцов и видом вяжущего.

С повышением водоцементного отношения максимальное значение показателя k_α снижается. При прочих равных условиях максимальными значениями k_α характеризуются образцы с В/Ц = 0,2; минимальными – с В/Ц = 0,4. Характер влияния начальной степени гидратации α_0 на значение показателя k_α , аналогичен влиянию водоцементного отношения, т.е. с увеличением начальной степени гидратации α_0 значение k_α , при прочих равных условиях снижается. Влияние условий твердения образцов на значение k_α определяется их влиянием на начальную степень гидратации α_0 . Максимальное значение k_α при циклическом замораживании и оттаивании имеют образцы, твердевшие в сухих условия, а минимальное – при тепловой обработке. Вид вяжущего, неоднозначно влияет на значение k_α . Образцы, изготовленные на вяжущем Ц-2, имеют более высокие значения k_α , хотя начальная степень гидратации у них выше, чем у образцов на вяжущем Ц-1. Последнее можно объяснить влиянием структурных характеристик, а именно: объем открытых капиллярных пор W_0 цементного камня, изготовленного на вяжущем Ц-2, при прочих равных условиях выше, чем на вяжущем Ц-1, следовательно

но, создаются благоприятные условия для более полного протекания процессов гидратации при оттаивании образцов.

Скорость изменения k_α (угол наклона кривых) зависит от значения объема открытых капиллярных пор W_0 и показателя среднего размера пор λ_0 . Скорость изменения k_α увеличивается при повышении водопоглощения образцов W_0 .

Показатель среднего размера открытых капиллярных пор k_λ (рис. 2.2). Кривые изменения показателя k_λ при циклическом замораживании и оттаивании, построенные по экспериментальным данным, подтверждают ранее полученные результаты по изменению степени гидратации k_α . Характер кривых свидетельствует о протекании «конструктивного» процесса при циклическом замораживании и оттаивании. Начиная с первых циклов, за счет продолжающейся гидратации вяжущего, происходит изменение структуры – показатель k_λ снижается, достигая минимального значения. Минимальное значение k_λ , которое может быть достигнуто при замораживании и оттаивании, зависит от значения k_α , – чем оно выше, тем ниже при прочих равных условиях значение k_λ . Характер изменения k_λ определяется теми же факторами, что и изменение k_α при циклическом замораживании и оттаивании. Минимальными значениями k_λ характеризуются образцы с В/Ц = 0,2, максимальными – с В/Ц = 0,4. При снижении начальной степени гидратации α_0 значение k_λ уменьшается. Минимальные значения k_λ имеют образцы нормально-влажностного твердения, максимальные – твердевшие в условиях тепловой обработки. Для образцов сухих условий твердения значения k_λ оказываются выше, чем для образцов нормально-влажностного твердения, хотя начальная степень гидратации α_0 ниже и k_α при циклических воздействиях имеет более высокие значения. Это объясняется влиянием начального значения среднего размера капиллярных пор λ_0 . Образцы, твердеющие при низкой влажности, при прочих равных условиях характеризуются более высокими начальными значениями λ_0 .

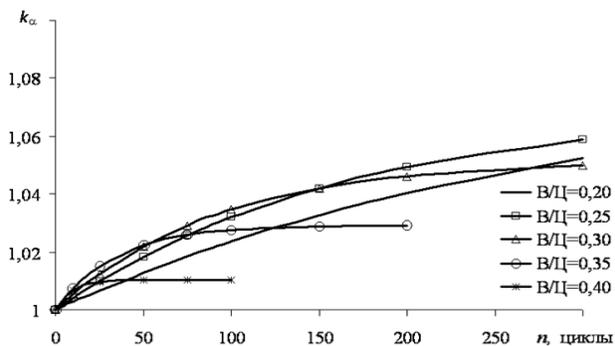
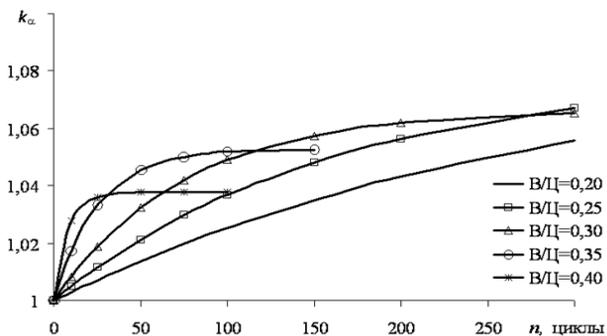
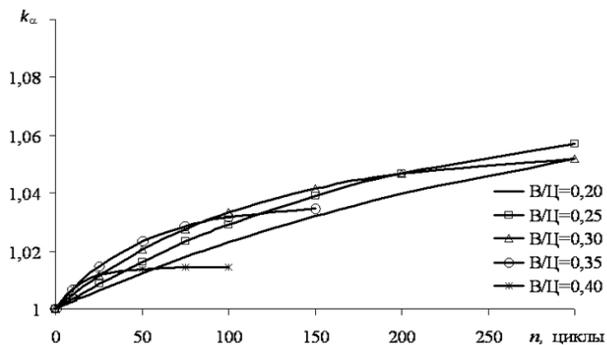


Рис. 2.1. Изменение относительного показателя степени гидратации цемента при циклическом замораживании и оттаивании по режиму F-1 образцов цементного камня, твердевшего в нормально-влажностных, сухих условиях и условиях тепловой обработки

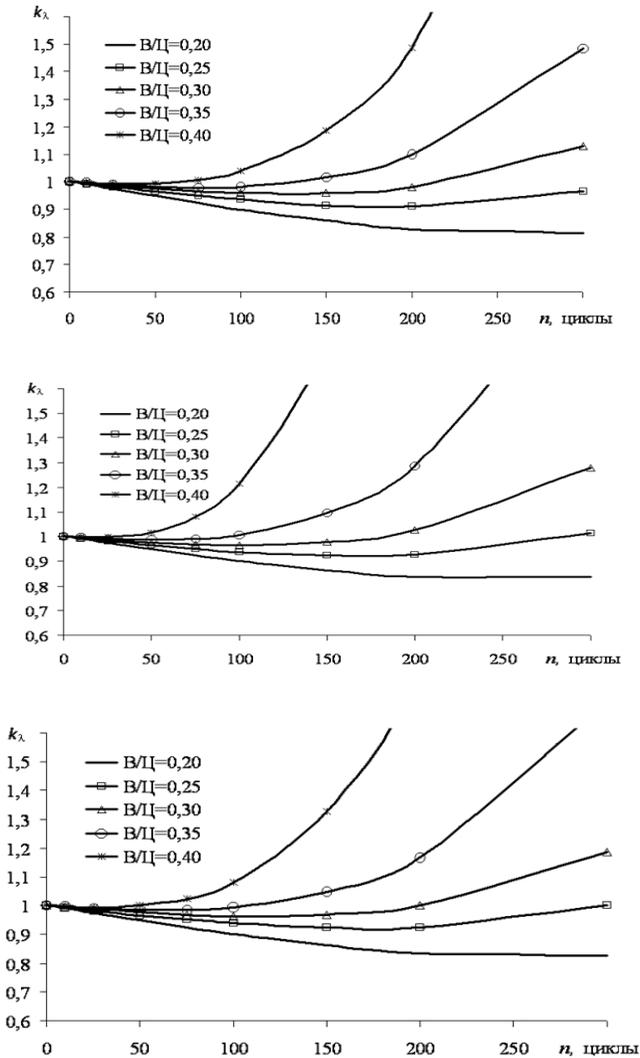


Рис. 2.2. Изменение относительного показателя среднего размера капиллярных пор при циклическом замораживании оттаивании по режиму F-1 образцов цементного камня, полученного из вяжущего Ц-1 и твердевшего в нормально-влажностных, сухих условиях и условиях тепловой обработки

Скорость изменения показателя k_λ зависит от значений λ_0 и W_0 . Чем ниже при прочих равных условиях значения λ_0 и W_0 , тем выше скорость изменения показателя k_λ при циклическом замораживании и оттаивании.

Показатель прочности на сжатие k_f (рис. 2.3). Характер изменения прочности на сжатие образцов цементного камня k_f при циклическом замораживании и оттаивании согласуется с данными по изменению степени гидратации k_α и среднего размера открытых капиллярных пор k_λ . При снижении значений k_λ прочность на сжатие образцов k_f закономерно увеличивается. Характер кривых изменения k_f определяется характером изменения k_α и k_λ . Увеличение k_f происходит параллельно с ростом k_α и снижением показателя k_λ . Количество циклов, когда достигается максимальное значение k_f совпадает с количеством циклов необходимых для достижения максимального значения k_α и минимального значения k_λ .

Характер изменения k_f при циклическом замораживании и оттаивании зависит от тех же факторов, что оказывают влияние на характер изменения значений k_α и k_λ , а именно от: начального водоцементного отношения, начальной степени гидратации α_0 , условий твердения и вида вяжущего.

С повышением водоцементного отношения количество циклов, когда наблюдается рост прочности цементного камня (k_f) – снижается.

Для некоторых образцов, например, сухого режима твердения с В/Ц = 0,4, изготовленных на вяжущем Ц-2 и Ц-3, увеличение прочности (k_f) вообще не обнаружено. Максимальную величину прироста прочности (k_f) имеют образцы из цементного теста с В/Ц = 0,2. Условия твердения образцов неоднозначно влияют на характер изменения k_f . Так, для образцов сухих условий твердения установлены максимальные значения k_α , в то время, как k_f имеет более низкие значения по сравнению с образцами нормально-влажностного твердения и после тепловой обработки.

Объясняется это влиянием капиллярной пористости, а именно: образцы, твердевшие в сухих условиях, характеризуются более высокими значениями капиллярной пористости, что приводит к изменению соотношения между «конструктивными» и «деструктивными» процессами при замораживании и оттаивании в сторону превалирования «деструктивных» процессов.

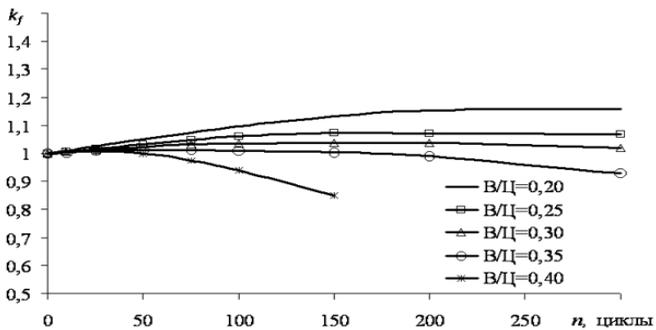
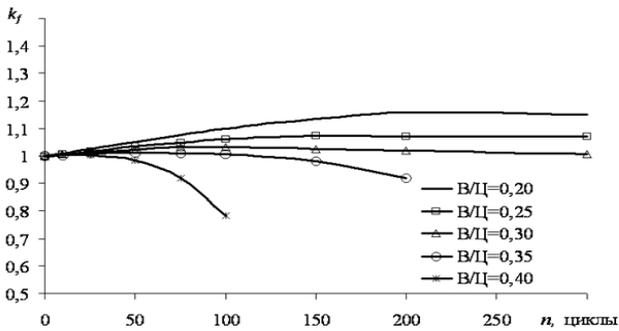
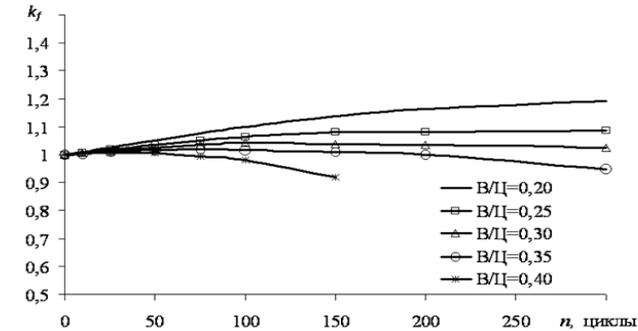


Рис. 2.3. Изменение относительного показателя прочности на сжатие при циклическом замораживании оттаивании по режиму F-1 образцов цементного камня, полученного из вяжущего Ц-1 и твердевшего в нормально-влажностных, сухих условиях и условиях тепловой обработки

Характер влияния вида вяжущего на k_f аналогичен влиянию на k_α при циклическом замораживании и оттаивании. При прочих равных условиях более высокие значения k_f имеют образцы, изготовленные на вяжущем Ц-1, а более низкие – на вяжущем Ц-2.

Из анализа полученных данных следует, что при циклическом замораживании и оттаивании параллельно протекают два процесса «конструктивный» и «деструктивный». Циклическое замораживание и оттаивание образцов приводит к изменению степени гидратации вяжущего, среднего размера капиллярных пор и прочности на сжатие цементного камня. Существует связь между изменением прочности на сжатие и характером изменения степени гидратации и структурных характеристик цементного камня (λ , W_0). При прочих равных условиях, чем сильнее циклическое замораживание и оттаивание влияет на изменение степени гидратации и структуры цементного камня, тем больше это сказывается на характере изменения прочности, а, следовательно, на морозостойкости. Установлено, что продолжительность «конструктивного» периода, выраженного в стандартных циклах замораживания и оттаивания зависит от начального значения степени гидратации α_0 и объема открытых капиллярных пор W_0 , которые в свою очередь зависят от водоцементного отношения, условий твердения и вида вяжущего. Чем выше, при прочих равных условиях, значение начальной степени гидратации α_0 и объема открытых капиллярных пор W_0 , тем меньше количество циклов, при которых наблюдается рост прочности образцов при циклическом замораживании и оттаивании.

При дальнейших исследованиях представляет интерес выяснить, в как будет влиять режим испытаний образцов на продолжительность «конструктивного» периода, т.е. периода, когда наблюдается рост прочности цементного камня при замораживании и оттаивании. Для оценки продолжительности «конструктивного» периода и его влияния на морозостойкость цементного камня воспользуемся отношением n_0/F , где n_0 – количество положительно влияющих циклов; F – морозостойкость цементного камня. На рис. 2.4. представлена графическая зависимость $n_0/F = f\left(\frac{B}{Ц}\right)$ для двух режимов испытаний образцов, изготовленных из вяжущего Ц-1.

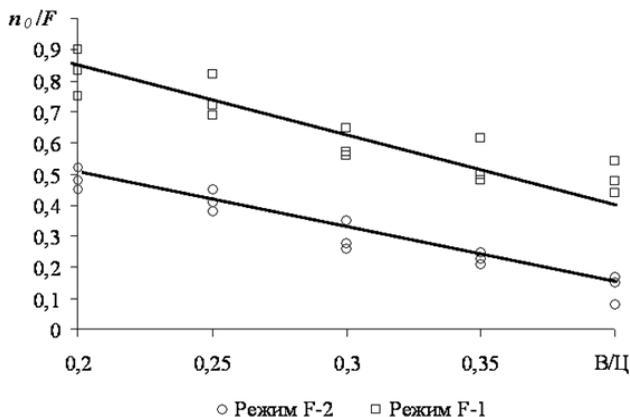


Рис. 2.4. Влияние режима испытаний образцов на характер зависимости $n_0/F = f(В/Ц)$

Из характера графических зависимостей, построенных по экспериментальным точкам (рис. 2.4), следует, что при увеличении водоцементного отношения, независимо от режима испытаний образцов, отношение n_0/F уменьшается, что говорит о снижении количества положительно влияющих циклов и их влияния на конечную морозостойкость цементного камня. При изменении режима испытаний образцов (F-2) характер зависимости $n_0/F = f(В/Ц)$ практически не изменяется, но значение отношения n_0/F становится ниже, чем для режима F-1. Это свидетельствует о том, что ужесточение режима испытаний образцов приводит к снижению количества положительно влияющих циклов и уменьшению их влияния на конечную морозостойкость цементного камня, т. е. изменяется соотношение между «конструктивным» и «деструктивным» процессами, в сторону увеличения доли последних.

2.4. Влияние циклического насыщения и высушивания на кинетику изменения структурно-механических характеристик цементного камня

Изучение влияния циклического насыщения и высушивания на кинетику изменения структурно-механических характеристик цементного камня начинали с испытаний образцов по режиму КС-1. Кинетику изменения структурно-механических характеристик исследуемого материала, оценивали по относительным показателям. За характеристики контрольных образцов были приняты данные, приведенные в табл. 2.9.

Анализ экспериментальных данных.

Степень гидратации k_α (рис. 2.5). Изменение степени гидратации k_α при циклическом насыщении и высушивании, как и при замораживании и оттаивании происходит по определенному закону, а именно: с увеличением количества циклов (n) степень гидратации k_α повышается, стремясь к максимальному значению. Количественное значение k_α по аналогии с замораживанием и оттаиванием зависит от начального водоцементного отношения, степени гидратации α , условий твердения и вида вяжущего. Значение k_α для образцов при циклическом насыщении и высушивании значительно ниже значений, полученных при замораживании и оттаивании. В работах [74, 78] это связывают с влиянием на кинетику протекания процессов гидратации отложения и кристаллизации солей в поровой структуре. Условия твердения и вид вяжущего также оказывают влияние на характер изменения степени гидратации k_α при циклическом насыщении и высушивании. Механизм влияния вида вяжущего и условий твердения на характер изменения степени гидратации аналогичен данным, полученным при замораживании и оттаивании.

Скорость изменения k_α при насыщении и высушивании образцов отличается от скорости изменения показателя k_α при замораживании и оттаивании. Насыщение и высушивание образцов в насыщенном растворе соли снижает скорость изменения k_α . Это влияние особенно заметно для образцов с водоцементным отношением более 0,3.

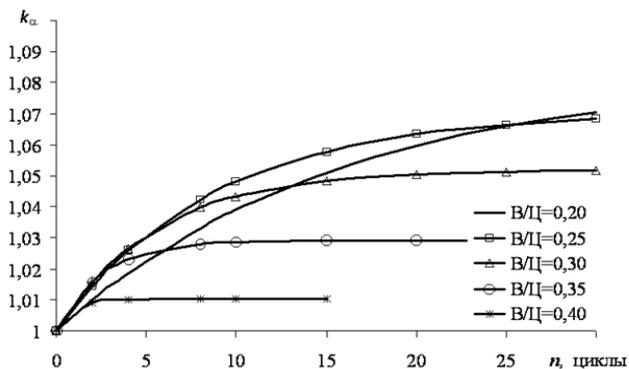
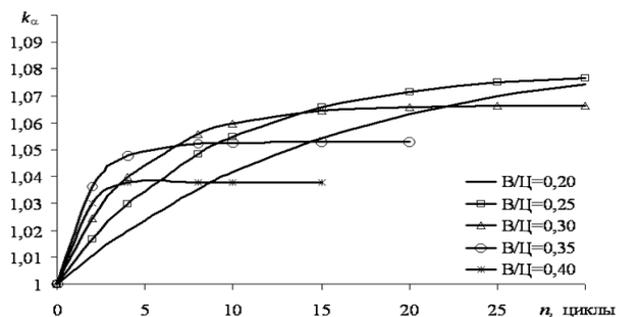
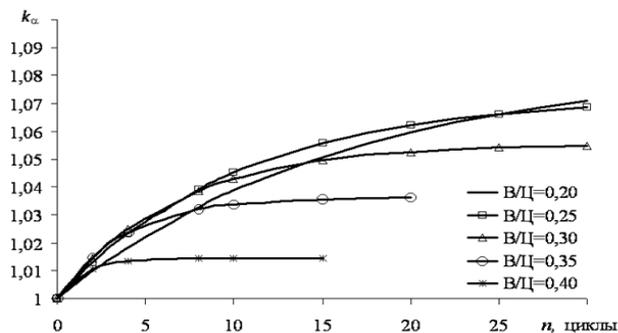


Рис. 2.5. Изменение относительного показателя степени гидратации вяжущего Ц-1 при циклическом насыщении и высушивании по режиму КС-1 образцов цементного камня, твердевшего в нормально-влажных, сухих условиях и условиях тепловой обработки

Показатель среднего размера открытых капиллярных пор k_λ (рис. 2.6). Сравнение характера изменения показателя k_λ при насыщении и высушивании образцов с характером изменения k_λ при замораживании и оттаивании показало существенные отличия. При циклическом насыщении и высушивании показатель k_λ с первых циклов начинает интенсивно снижаться, при чем скорость это процесса определяется водоцементным отношением.

С повышением В/Ц значение k_λ снижается более интенсивно. Это подтверждает, что в структуре цементного камня происходит накопление и кристаллизация солей [81, 82, 86].

Интенсивность этого процесса определяется, прежде всего, величиной открытой капиллярной пористости W_0 [74–76, 81, 82, 85, 96, 99].

Характер изменения значений k_λ позволяет судить не столько о влиянии «конструктивных» процессов, отнесенных к гидратации вяжущего, сколько о влиянии механизма соленакопления и кристаллизации на структуру цементного камня. Однако все же существует связь между изменением k_α и k_λ . Снижение значений k_λ наблюдается приблизительно до момента, когда величина k_α достигает максимального значения. Характер изменения k_λ также зависит от начального значения степени гидратации α_0 . Чем выше, при прочих равных условиях, значение α_0 , тем интенсивнее происходит снижение показателя k_λ . Условия твердения образцов и вид вяжущего тоже оказывают влияние на характер изменения значений k_λ . Так, наибольшее влияние циклическое насыщение и высушивание оказывает на образцы нормально-влажностного твердения, наименьшее – на образцы сухих условий твердения. В работе [74, 78] это связывают с влиянием объема и размера капиллярных пор, значения которых, в свою очередь, зависят от условий твердения. Образцы нормально-влажностного режима твердения характеризуются меньшими значениями объема и размера капиллярных пор, чем образцы сухого режима твердения, и, следовательно, соленакопление и кристаллизация солей в структуре образцов нормально-влажностного твердения более существенно влияет на изменение значений k_λ [74, 78].

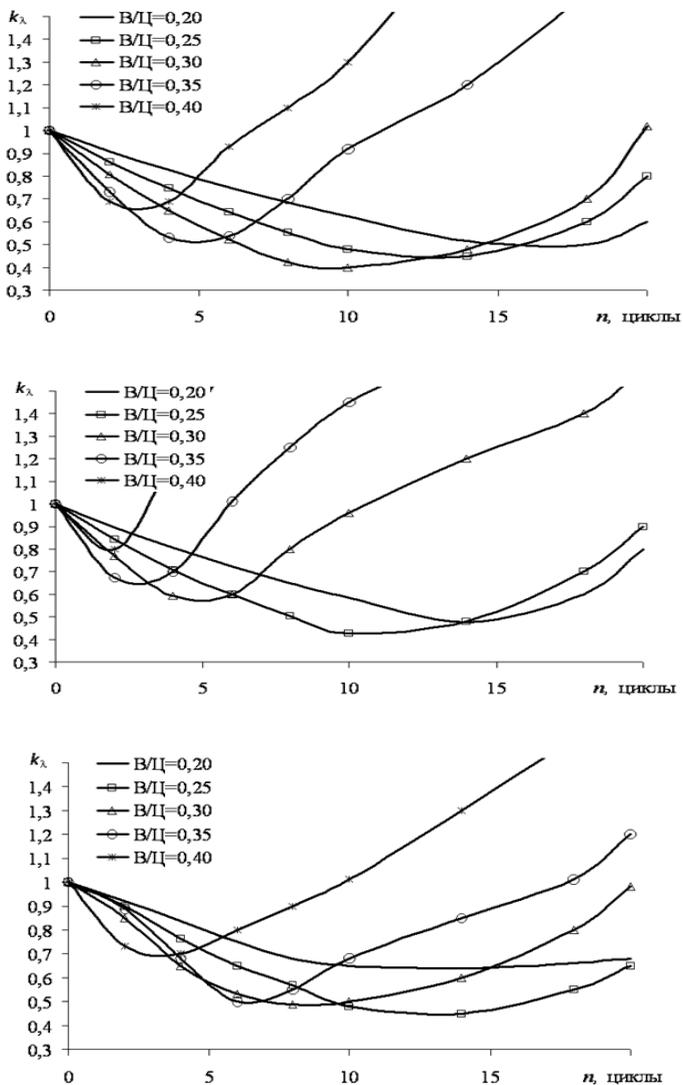


Рис. 2.6. Изменение относительного показателя среднего размера капиллярных пор при циклическом насыщении и высушивании по режиму КС-1 образцов цементного камня, полученного из вяжущего Ц-1 и твердевшего в нормально-влажностных, сухих условиях и условиях тепловой обработки

Влияние вида вяжущего на изменение значений k_λ также связано с изменением объема и размера капиллярных пор.

Прочность на сжатие k_f (рис. 2.7). Характер изменения прочности на сжатие образцов цементного камня k_f при циклическом насыщении и высушивании определяется характером изменения показателя k_λ . При снижении значений k_λ прочность на сжатие образцов k_f увеличивается и тем быстрее, чем выше скорость снижения k_λ . Сравнение характера изменения прочности и максимальных значений k_f при насыщении и высушивании со значениями при замораживании и оттаивании показало, что насыщение и высушивание приводят к более интенсивному росту прочности. Высокая скорость изменения прочности ведет к повышению максимальных значений k_f .

Рост прочности цементного камня происходит практически до момента достижения максимального значения k_α и совпадает с точкой перелома на кривых $k_\lambda = f(n)$. В отличие от циклического замораживания и оттаивания при насыщении и высушивании образцов значение прироста прочности увеличивается с повышением водоцементного отношения с 0,2 до 0,3.

Максимальную величину прироста прочности k_f имеют образцы из цементного теста с В/Ц = 0,3. Минимальное значение прироста характерно для образцов с В/Ц = 0,2. Увеличение водоцементного отношения более 0,3 приводит к снижению значений прироста прочности и уменьшению количества положительно влияющих циклов. Условия твердения образцов также влияют на характер изменения прочности. Так, для образцов нормально-влажностных условий твердения установлены максимальные приросты в прочности, а минимальные для образцов, твердевших в сухих условиях. Но в отличие от циклического замораживания и оттаивания, максимальный прирост прочности при циклическом насыщении и высушивании не характеризует более высокую коррозионную стойкость материала. Высокой коррозионной стойкостью (количеством циклов насыщения и высушивания до потери прочности 15 %) характеризовались при прочих равных условиях образцы, твердевшие при тепловой обработке, хотя прирост в прочности был ниже, чем для образцов, твердевших в нормально-влажностных условиях.

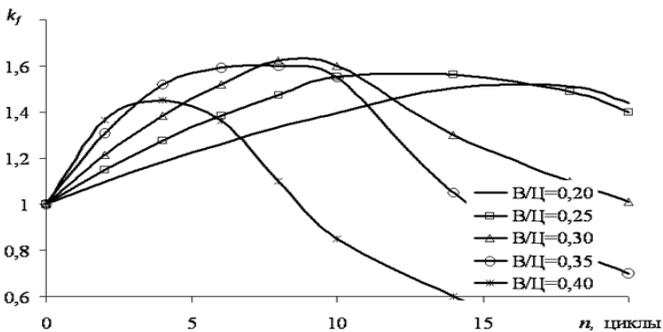
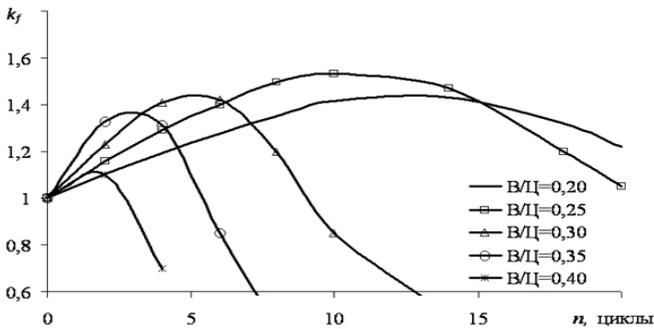
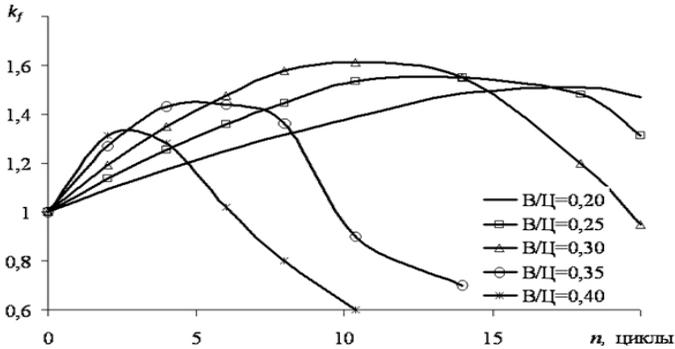


Рис. 2.7. Изменение относительного показателя прочности на сжатие при циклическом насыщении и высушивании по режиму КС-1 образцов цементного камня, полученного из вяжущего Ц-1 и твердевшего в нормально-влажностных, сухих условиях и условиях тепловой обработки

На коррозионную стойкость оказал влияние и вид вяжущего. Наименьшей стойкостью характеризовался цементный камень, изготовленный на вяжущем Ц-1, а наибольшей – на вяжущем Ц-3, в то время, как прирост в прочности имел соответственно более высокие и низкие значения.

Из анализа полученных данных следует, что циклическое насыщение и высушивание образцов приводит к изменению степени гидратации вяжущего. На характер изменения степени гидратации, оказывает влияние накопление и кристаллизация солей в поровой структуре. Изменение показателя среднего размера капиллярных пор определяется скоростью соленакпления.

Это видно из сравнения данных по кинетике изменения λ при замораживании и сушке образцов. Характер изменения прочности на сжатие зависит от изменения степени гидратации и среднего показателя размера капиллярных пор. Чем сильнее циклическое насыщение и высушивание влияет на изменение степени гидратации вяжущего и показателя среднего размера капиллярных пор, тем более отрицательно, это сказывается на коррозионной стойкости цементного камня. Продолжительность периода, когда наблюдается рост прочности цементного камня выраженного в циклах насыщения и высушивания, зависит от объема капиллярных пор, который предопределяет скорость и величину соленакпления.

Для подтверждения наличия процесса соленакпления и его влияния на изменение показателя среднего размера капиллярных пор и прочности на сжатие приведем данные по изменению массы ($\Delta m = m_0 - m_n$) высушенных образцов цементного камня из вяжущего Ц-1 при насыщении и высушивании в растворе NaCl (рис. 2.8).

Как свидетельствуют данные на рис. 2.8 в образцах цементного камня происходит накопление и отложение солей. Наибольшим соленакплением характеризуются образцы с В/Ц = 0,40, наименьшим образцы с В/Ц = 0,20.

Далее по аналогии с циклическим замораживанием и оттаиванием были проведены исследования по оценке влияния режима испытаний образцов на продолжительность конструктивного периода. Продолжительность конструктивного периода и его влияния на коррозионную стойкость цементного камня характеризовали отношением n_0/N , где n_0 – количество циклов, когда наблюдается рост прочности цементного камня; N – коррозионная стойкость цементно-

го камня (количество циклов, когда потеря прочности образцов составила 10 – 15 %).

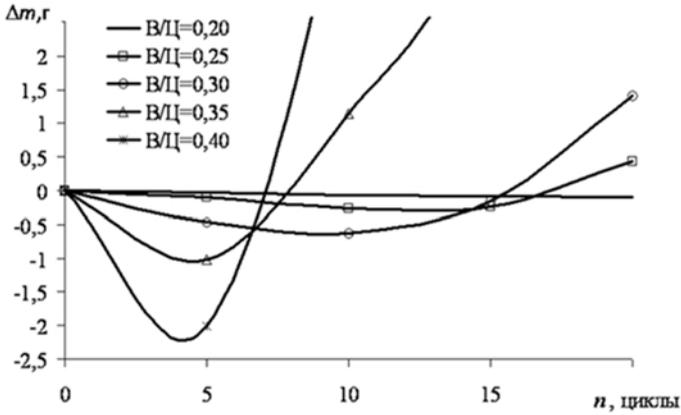


Рис. 2.8. Изменение массы Δm высушенных образцов цементного камня при насыщении и высушивании в растворе NaCl

На рис. 2.9 представлена графическая зависимость $n_0/N = f\left(\frac{B}{C}\right)$ для двух режимов испытаний образцов на вяжущем Ц-3.

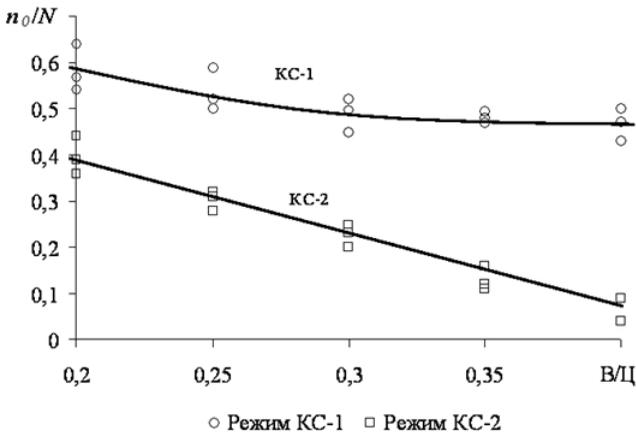


Рис. 2.9. Влияние режима испытаний образцов на характер зависимости

$$n_0/N = f\left(\frac{B}{C}\right)$$

Из характера графических зависимостей следует, что при увеличении водоцементного отношения независимо от режима испытаний образцов отношение n_0/N уменьшается. Это свидетельствует о том, что n_0 при повышении В/Ц снижается и снижается их влияние на конечную коррозионную стойкость цементного камня.

При повышении температуры сушки образцов (режим КС-2) характер зависимости $n_0/N = f\left(\frac{В}{Ц}\right)$ остается неизменным, но при этом значение n_0/N становится ниже, чем для режима КС-1. Это свидетельствует о том, что ужесточение режима испытаний образцов приводит, при прочих равных условиях, к уменьшению n_0 и снижению их влияния на коррозионную стойкость цементного камня, т. е. изменяется соотношение между «конструктивным» и «деструктивным» процессами, в сторону увеличения доли последних.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ГИДРАТАЦИИ И СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА МОРОЗОСТОЙКОСТЬ И КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ БЕТОНА

3.1. Общие положения

Основываясь на результатах проведенных исследований, а также воспользовавшись воззрениями Н. А. Мощанского [128], можно констатировать, что долговечность строительных материалов и, в частности, бетона и железобетона, определяется количественным соотношением двух процессов – конструктивного (созидательного) и деструктивного (разрушительного), графическая интерпретация чего представлена на рис. 3.1.

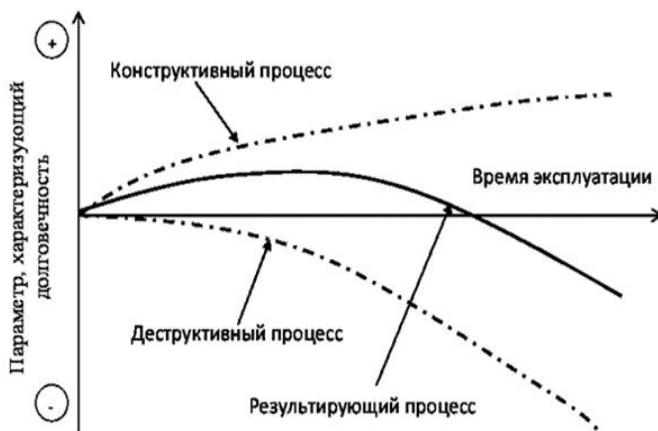


Рис. 3.1. Изменение характеристик материала в процессе эксплуатации

Результирующий процесс зависит от множества влияющих факторов и его результатом зачастую является появление экстремума в изменении какого-либо параметра, характеризующего долговечность материала (чаще всего прочности на сжатие). Как показали результаты исследований, это особенно ярко проявляется при испытаниях на морозостойкость и коррозионную стойкость методом насыщения и высушивания.

3.2. Теоретическое обоснование

Применительно к оценке долговечности бетона при воздействии циклического замораживания и оттаивания, насыщения в растворе соли и высушивания можно рассмотреть представленную на рис. 3.1 модель, как зависимость кинетики изменения прочности цементного камня от числа циклов замораживания-оттаивания, насыщения и высушивания (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Зависимость прочности цементного камня от количества циклов испытаний (n)

Как следует из рис. 3.2, для разработки модели, позволяющей описать изменение прочности при циклических воздействиях, необходимо отдельно математически описать кинетику «конструктивного» и «деструктивного» процесса, что позволит получить модель результирующего процесса. Таким образом, разработка модели для расчета морозостойкости и коррозионной стойкости должна базироваться на совместном учете конструктивных и деструктивных процессов путем описания математическими моделями восходящей и нисходящей ветвей экспериментальных кривых.

Вид экспериментальных кривых (рис. 3.2) изменения прочности цементного камня при циклических воздействиях имеет вид параболы. Характер изменения прочности цементного камня напоминает движение тела, брошенного под углом к горизонту. Рассмотрим траекторию движения тела, брошенного с некоторой начальной

скоростью и под некоторым углом к горизонту. Такое движение в кинематике описывают [129] следующим образом

$$x = V_0 \cdot \tau \cdot \cos \beta, \quad (3.1)$$

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \beta - \frac{g}{2 \cdot V_0^2 \cdot \cos^2 \beta} \cdot x^2, \quad (3.2)$$

где x и y – координаты произвольной точки в данный момент времени;

V_0 – начальная скорость тела, м/с;

τ – время, с;

β – угол под которым брошено тела, град

g – ускорение свободного падения, м/с².

Попытаемся адаптировать уравнения (3.1) и (3.2) к описанию изменения прочности цементного камня при циклическом воздействии внешней среды.

Обозначив y как прочность цементного камня $f_{\text{цк}}$ и подставив (3.1) в (3.2), получим

$$\begin{aligned} f_{\text{цк}} &= V_0 \cdot \tau \cdot \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \beta - \frac{g}{2 \cdot V_0^2 \cdot \cos^2 \beta} \times \\ &\times V_0^2 \cdot \tau^2 \cdot \cos^2 \beta = V_0 \cdot \tau \cdot \sin \beta - \frac{g \cdot \tau^2}{2}, \end{aligned} \quad (3.3)$$

Выразим время τ через количество циклов замораживания-оттаивания n . Тогда, изменение прочности цементного камня к любому количеству циклов $\frac{df_{\text{цк}}}{dn}$ будет равно

$$\frac{df_{\text{цк}}}{dn} = (f_{\text{цк}})' = V_0 \cdot \sin \beta - g \cdot n, \quad (3.4)$$

В точке перегиба на кривой изменения прочности цементного камня (f_{max}) при циклических испытаниях $\frac{df_{\text{цк}}}{dn} = 0$, и тогда для соответствующих циклов испытаний n_0 получим

$$n_0 = \frac{V_0 \cdot \sin \beta}{g}. \quad (3.5)$$

Если принять, что общее количество циклов до наступления критической деградации цементного камня ($n_{\text{кр}}$ определяется прочно-

стью цементного камня $f_{кр}$) будет приблизительно в два раза больше n_0 , то с учетом допустимой потери прочности цементного камня (δ в % от начального значения f_0) общее количество циклов будет определяться по уравнению

$$n_{кр} = \frac{2 \cdot \left(1 + \frac{\delta}{100}\right) \cdot V_0 \sin \beta}{g}. \quad (3.6)$$

3.3. Расчетная модель для оценки морозостойкости и коррозионной стойкости цементного камня

В уравнении (3.6) числитель характеризует интенсивность конструктивного процесса, а знаменатель – деструктивного. Попробуем представить влияющие факторы в уравнении (3.6) в удобном и понятном для технолога-бетонщика виде, что позволит использовать данное уравнение для практического расчета морозо- или солеустойкости цементного камня [194, 196].

На основании анализа литературных источников ранее выявлены основные факторы, определяющие морозостойкость и коррозионную стойкость бетона. Анализ результатов экспериментов позволил уточнить основные факторы, непосредственно оказывающие влияние на кинетику протекания конструктивных и деструктивных процессов. К ним относятся: степень гидратации, объем открытых капиллярных пор (кинетику изменения открытой капиллярной пористости оценивали по показателю среднего размера капиллярных пор) и прочность на сжатие к моменту воздействия циклов замораживания и оттаивания, насыщения и высушивания. Указанные факторы позволяют провести следующие аналогии.

Рассмотрим конструктивный процесс. Имитацией начальной скорости тела (V_0), без сомнения, является прочность f_0 , которую имеет цементный камень к моменту циклических воздействий. Величину угла β можно представить, как функцию, зависящую от двух параметров: объема открытых капиллярных пор, характеризуемого объемным водопоглощением цементного камня W_0 , и степени гидратации цемента α . Таким образом, в основе расчета лежат два параметра, интегрально определяющих начальные физико-механические и структурные характеристики цементного камня. Изменение же степени гидратации цемента характеризует способ-

ность цементного камня к так называемому «самозалечиванию», то есть к устранению дефектов структуры в процессе циклического воздействия внешней среды. Анализ экспериментальных результатов показал, что в прогнозных расчетах целесообразнее использовать не абсолютную величину степени гидратации цемента к началу испытаний (α_0), а отношение максимально возможной степени гидратации цемента к фактической $\frac{\alpha_{\max}}{\alpha_0}$.

Приведенные выше факторы достаточно просто могут быть определены экспериментально. Кроме того, значения прочности и водопоглощения цементного камня сравнительно легко (во всяком случае, с достаточной для практических целей точностью) рассчитываются. Что касается расчета начальной степени гидратации цемента, то для этого можно воспользоваться математической моделью, предложенной в [101]:

$$\alpha = \xi_t \cdot \xi_{du} \cdot \xi_S \cdot \alpha_{28}^{20} \frac{1 - \frac{C_3S}{100} e^{-\beta_1 \cdot \tau \cdot K\phi} - \left(1 - \frac{C_3S}{100}\right) \cdot e^{-\beta_2 \cdot \tau \cdot K\phi}}{1 - \frac{C_3S}{100} e^{-\beta_1 \cdot 28 \cdot K\phi} - \left(1 - \frac{C_3S}{100}\right) \cdot e^{-\beta_2 \cdot 28 \cdot K\phi}}, \quad (3.7)$$

где ξ_t – коэффициент, зависящий от температуры твердения бетона;

ξ_{du} – коэффициент, зависящий от вида и количества введенных добавок ускорителей твердения;

ξ_S – коэффициент, зависящий от тонкости помола цемента и содержания в нем гипса;

τ – время твердения, сутки;

C_3S – ускорение свободного падения, м/с².

β_1 – уравнивающий коэффициент, зависящий от вида цемента;

β_2 – уравнивающий коэффициент, зависящий от содержания минерала C_3A в цементе.

Абсолютное значение степени гидратации цемента в возрасте 28 суток применительно к нормальным условиям твердения (α_{28}^{20}) в (3.7) определяют в зависимости от относительного водосодержания цементного теста (X) по следующим уравнениям [101]:

$$\text{при } X \leq 1,65 \quad \alpha_{28}^{20} = 60 \cdot X - \sqrt[3]{(1,65 \cdot X)^2} \cdot e^{1,65 \cdot X}, \quad \%, \quad (3.8)$$

$$\text{при } X > 1,65 \quad \alpha_{28}^{20} = 70 + 5 \cdot (X - 1,65), \quad \%, \quad (3.9)$$

где X – относительное водосодержание цементного теста, которое определяется как [93]

$$X = \frac{\left(\frac{B}{П}\right)_T}{\frac{НГ}{100}}, \quad (3.10)$$

где $B/П_T$ – водоцементное отношение цементного теста;

$НГ$ – нормальная густота цемента. %.

Значение K_ϕ в (3.7) представляет собой произведение коэффициентов, учитывающих влияние разнообразных факторов на степень гидратации цемента [101–104]:

$$K_\phi = k_t \cdot k_w \cdot k_M \cdot k_S \cdot k_{SO_3} \cdot k_{du} \cdot k_{dp}, \quad (3.11)$$

где k_t – коэффициент, зависящий от температуры твердения бетона;

k_w – коэффициент, зависящий от начального водосодержания цементного теста;

k_M – коэффициент, зависящий от активности применяемого цемента;

k_S – коэффициент, зависящий от тонкости помола цемента;

k_{SO_3} – коэффициент, зависящий от содержания гипса в цементе;

k_{du} – коэффициент, зависящий от вида и количества добавки-ускорителя;

k_{dp} – коэффициент, зависящий от вида и количества пластифицирующей добавки.

Для определения значения максимально возможной степени гидратации вяжущего можно воспользоваться классическими представлениями Т. Пауэрса [21, 105] о том, что только при водоцементных отношениях, равных 0,38–0,42 и выше, при длительном твердении цемент может прогидратироваться полностью, но при меньших значениях $B/Ц$ максимально возможная степень гидратации линейно уменьшается. Это положение достаточно просто трансформировать в более удобную для расчетов форму «относительное водосодержание цементного теста - степень гидратации цемента» (рис. 3.3).

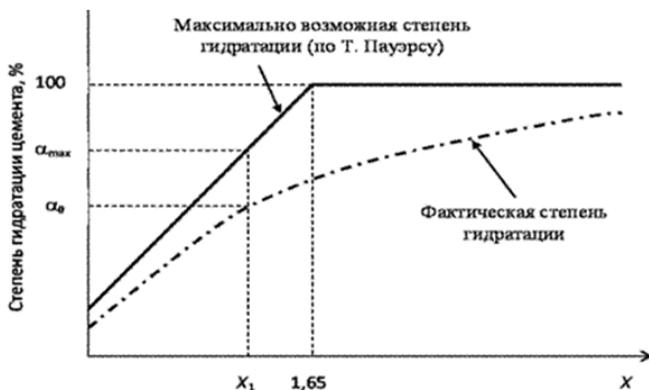


Рис. 3.3. Зависимость степени гидратации цемента от относительного водосодержания цементного теста

Для определения значений максимально возможной степени гидратации цемента удобнее пользоваться не графической, а математической зависимостью. Из элементарной обработки данных на рис. 3.3 следует, что если величина $X \geq 1,65$, то при достаточно продолжительном твердении в благоприятных условиях может прогидратироваться весь цемент, то есть $\alpha \%_{\max}$. Но если $X < 1,65$, то для определения (α_{\max}) можно воспользоваться следующей зависимостью

$$\alpha_{\max} = 60,6 \cdot X, \quad (3.12)$$

Еще одним параметром, от которого зависит кинетика протекающих конструктивных процессов, является объем открытых капиллярных пор или, фактически водопоглощение материала (W_o) по объему. Его легко можно определить экспериментально, но поскольку разрабатывается расчетная модель, то данный параметр также удобнее представить в виде соответствующей расчетной зависимости. Расчетную зависимость можно получить следующим образом. Трансформировав общеизвестную формулу для расчета общей пористости бетона, связывающую пористость с расходами воды и цемента, а также со степенью гидратации цемента [19], выражение для определения общей пористости цементного камня (Π_o) можно записать следующим образом

$$\Pi_0 = \left(B_T - 0,23 \cdot \Pi \cdot \frac{\alpha}{100} \right) \cdot \frac{1}{10}, \% . \quad (3.13)$$

При расчетах удобнее оперировать с содержанием воды в цементном тесте (B_m), а водоцементным отношением

$$\Pi_0 = \left[\left(\frac{B}{\Pi} \right)_T \cdot \Pi - 0,23 \cdot \Pi \cdot \frac{\alpha}{100} \right] \cdot \frac{1}{10}, \% . \quad (3.14)$$

В итоге получаем достаточно простую формулу, численные значения факторов, в которой рассчитываются по приведенной выше схеме:

$$\Pi_0 = \left[\left(\frac{B}{\Pi} \right)_T - 0,23 \cdot \frac{\alpha}{100} \right] \cdot \frac{\Pi}{10}, \% . \quad (3.15)$$

Таким образом, уравнение для расчета морозостойкости или солестойкости цементного камня при циклических воздействиях можно представить в следующем виде:

$$n_{кр} = \frac{2 \cdot \left(1 + \frac{\delta}{100} \right) \cdot f_0 \cdot \frac{\alpha_{max}}{\alpha_0} \cdot \left(1 - \frac{W_0}{100} \right)}{g}, \text{ циклы.} \quad (3.16)$$

В уравнении (3.16) величина g характеризует деструктивный процесс и по физическому смыслу является величиной постоянной. Можно предположить, что применительно к циклическим испытаниям цементного камня величина g также будет являться величиной постоянной для данного режима испытаний. Однако, как показали результаты исследований (рис. 2.28 и 2.57) это не совсем так. Скорость деструктивного процесса не является величиной постоянной, а зависит от водоцементного отношения, следовательно, от структуры материала и с допустимым приближением может быть интерпретирована неким коэффициентом k_D вида

$$k_D = V_D \cdot k_{стр}, \quad (3.17)$$

где $k_{стр}$ – коэффициент, учитывающий влияние структуры цементного камня на скорость разрушения при циклических воздействиях.

Согласно (3.17) величина g интерпретирована некой функцией, которую обозначили, как k_D и которая зависит от режима испытаний и структуры цементного камня. Введение параметра k_D позволяет сивелировать принятое при выводе (3.6) допущение о том, что об-

щее количество циклов до наступления критической деградации цементного камня будет приблизительно в два раза больше n_0 .

Зависимость для определения параметра k_D можно получить на основании обработки экспериментальных данных приведенных в второй главе монографии.

Обработка данных проводилась следующим образом. Параметр k_D определяли для двух режимов испытаний образцов на морозостойкость ($F-1$ и $F-2$) и коррозионную стойкость (КС-1 и КС-2). Для этого зависимость (3.16) трансформировали зависимость следующим образом:

$$k_D = \frac{2 \cdot \left(1 + \frac{\delta}{100}\right) \cdot f_0 \cdot \frac{a_{\max}}{a_0 \left(1 - \frac{W_0}{100}\right)}}{n_{кр}}, \text{ МПа/цикл.} \quad (3.18)$$

В (3.18) значение допустимой потери прочности (δ) принимали равным при испытаниях на морозостойкость – 5 %, на коррозионную стойкость – 15 %.

На рис. 3.4–3.7 приведена графическая интерпретация полученных результатов для двух режимов испытаний образцов. При обработке данных использовали параметр относительное водосодержание цементного теста (3.10).

Параметр относительное водосодержание является достаточно универсальной характеристикой, позволяющей еще на стадии приготовления бетонной смеси учитывать влияние вида вяжущего и химических добавок на последующие свойства бетона.

Анализ данных, приведенных на рис. 3.4–3.7 показывает, что параметр k_D зависит как от водосодержания (водоцементного отношения) так и от режима испытаний образцов. Обработка полученных экспериментальных данных позволила получить следующие эмпирические зависимости для определения параметра k_D .

Для режима F-1:

$$\text{при } X \leq 1,4 \quad k_D^{F-1} = 0,07 + 0,22 \cdot (X - 0,5), \quad (3.19)$$

$$\text{при } X > 1,4 \quad k_D^{F-1} = 0,27 + 4 \cdot (X - 1,4)^{2-(X-1,4)}. \quad (3.20)$$

Для иных режимов для всего исследованного диапазона относительного водосодержания цементного теста ($0,7 \leq X \leq 1,65$):

для режима F-2: $k_D^{F-2} = 0,170 \cdot \exp(2,46 \cdot X)$, (3.21)

для режима КС-1: $k_D^{F-2} = 3,40 \cdot \exp(0,27 \cdot X)$, (3.22)

для режима КС-2: $k_D^{F-2} = 7,30 \cdot \exp(0,51 \cdot X)$. (3.23)

Таким образом, окончательное уравнение для расчета морозостойкости (коррозионной стойкости) цементного камня при циклических воздействиях можно представить в следующем виде.

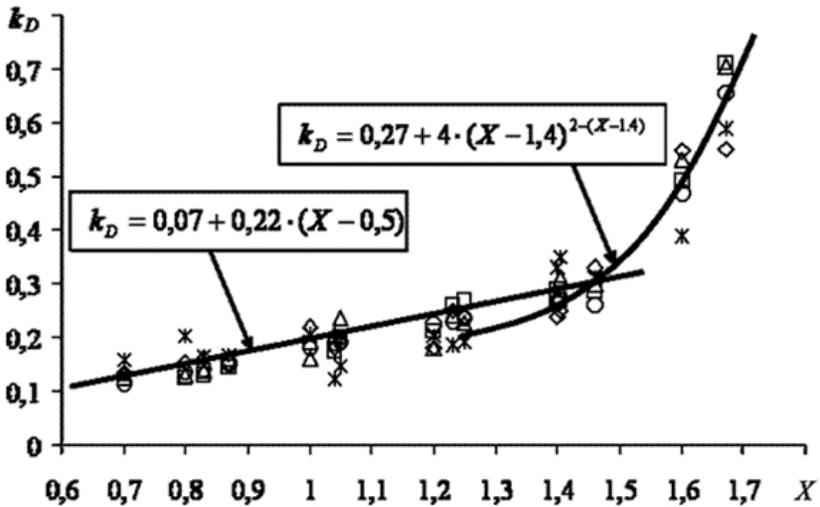


Рис. 3.4. Зависимость параметра k_D от водосодержания цементного теста X при испытаниях образцов на морозостойкость по режиму F-1

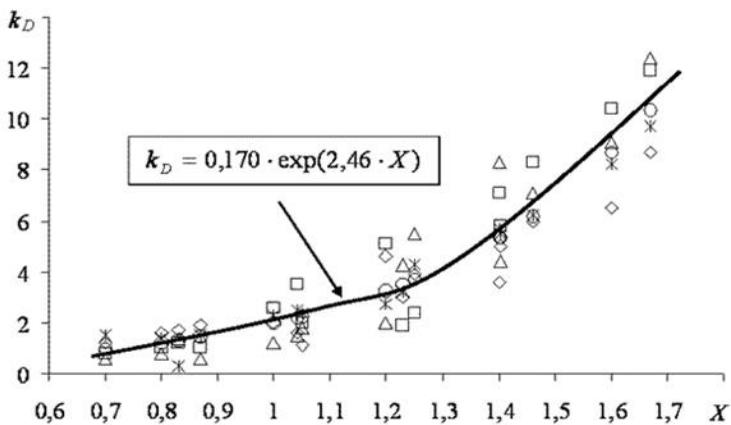


Рис. 3.5. Зависимости параметра k_D от водосодержания цементного теста X при испытаниях образцов на морозостойкость по режиму $F-2$

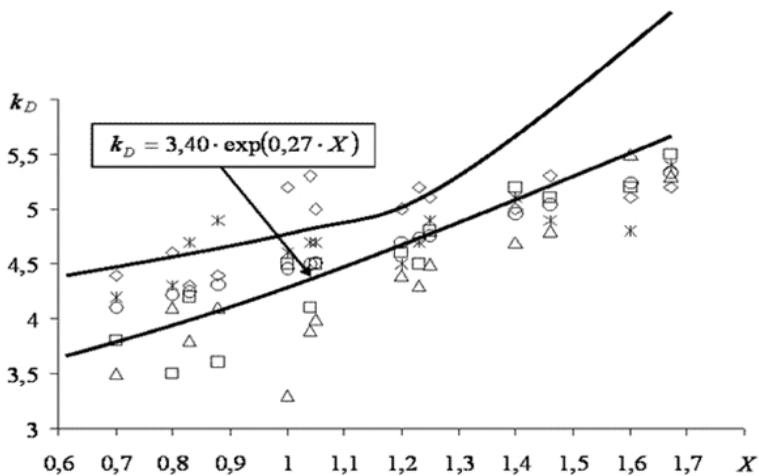


Рис. 3.6. Зависимости параметра k_D от водосодержания цементного теста X при испытаниях образцов на коррозионную стойкость по режиму КС-1

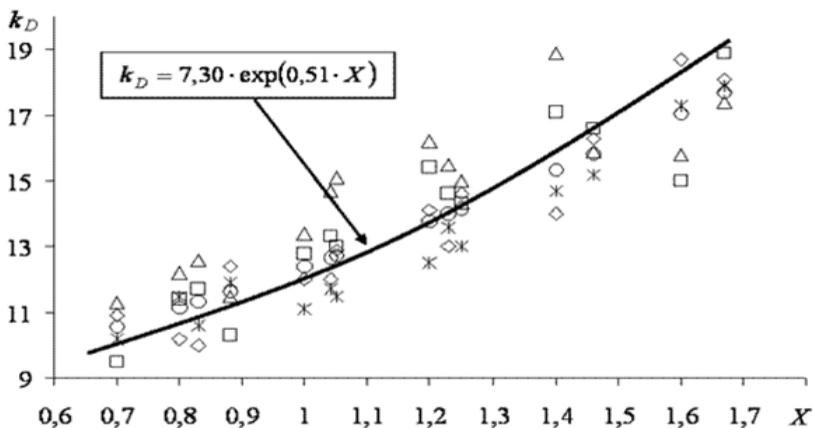


Рис. 3.7. Зависимости параметра k_D от водосодержания цементного теста X при испытаниях образцов на коррозионную стойкость по режиму КС-2

$$n_{кр} = \frac{2 \cdot \left(1 + \frac{\delta}{100}\right) \cdot f_0 \cdot \frac{\alpha_{max}}{\alpha_0} \cdot \left(1 - \frac{W_0}{100}\right)}{k_D}, \text{ ЦИКЛЫ.} \quad (3.24)$$

3.4. Расчетная модель для оценки морозостойкости конструкционного бетона

Область применения зависимости (3.24) ограничивается цементным камнем. Вначале уточним параметры, входящие в (3.24). Для расчета степени гидратации вяжущего (α_0), максимально возможной степени гидратации (α_{max}) и параметра k_D можно использовать предложенные ранее зависимости без дополнительной корректировки. Что касается объема открытых капиллярных пор, то предложенная зависимость (3.15) не пригодна для бетона, т. к. в бетоне помимо цементного камня присутствуют и заполнители.

Если принять, что объем цементного камня равен объему цементного теста, можно получить уравнение для расчета водопоглощения бетона по объему:

$$W_o = V_T \cdot \left[\left(\frac{B}{\Pi} \right)_T - 0,23 \cdot \frac{\alpha}{100} \right] \cdot \frac{\Pi}{10}, \% \quad (3.25)$$

При расчете всех параметров, входящих в (3.24) используется относительное водосодержание цементного теста (X), которое определяется через водоцементное отношение цементного теста (3.10). Если для цементного камня определить значение X не представляет особых трудностей, то для бетона, это вызывает значительные затруднения, в связи с тем, что количество воды в бетонной смеси складывается из количества воды приходящейся на цемент и количества воды, поглощенной заполнителем.

Попытаемся перейти от водоцементного отношения бетонной смеси к водоцементному отношению цементного теста. Для этого необходимо знать количество воды, поглощенное крупным и мелким заполнителем, причем водопоглощение мелкого и крупного заполнителя определяется как видом заполнителя, так и фракционным составом. Обычно в технологии бетона (имеется в виду при проектировании состава бетона) не оперируют такой характеристикой, как фракционный состав песка и щебня (как исключение – метод, предложенный профессором И. Н. Ахвердовым [93]). Чаще основная характеристика песка – модуль его крупности, а щебня – наибольшая крупность зерен. Это существенно упрощает расчеты, но водоцементное отношение цементного теста приходится определять весьма приближенно.

Основываясь на данных профессора И. Н. Ахвердова [93], получившего значения удельного водопоглощения отдельных фракций, попытаемся получить соответствующую формулу.

В [130] представлен график, обобщенно показывающий оптимальный фракционный состав песка различной крупности. Представим его в виде таблицы (табл. 3.1).

Удельное водопоглощение каждой фракции речного песка возьмем из данных профессора И. Н. Ахвердова [93] (табл. 3.2).

Таблица 3.1

Фракционный состав песков различной крупности

Фракции, мм	Частные остатки на ситах, %, для модуля крупности песка			
	1,5	2	2,5	3,25
2,5–5,0	0	0	10	20
1,25–2,5	5	10	15	25
0,63–1,25	15	20	25	25
0,315–0,63	15	40	25	20
0,16–0,315	45	20	20	10
менее 0,16	20	10	5	0

Таблица 3.2

Удельное водопоглощение каждой фракции речного песка

Фракция песка, мм	2,5–5,0	1,25–2,5	0,63–1,25	0,315–0,63	16–0,315	менее 0,16
Водопоглощение, %	1,9	2,1	2,3	3,5	6,0	12,0

Перемножив соответствующие значения в табл. 3.1 и 3.2, легко получить интегральные характеристики песка различной крупности (табл. 3.3).

Рассмотрим возможность перехода от водосодержания бетонной смеси к водосодержанию цементного теста. Для этого произвольно запроектируем составы бетона (простейшим методом НИИЖБ) [131] при изменении расхода воды от 150 до 210 кг и цемента – от 200 до 600 кг. Диапазон варьирования перекрывает все возможные варианты составов бетона (табл. 3.4).

Нормальная плотность цемента принята в среднем равной 27 %, в качестве мелкого заполнителя взят песок речной, а крупного – щебень гранитный с наибольшей крупностью зерен 20 мм (как на большинстве заводов сборного железобетона).

Таблица 3.3

Интегральные характеристики песка различной крупности

Фракции, мм	Водопоглощение частных остатков, %, для модуля крупности песка			
	1,5	2	2,5	3,25
2,5–5,0	0	0	19	38
1,25–2,5	10,5	21	31,5	52,5
0,63–1,25	34,5	46	57,5	57,5
0,315–0,63	52,5	140	87,5	70
0,16–0,315	270	120	120	60
менее 0,16	240	120	60	0
Сумма	607,5	447	375,5	278
Водопоглощение (W_n), %	6,075	4,470	3,755	2,780

Таблица 3.4

Составы бетонных смесей

№ пп	Расход компонентов бетонной смеси, кг				(В/Ц) _б	r
	Цемент	Вода	Песок	Щебень		
1	2	3	4	5	6	7
1	200	150	853	1197	0,750	0,42
2	250	150	795	1205	0,600	0,40
3	300	150	748	1202	0,500	0,38
4	350	150	707	1193	0,429	0,37
5	400	150	670	1180	0,375	0,36
6	450	150	637	1163	0,333	0,35
7	500	150	606	1144	0,300	0,35
8	550	150	578	1122	0,273	0,34
9	600	150	551	1099	0,250	0,33
10	200	170	844	1186	0,850	0,42
11	250	170	788	1192	0,680	0,40
12	300	170	740	1190	0,567	0,38
13	350	170	699	1181	0,486	0,37

Продолжение табл. 3.4

1	2	3	4	5	6	7
14	400	170	663	1167	0,425	0,36
15	450	170	629	1151	0,378	0,35
16	500	170	599	1131	0,340	0,35
17	550	170	571	1109	0,309	0,34
18	600	170	544	1086	0,283	0,33
19	200	180	840	1180	0,900	0,42
20	250	180	784	1186	0,720	0,40
21	300	180	736	1184	0,600	0,38
22	350	180	695	1175	0,514	0,37
23	400	180	659	1161	0,450	0,36
24	450	180	626	1144	0,400	0,35
25	500	180	596	1124	0,360	0,35
26	550	180	567	1103	0,327	0,34
27	600	180	541	1079	0,300	0,33
28	200	190	836	1174	0,950	0,42
29	250	190	780	1180	0,760	0,40
30	300	190	732	1178	0,633	0,38
31	350	190	692	1168	0,543	0,37
32	400	190	655	1155	0,475	0,36
33	450	190	622	1138	0,422	0,35
34	500	190	592	1118	0,380	0,35
35	550	190	564	1096	0,345	0,34
36	600	190	537	1073	0,317	0,33
37	200	200	832	1168	1,000	0,42
38	250	200	776	1174	0,800	0,40
39	300	200	729	1171	0,667	0,38
40	350	200	688	1162	0,571	0,37
41	400	200	652	1148	0,500	0,36
42	450	200	619	1131	0,444	0,35
43	500	200	589	1111	0,400	0,35
44	550	200	561	1089	0,364	0,34

Окончание табл. 3.4

1	2	3	4	5	6	7
45	600	200	534	1066	0,333	0,33
46	200	210	828	1162	1,050	0,42
47	250	210	772	1168	0,840	0,40
48	300	210	725	1165	0,700	0,38
49	350	210	684	1156	0,600	0,37
50	400	210	648	1142	0,525	0,36
51	450	210	615	1125	0,467	0,35
52	500	210	585	1105	0,420	0,35
53	550	210	557	1083	0,382	0,34
54	600	210	531	1059	0,350	0,33

r – доля песка в смеси заполнителей.

Затем определяем расход воды на образование цементного теста (B_T):

$$B_T = B - \frac{W_n}{100} \cdot П - \frac{W_{ш}}{100} \cdot Щ, \quad (3.26)$$

где B , $П$, $Щ$ – расходы воды, песка, щебня соответственно, кг;

W_n – водопоглощение песка, % (принимают по табл. 4.6 в соответствии со значением модуля крупности песка);

$W_{ш}$ – водопоглощение щебня, % (принимается равным 1,5).

А затем определяем водоцементное отношение цементного теста:

$$\left(\frac{B}{Ц}\right)_T = \frac{B_T}{Ц}, \quad (3.27)$$

где $Ц$ – расход цемента, кг.

Полученные расчетом величины приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Результаты расчета водоцементного отношения цементного теста

№ пп	Расход воды и водоцементное отношение цементного теста в бетонной смеси при модуле крупности песка							
	1,5		2,0		2,5		3,25	
	В, кг	(В/Ц) _т	В, кг	(В/Ц) _т	В, кг	(В/Ц) _т	В, кг	(В/Ц) _т
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	80	0,401	94	0,470	100	0,500	108	0,542
2	84	0,334	96	0,385	102	0,408	110	0,439
3	87	0,288	99	0,328	104	0,346	111	0,371
4	89	0,255	101	0,287	106	0,302	112	0,321
5	92	0,229	102	0,256	107	0,268	114	0,284
6	94	0,209	104	0,231	109	0,241	115	0,255
7	96	0,192	106	0,212	110	0,220	116	0,232
8	98	0,178	107	0,195	111	0,203	117	0,213
9	100	0,167	109	0,181	113	0,188	118	0,197
10	101	0,505	114	0,572	121	0,603	129	0,644
11	104	0,417	117	0,468	123	0,490	130	0,521
12	107	0,357	119	0,397	124	0,415	132	0,439
13	110	0,314	121	0,346	126	0,360	133	0,380
14	112	0,281	123	0,307	128	0,319	134	0,335
15	115	0,254	125	0,277	129	0,287	135	0,301
16	117	0,233	126	0,253	131	0,261	136	0,273
17	119	0,216	128	0,232	132	0,240	137	0,250
18	121	0,201	129	0,216	133	0,222	139	0,231
19	111	0,556	125	0,624	131	0,654	139	0,695
20	115	0,458	127	0,509	133	0,531	140	0,562
21	118	0,392	129	0,431	135	0,449	142	0,473
22	120	0,343	131	0,375	136	0,389	143	0,409
23	123	0,306	133	0,333	138	0,345	144	0,361
24	125	0,277	135	0,300	139	0,310	145	0,323
25	127	0,254	137	0,273	141	0,282	147	0,293
26	129	0,235	138	0,251	142	0,258	148	0,269
27	131	0,218	140	0,233	144	0,239	149	0,248
28	122	0,608	135	0,675	141	0,705	149	0,746

Окончание табл. 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
30	128	0,426	140	0,465	145	0,483	152	0,507
31	130	0,373	142	0,404	147	0,419	153	0,438
32	133	0,332	143	0,358	148	0,370	154	0,386
33	135	0,300	145	0,322	150	0,332	156	0,346
34	137	0,275	147	0,294	151	0,302	157	0,314
35	139	0,253	148	0,270	152	0,277	158	0,287
36	141	0,235	150	0,250	154	0,256	159	0,265
37	132	0,660	145	0,726	151	0,756	159	0,797
38	135	0,541	148	0,591	153	0,613	161	0,643
39	138	0,461	150	0,500	155	0,517	162	0,541
40	141	0,402	152	0,434	157	0,448	163	0,467
41	143	0,358	154	0,384	158	0,396	165	0,412
42	145	0,323	155	0,345	160	0,355	166	0,369
43	148	0,295	157	0,314	161	0,322	167	0,334
44	150	0,272	159	0,288	163	0,296	168	0,306
45	152	0,253	160	0,267	164	0,273	169	0,282
46	142	0,711	156	0,778	161	0,807	170	0,848
47	146	0,582	158	0,632	164	0,654	171	0,684
48	148	0,495	160	0,534	165	0,551	172	0,575
49	151	0,432	162	0,463	167	0,477	174	0,496
50	154	0,384	164	0,410	169	0,421	175	0,437
51	156	0,346	166	0,368	170	0,378	176	0,391
52	158	0,316	167	0,335	171	0,343	177	0,354
53	160	0,291	169	0,307	173	0,314	178	0,324
54	162	0,270	170	0,284	174	0,290	179	0,299

Графическая интерпретация полученных результатов (рис. 3.8) показывает наличие достаточно устойчивой взаимосвязи между водоцементным отношением бетонной смеси и водоцементным отношением цементного теста. А это открывает возможность вполне точного расчета начального водосодержания цементного теста и, соответственно, структурных характеристик цементного камня без сложных промежуточных вычислений.

Достаточно элементарные математические операции позволили получить формулу, связывающую $(В/Ц)_Т$ с $(В/Ц)_б$ с учетом модуля крупности песка $Мк$.

$$\left(\frac{В}{Ц}\right)_Т = (0,58 + 0,07 \cdot Мк) \cdot \left(\frac{В}{Ц}\right)_б. \quad (3.28)$$

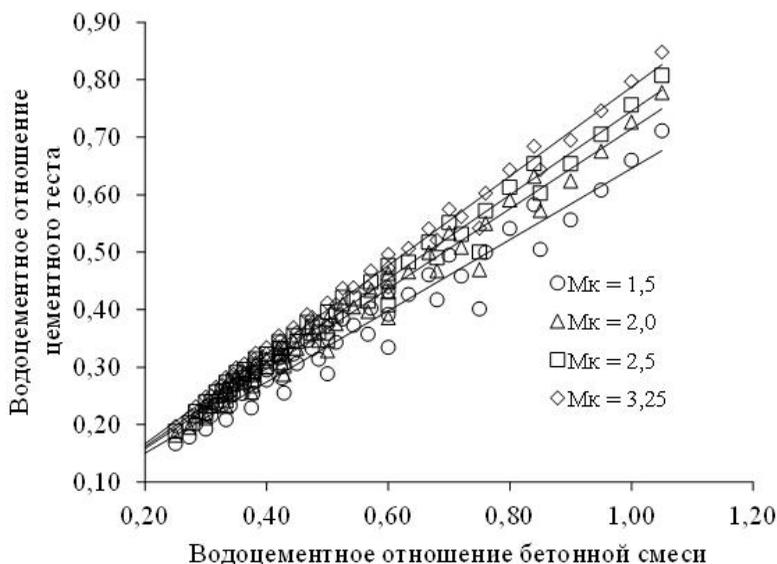


Рис. 3.8. Зависимость водоцементного отношения цементного теста от водоцементного отношения бетонной смеси

Проведем статистический анализ точности расчетов (табл. 3.6) по величине отклонений, рассчитываемых по формуле (3.28) величин от приведенных в табл. 3.5.

В соответствии с полученными результатами можно сделать вывод о возможности и целесообразности расчетов водоцементного отношения цементного теста по зависимости (3.28).

Таблица 3.6

Статистический анализ точности расчетов водоцементного отношения по формуле (3.28)

Параметры	Статистические характеристики для модуля крупности песка			
	1,5	2,0	2,5	3,25
Среднее (В/Ц) _т	0,348	0,379	0,394	0,413
Среднее квадратичное отклонение	0,03007	0,02327	0,01996	0,01635
Коэффициент вариации, %	8,6	6,1	5,1	3,9

На основании литературного обзора установлены еще несколько существенных факторов, определяющих морозостойкость бетона (рис. 1.7). Учесть эти факторы, на наш взгляд, удобно через систему соответствующих коэффициентов (3.29), которые могут быть получены как в результате собственных экспериментальных исследований авторов, так и анализа литературных источников [196]:

$$F_6 = n_{кр} \cdot k_{пт} \cdot k_{в} \cdot k_{C_{3A}}, \text{ циклы,} \quad (3.29)$$

где $k_{пт}$ – коэффициент, учитывающий влияние загрязненности заполнителей;

$k_{в}$ – коэффициент, учитывающий влияние воздухоовлекающих или газообразующих добавок;

$k_{C_{3A}}$ – коэффициент, учитывающий влияние минералогического состава цемента.

Для учета влияния загрязненности заполнителей на морозостойкость бетона можно воспользоваться данными, приведенными в [132]. В [132] представлена номограмма для расчета морозостойкости бетона, в которой учитывается суммарное содержание пылевидных и глинистых частиц в мелком и крупном заполнителе. Номограмма построена на основании формулы для расчета морозостойкости бетона на загрязненных заполнителях (F_6):

$$F_6 = F_0 \cdot k_{пт}, \text{ циклы,} \quad (3.30)$$

где F_0 – морозостойкость бетона на чистых заполнителях;

$k_{пт}$ – коэффициент влияния загрязненности смеси заполнителей.

На рис. 3.9 приведена зависимость влияния загрязненности смеси заполнителей на значения коэффициента $k_{\text{пр}}$, построенная на основании данных [131].

На наш взгляд, линейная зависимость значения $k_{\text{пр}}$ от содержания пылевидных и глинистых частиц в заполнителе $G_{\text{пр}}$ не вполне корректна. В связи с этим были поставлены эксперименты по уточнению численного значения влияющего коэффициента. Для этого был подобран состав бетона, обеспечивающий морозостойкость около 300 циклов на мытых заполнителях: цемент – 396 кг/м³, песок – 650 кг/м³, щебень – 1140 кг/м³, вода – 200 л/м³.

Затем искусственно добавляли в песок и щебень загрязняющие примеси в количестве, обеспечивающем суммарное содержание пылевидных и глинистых частиц от 0 до 7%. На указанных заполнителях изготавливали образцы (состав приведен выше) и определяли морозостойкость бетона испытанием по режиму *F-2*. Полученные данные приведены на рис. 3.10.

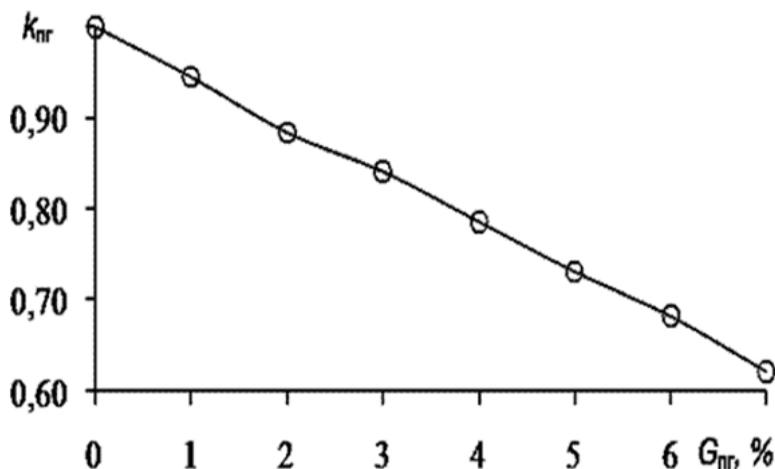


Рис. 3.9. Влияние загрязненности смеси заполнителей $G_{\text{пр}}$ на поправочный коэффициент $k_{\text{пр}}$ [131]

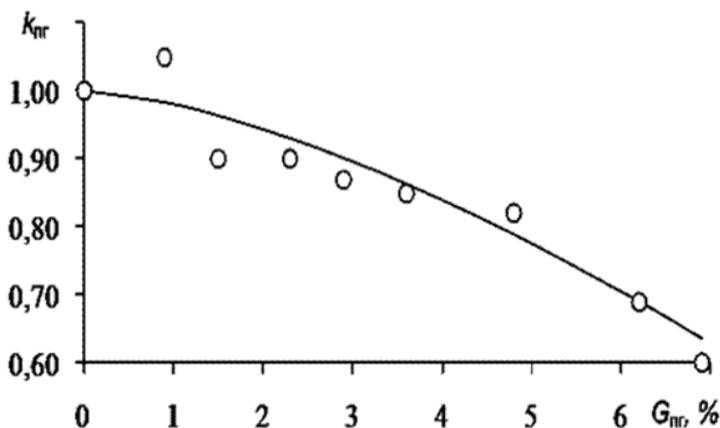


Рис. 3.10. Влияние загрязненности смеси заполнителей $G_{гр}$ на уточненный поправочный коэффициент $k_{гр}$

Обработка данных рис. 3.10 позволяет получить следующую зависимость:

$$k_{гр} = 1 - 0,02 \cdot \sqrt{G_{гр}^3}, \quad (3.31)$$

где $G_{гр}$ – содержание пылевидных и глинистых частиц в заполнителе, % по массе.

С допустимым приближением полученную зависимость (3.31) можно распространить и на бетоны с иной морозостойкостью.

Для оценки влияния эмульгированного воздуха, вовлеченного в бетонную смесь при применении воздухововлекающих, а также микро- пено- и газообразующих добавок, воспользуемся результатами, полученными в [121]. В [121] отмечается, что при содержании вовлеченного воздуха 3–5 % морозостойкость бетона возрастает в 3–6 раз. Отмечается, что с повышением прочности бетона свыше 30–40 МПа относительное увеличение критического числа циклов, достигаемое за счет вовлеченного воздуха, несколько возрастает (рис. 3.11), что авторы объясняют увеличением влияния условно-замкнутых пор контракционного происхождения.

Как нам кажется, вряд ли необходима постановка экспериментов для подтверждения (или опровержения) приведенных на рис. 3.11

результатов, поскольку авторы монографии известны, как ученые, внесшие существенный вклад в разработку теории морозостойкости бетона и соответствующих нормативных документов.

К сожалению, в [121] приведена лишь графическая интерпретация конечных экспериментальных данных (рис. 3.11). Математическая же обработка их отсутствует. Однако элементарная обработка приведенных в графике данных позволяет получить обобщенную формулу, связывающую коэффициент влияния (k_b) с объемом вовлеченного в результате введения соответствующих химических добавок ($V_{вх}$ в %)

$$k_b = 1 + 0,02 \cdot V_{вх}^2, \quad (3.32)$$

Следовательно, морозостойкость бетона с воздухововлекающими химическими добавками (F_b) может быть рассчитана как произведение морозостойкости бетона без добавок (F_0) и влияющего коэффициента.

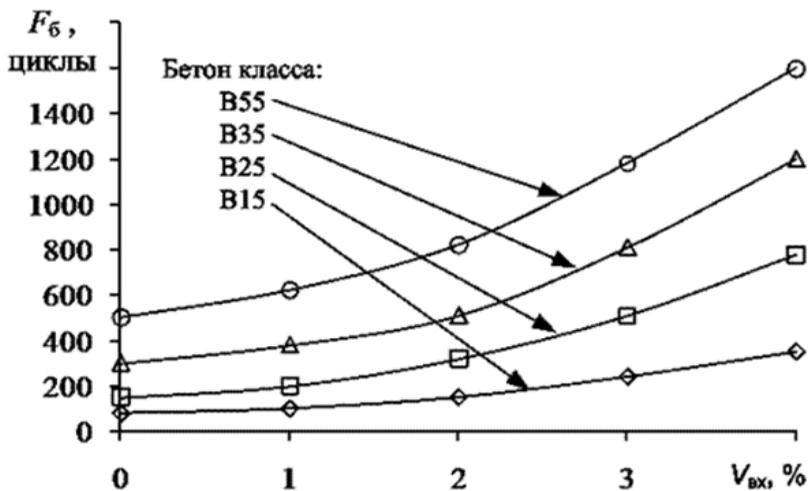


Рис. 3.11. Влияние вовлеченного воздуха ($V_{вх}$) на морозостойкость бетона (F_b) различных классов по прочности на сжатие, изготовленных из бетонных смесей с ОК = 1–4 см

$$F_{\bar{0}} = F_0 \cdot k_B, \quad (3.33)$$

Сопоставление рассчитываемой морозостойкости бетона по этой формуле и фактическими значениями, взятыми из [121], приведены на рис. 3.12.

На наш взгляд, сходимость фактических и рассчитываемых результатов вполне допустима для практических целей.

Поправочный коэффициент k_B можно получить и иным путем. В [121], после обработки экспериментальных данных, получена зависимость, связывающая морозостойкость бетона ($F_{\bar{0}}$) с его прочностью ($R_{сж}$) и объемом вовлеченного воздуха ($V_{вх}$):

$$F_{\bar{0}} = A_1 R_{сж}^{A_2} \cdot \exp^{A_3 V_{вх}}, \text{ циклы.} \quad (3.34)$$

Для исследованных бетонов коэффициент $A_3 = 0,35$, а коэффициенты A_1 и A_2 изменяются с изменением водосодержания и соответственно подвижности бетонных смесей (табл. 3.7).

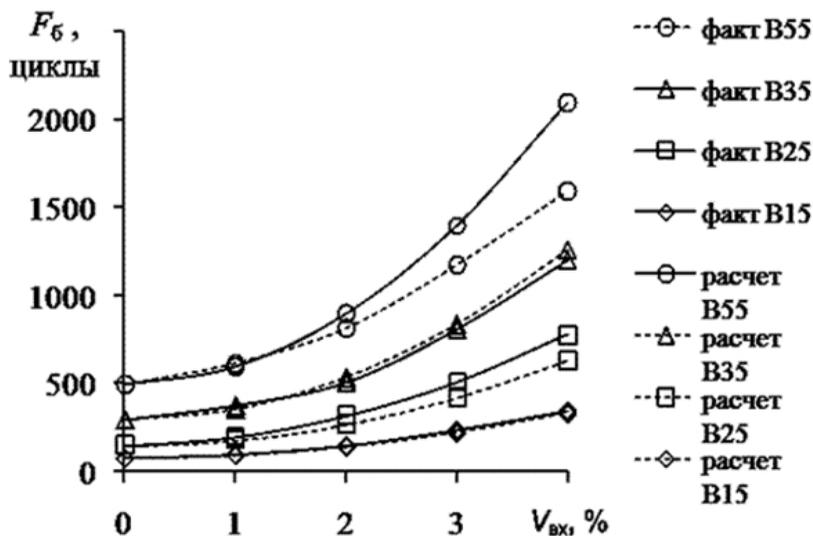


Рис. 3.12. Сопоставление фактических и расчетных значений морозостойкости бетона по (3.33)

Таблица 3.7

Значения коэффициентов A_1 и A_2 для бетонных смесей с различной удобоукладываемостью

Удобоукладываемость бетонных смесей	Значение коэффициентов	
	A_1	A_2
Жесткие бетонные смеси ($Ж = 5-35$ с)	2,48	1,25
Малоподвижные бетонные смеси ($ОК = 1-4$ см)	0,91	1,47
Подвижные бетонные смеси ($ОК = 9-12$ см)	0,34	1,68

Из уравнения (3.34) легко получить коэффициент, учитывающий влияние вовлеченного в бетонную смесь воздуха изменяющийся в пределах от 1 до 4 при изменении объема вовлеченного воздуха от 0 до 4 % (рис. 3.13):

$$k_B = e^{0,35 \cdot V_B} . \quad (3.35)$$

Еще один влияющий фактор – это содержание алюмината кальция в цементе. В принципе, изучение влияния минералогического состава цемента на морозостойкость бетона требует специальных трудоемких исследований и не входит в цели данной работы.

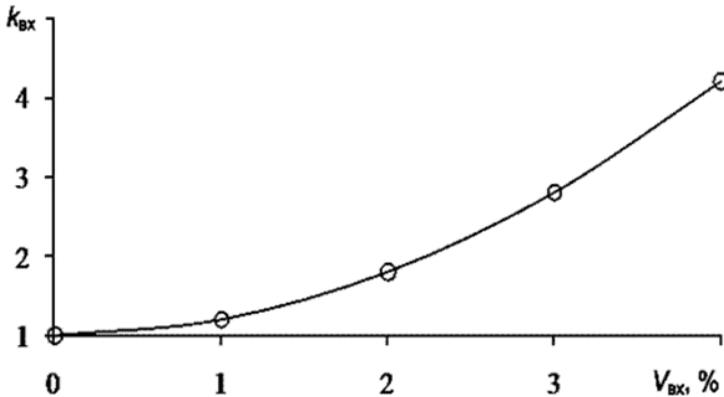


Рис.3.13. Изменение влияющего коэффициента (k_B) в зависимости от объема вовлеченного воздуха (V_B)

Однако то, что высокоалюминатные цементы менее морозостойки, чем низкоалюминатные, бесспорно и подтверждено многочисленными данными [19, 20, 133, 134 и др.]. Естественно, что этот влияющий фактор должен найти свое место при оценке морозостойкости бетонов. К сожалению, в литературе отсутствует какая-либо формула, увязывающая содержание алюмината кальция в цементе с морозостойкостью бетона. Попытаемся получить коэффициент (k_{C_3A}), позволяющий не констатировать известный факт, а хотя бы в первом приближении оценить влияние минералогического состава цемента. Для этого мы воспользовались данными Горчакова и Шестоперова [133,134], сгруппировав цементы по содержанию алюмината кальция в пределах 2–5, 6–8 и более 10 % и соответственно оценив их влияние на морозостойкость бетона. Конечно, эти данные (при отсутствии целенаправленных исследований) весьма приближенны, отражают лишь тенденцию, но для предварительных расчетов вполне могут быть использованы. Полученные результаты представлены на рис. 3.14.

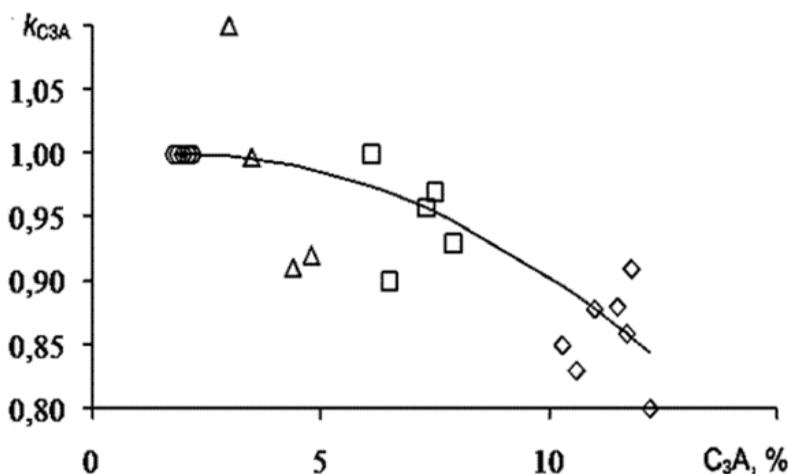


Рис. 3.14. Влияние содержания алюмината кальция в цементе на поправочный коэффициент k_{C_3A}

Обработав полученные результаты (рис. 3.14), легко получить формулу, связывающую коэффициент влияния с содержанием алюмината кальция в цементе (C_{3A} в %) [196]:

$$k_{C_{3A}} = 1 - 0,0015 \cdot (C_{3A} - 2)^2. \quad (3.36)$$

Таким образом, получены коэффициенты, позволяющие перейти от величины первоначальной морозостойкости бетона (F_0), рассчитываемой по соотношению конструктивных и деструктивных факторов, к значению, учитывающему ряд технологических факторов.

Итак, окончательно зависимость для расчета морозостойкости бетона будет иметь вид [196]

$$F_6 = \frac{2 \cdot \left(1 + \frac{\delta}{100}\right) \cdot f_0 \cdot \frac{a_{\max}}{a_0} \cdot \left(1 - \frac{W_0}{100}\right)}{k_D} \cdot k_{\text{пт}} \cdot k_{\text{в}} \cdot k_{C_{3A}}. \quad (3.37)$$

3.5. Расчетная модель для оценки коррозионной стойкости конструкционного бетона

По аналогии с морозостойкостью попытаемся осуществить переход от коррозионной стойкости цементного камня к солестойкости бетона (N_6). Расчет критического количества циклов ($n_{\text{кр}}$) производится по зависимости (3.24). Параметры, входящие в (3.24), определяются по аналогии с расчетом морозостойкости. Переход к коррозионной стойкости бетона также целесообразно осуществлять через систему коэффициентов (3.38), учитывающих основные влияющие факторы (см. рис. 1.8):

$$N_6 = n_{\text{кр}} \cdot k_{\text{пт}} \cdot k_{\text{в}} \cdot k_{C_{3A}}, \text{ циклы}, \quad (3.38)$$

где $k_{\text{пт}}$ – коэффициент, учитывающий влияние загрязненности заполнителей;

$k_{\text{в}}$ – коэффициент, учитывающий влияние воздухововлекающих или газообразующих добавок;

$k_{C_{3A}}$ – коэффициент, учитывающий влияние минералогического состава цемента.

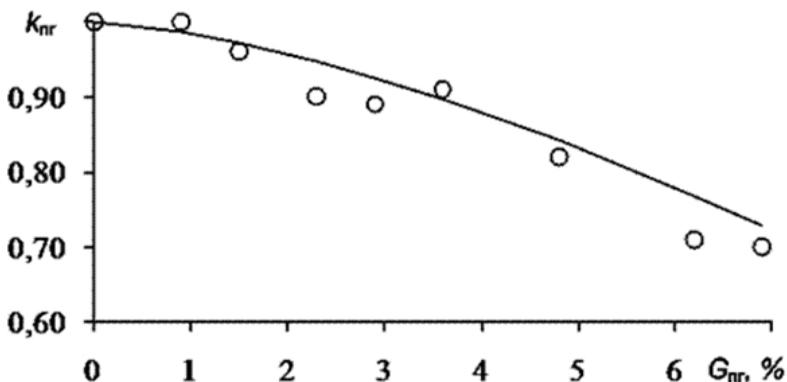


Рис. 3.15 Влияние загрязненности смеси заполнителей $G_{гр}$ на коэффициент $k_{гр}$ при испытаниях образцов на солестойкость

Поскольку в литературных источниках отсутствуют необходимые данные по влиянию загрязненности заполнителей на солестойкость бетона, были поставлены эксперименты по определению значения влияющего коэффициента.

Для этого был использован состав бетона, который применяли для оценки коэффициента влияния на морозостойкость. Применялась аналогичная методика подготовки заполнителей и образцов. Солестойкость бетона определяли испытанием по режиму КС-2. Полученные данные приведены на рис. 3.15.

Как свидетельствуют полученные результаты (рис. 3.15), характер влияния загрязненности смеси заполнителей на солестойкость бетона аналогичен влиянию на морозостойкость, т.е. для расчета коэффициента влияния загрязненности заполнителей на солестойкость бетона можно использовать ранее установленную зависимость (3.31).

Влиянию воздухововлекающих добавок на коррозионную стойкость бетона посвящено большое количество исследований [78, 82, 84, 86, 92 и др.]. Однако, эти данные не систематизированы и носят разрозненный характер, поэтому для оценки коэффициента влияния воздухововлечения необходима постановка специальных исследований, что не входило в задачу диссертационной работы. В данном

случае, можно ограничиться применением для расчета коэффициента влияния зависимостью (3.32). Это может быть обосновано тем, что на основании проведенного литературного обзора и исследований кинетики изменения структурно-механических характеристик цементного камня установлена аналогия между факторами, определяющими морозостойкость и коррозионную стойкость, следовательно, можно предположить, что влияние дополнительного воздухововлечения будет носить одинаковый характер.

Влиянию минералогического состава цемента, в частности, трехкальциевого алюмината на коррозионную стойкость также посвящено большое количество исследований [78, 82, 84, 86, 92 и др.]. Многие исследователи [56–60, 77, 81, 83, 85, 89 и др.] сходятся во мнении, что механизмы влияния минералогического состава цемента на морозостойкость и коррозионную стойкость схожи. Следовательно, для расчета коэффициента влияния трехкальциевого алюмината на солестойкость бетона с допустимым приближением можно воспользоваться зависимостью (3.36). Для подтверждения возможности использования зависимости (3.36) была поставлена серия экспериментов. В экспериментах использовали пять видов портландцемента без минеральных добавок, которые отличались содержанием трехкальциевого алюмината от 3,0 до 11,7 %. Были изготовлены образцы цементного камня с В/Ц = 0,3. В возрасте 28 суток с момента изготовления образцы подвергали испытаниям на коррозионную стойкость насыщением и высушиванием в растворе соли по режиму КС-2. Фактическое значение коэффициента влияния трехкальциевого алюмината определяли по формуле

$$k_{C_3A} = \frac{N_x}{N_0}, \quad (3.39)$$

где N_x – коррозионная стойкость цементного камня, изготовленного на цементе с содержанием $C_3A > 3$ %, циклы;

N_0 – коррозионная стойкость цементного камня, изготовленного на цементе с содержанием $C_3A \leq 3$ %, циклы.

Результаты определения коэффициента влияния и его расчетные значения приведены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Фактические и расчетные значения коэффициента влияния C_3A на коррозионную стойкость цементного камня с $W/C = 0,3$

Вид вяжущего	Содержание C_3A , %	Коэффициент влияния k_{C_3A}	
		факт по (3.23)	расчет по (3.21)
ПРУП «Кричевцементо-шифер» ПЦ-500-Д0	3,0	1,00	0,998
ОАО «Красносельск-строй-материалы», ПЦ-500-Д0	3,8	1,02	0,995
ПРУП «БЦЗ», ПЦ-500-Д0	7,2	0,96	0,959
Воскресенский завод ПЦ-500-Д0	11,7	0,83	0,859
Здолбуновский завод ПЦ-500-Д0	8,6	0,95	0,935

Анализ данных табл. 3.8 показывает, что расчетные и фактические значения коэффициента имеют хорошую корреляцию. Следовательно, для оценки значения коэффициента влияния содержания C_3A на коррозионную стойкость бетона можно с достаточной для практических целей точностью использовать ранее полученную зависимость (3.36).

Таким образом, окончательно зависимость для расчета коррозионной стойкости бетона будет иметь вид [196]

$$N_{\bar{\sigma}} = \frac{2 \cdot \left(1 + \frac{\delta}{100}\right) \cdot f_0 \cdot \frac{\alpha_{\max}}{\alpha_0} \cdot \left(1 - \frac{W_0}{100}\right)}{k_D} \cdot k_{\text{пр}} \cdot k_B \cdot k_{C_3A}. \quad (3.40)$$

4. ДОСТОВЕРНОСТЬ ПРЕДЛАГАЕМЫХ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ В СРАВНЕНИИ С СУЩЕСТВУЮЩИМИ МЕТОДАМИ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МОРОЗОСТОЙКОСТИ И КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ БЕТОНА

4.1. Методика и критерии оценки достоверности

Оценку достоверности модели расчета морозостойкости или коррозионной стойкости проводили сравнением фактических результатов показателя (x_i^ϕ), полученными экспериментально, либо заимствованными из литературных источников [99, 121], либо рассчитанным по методикам [20, 31, 32, 52, 134] с рассчитанными по разработанной модели (x_i^p). Среднее квадратичное отклонение рассчитывали по формуле с учетом фактических x_i^ϕ и расчетных x_i^p величин анализируемого параметра:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i^\phi - x_i^p)}{n-1}, \text{ МПа.} \quad (4.1)$$

А коэффициент вариации определяли с учетом среднего значения фактических величин \bar{x}^ϕ по

$$V_x = \frac{S}{\bar{x}^\phi} \cdot 100, \%. \quad (4.2)$$

За допустимое значения коэффициента вариации (критерий достоверности) можно принять величину относительной погрешности определения прочности бетона неразрушающими методами [122], которая должна составлять не более 12 % при определении прочности серии образцов и 15 % для отдельных образцов. Так, допустимое значение коэффициента вариации 12 % может быть принято при оценке достоверности расчета морозостойкости и коррозионной стойкости по собственным экспериментальным данным, а 15 % – по данным принятым из других источников.

4.2. Достоверность различных моделей для оценки и прогнозирования морозостойкости и коррозионной стойкости бетона

Оценку достоверности модели (3.37) для расчета морозостойкости тяжелых бетонов проводили в следующей последовательности. В соответствии с принятой программой было изготовлено 36 серий образцов (табл. 2.5), структурно-механические характеристики, которых приведены в табл. 4.1. Данные табл. 4.1 показывают, что подобранные составы бетонных смесей позволили получить бетоны со структурными и прочностными показателями, которые изменяются в широких пределах. Это, в свою очередь, позволило получить необходимый объем экспериментальных данных по влиянию структурных характеристик образцов на морозостойкость и с достаточной надежностью оценить достоверность предлагаемой модели.

Таблица 4.1

Структурно-механические характеристики контрольных образцов тяжелого бетона

Со- став	Обозначение показателей, ед. изм.					
	α_0 , %	W_m , %	ρ_0 , кг/м ³	W_0 , %	X	f_{cube} , МПа
1	2	3	4	5	6	7
1-1	89,3	6,2	2380	14,8	1,50	32,3
1-2	90,6	6,5	2360	15,3	1,55	30,2
1-3	87,4	6,6	2340	15,4	1,75	26,4
1-4	81,3	8,3	2370	19,7	2,15	25,6
1-5	91,1	7,5	2350	17,6	2,45	33,0
1-6	89,0	6,3	2370	14,9	1,65	31,5
1-7	90,5	6,1	2380	14,5	1,40	30,9
1-8	87,1	5,8	2390	13,9	1,30	34,5
1-9	89,3	6,3	2360	14,9	2,70	29,4
1-10	87,6	5,2	2410	12,5	1,20	35,2
1-11	92,5	7,4	2350	17,4	1,85	24,3
1-12	93,4	8,6	2320	19,9	2,05	21,1
2-1	87,1	5,5	2420	13,3	1,30	38,5
2-2	87,8	5,9	2405	14,2	1,35	37,3

Окончание табл. 4.1

1	2	3	4	5	6	7
2-3	84,2	6,2	2390	14,8	1,45	34,1
2-4	79,3	6,9	2410	16,6	1,85	30,6
2-5	89,7	6,4	2420	15,5	2,00	37,6
2-6	87,2	5,7	2410	13,7	1,40	39,1
2-7	87,5	5,3	2420	12,8	1,20	36,5
2-8	66,9	4,8	2430	11,7	1,05	40,5
2-9	85,6	5,5	2380	13,1	2,05	37,7
2-10	65,5	4,1	2430	9,9	1,10	41,1
2-11	88,4	6,5	2390	15,5	1,65	33,6
2-12	89,7	6,9	2370	16,4	1,95	24,7
3-1	69,7	3,5	2470	8,6	1,15	45,1
3-2	70,5	3,8	2450	9,3	1,20	44,3
3-3	68,2	4,0	2450	9,8	1,25	40,8
3-4	65,3	4,2	2460	10,3	1,35	38,6
3-5	71,1	3,9	2470	9,6	1,40	43,4
3-6	69,5	3,8	2450	9,3	1,20	44,0
3-7	70,9	3,2	2450	7,8	1,05	46,9
3-8	64,5	3,0	2490	7,5	1,00	52,7
3-9	69,7	3,1	2390	7,5	1,40	43,3
3-10	62,1	2,8	2470	6,9	0,85	51,5
3-11	76,7	3,9	2420	9,4	1,25	39,8
3-12	80,2	4,3	2390	10,3	1,35	36,7
V, %	2,2–4,8	1,7–3,4	4,3–7,7	-	3,2–4,5	3,8–8,1

Оценку достоверности проводили сравнением расчетных значений морозостойкости с фактическими результатами (табл. 4.5 и 4.6), полученными при проведении испытаний подобранных составов бетона (табл. 2.5), а также сравнением коэффициентов вариации предлагаемой модели с коэффициентами вариации при оценке морозостойкости по методикам [20, 31, 32, 52, 135] (табл. 4.5).

Используя данные табл. 4.1, расчет морозостойкости бетона проводили используя зависимость (3.37). Рассчитывали морозостойкость бетона для двух режимов испытаний образцов (табл. 4.4). Морозостойкость бетона по методике [52] оценивали по значению открытой капиллярной пористости, вычисленной как для образцов

неизвестного состава (табл. 4.3). Морозостойкость бетона по методикам [20, 31, 32, 135] (табл. 4.4) рассчитывали для подобранных составов бетона (табл. 2.5) используя данные табл. 4.1. Для расчета морозостойкости бетона с воздухововлекающими добавками использовали данные [121] (табл. 4.7). Коэффициент, учитывающий влияние дополнительного воздухововлечения, рассчитывали по (3.32).

Таблица 4.2

Расчет морозостойкости тяжелого бетона по зависимости (3.37) для двух режимов испытаний $F-1$ и $F-2$

№ серии	$(В/Ц)_т$	X	α_{\max} , %	k_D для режима		F_6^p для режима	
				$F-1$	$F-2$	$F-1$	$F-2$
1	2	3	4	5	6	7	8
1-1	0,49	1,72	100	0,86	11,67	76	5,5
1-2	0,49	1,96	100	2,00	21,09	30	2,8
1-3	0,49	2,04	100	2,46	25,78	22	2,1
1-4	0,49	1,72	100	0,86	11,67	62	4,6
1-5	0,49	1,72	100	0,86	11,67	73	5,4
1-6	0,47	1,67	100	0,67	10,22	94	6,2
1-7	0,49	1,72	100	0,86	11,67	72	5,3
1-8	0,41	1,45	84	0,28	6,03	213	10,0
1-9	0,46	1,61	100	0,52	8,96	272	15,8
1-10	0,43	1,50	91	0,32	6,88	207	9,8
1-11	0,58	2,04	100	2,46	25,78	19	1,8
1-12	0,63	2,20	100	3,34	38,33	11	1,0
2-1	0,38	1,34	95	0,26	4,63	299	16,6
2-2	0,38	1,53	95	0,36	7,35	202	9,9
2-3	0,38	1,59	95	0,48	8,60	144	8,0
2-4	0,38	1,34	95	0,26	4,63	251	13,9
2-5	0,38	1,34	95	0,26	4,63	277	15,3
2-6	0,37	1,30	91	0,25	4,21	299	17,6
2-7	0,38	1,34	95	0,26	4,63	284	15,7
2-8	0,33	1,15	72,5	0,21	2,89	382	28,2
2-9	0,36	1,27	86	0,24	3,83	489	30,5

Окончание табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8
2-10	0,31	1,07	65,5	0,20	2,39	396	32,5
2-11	0,43	1,50	100	0,32	6,75	213	10,0
2-12	0,46	1,61	100	0,52	8,96	93	5,4
3-1	0,31	1,07	77	0,20	2,39	487	40,0
3-2	0,31	1,26	80	0,24	3,76	404	25,5
3-3	0,31	1,31	80	0,25	4,28	365	21,2
3-4	0,31	1,10	80	0,20	2,57	439	34,6
3-5	0,31	1,10	80	0,20	2,57	457	36,1
3-6	0,31	1,07	77	0,20	2,39	473	38,9
3-7	0,31	1,10	80	0,20	2,57	505	39,8
3-8	0,28	0,98	66	0,18	1,92	593	54,6
3-9	0,29	1,01	70	0,18	2,06	654	58,1
3-10	0,27	0,96	64	0,17	1,78	610	58,3
3-11	0,34	1,19	90	0,22	3,20	399	27,7
3-12	0,37	1,31	100	0,25	4,30	346	20,1

Таблица 4.3

Оценка морозостойкости тяжелого бетона по методике [52]

№ се-рии	Морозостойкость бетона, циклы, при параметрах								
	P_i , %	R_k , МПа	R_0 , МПа	K_i	M_{max}	M_{min}	K_{max}	K_{min}	F_6^P
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1-1	14,8	32,3	55,8	1,73	220	59	2,03	1,16	115
1-2	15,3	30,2	56,8	1,91	216	53	2,03	1,17	76
1-3	15,4	26,4	50,7	1,92	216	53	2,03	1,17	74
1-4	19,7	25,6	45,1	1,74	201	23	2,10	1,19	94
1-5	17,6	33,1	53,3	1,57	207	40	2,07	1,18	133
1-6	14,9	31,5	55,4	1,76	220	59	2,03	1,16	109
1-7	14,5	30,9	51,9	1,68	223	65	1,99	1,16	124
1-8	13,9	34,5	54,4	1,58	230	73	1,98	1,16	150
1-9	14,9	29,4	42,7	1,45	201	26	2,10	1,19	187
1-10	12,5	35,2	52,9	1,50	245	98	1,91	1,14	176
1-11	17,4	24,3	47,8	1,96	207	40	2,07	1,18	61
1-12	19,9	21,1	43,2	2,05	201	23	2,11	1,19	35

Окончание табл. 4.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2-1	13,3	38,5	59,4	1,54	235	80	1,96	1,15	160
2-2	14,2	37,3	58,3	1,56	230	73	1,98	1,16	153
2-4	16,6	30,6	50,4	1,65	210	43	2,05	1,18	120
2-5	15,5	37,6	53,5	1,42	216	53	2,03	1,17	168
2-6	13,7	39,1	57,6	1,47	235	80	1,96	1,15	173
2-7	12,8	36,5	53,7	1,47	240	88	1,94	1,15	178
2-8	11,7	40,5	46,8	1,37	258	120	1,89	1,14	216
2-9	11,5	37,7	44,5	1,18	258	120	1,89	1,14	246
2-10	9,9	41,1	45,6	1,11	280	158	1,78	1,12	282
2-11	15,5	33,6	54,4	1,62	216	53	2,03	1,17	131
2-12	16,4	24,7	44,1	1,72	210	43	2,05	1,18	106
3-1	8,6	45,1	50,6	1,12	300	200	1,66	1,11	298
3-2	9,3	44,3	52,4	1,18	289	170	1,74	1,12	277
3-3	9,8	40,8	49,0	1,20	280	158	1,78	1,12	265
3-4	10,3	38,6	51,4	1,33	273	143	1,80	1,13	234
3-5	9,6	43,4	52,2	1,20	289	170	1,74	1,12	273
3-6	9,3	44,0	46,7	1,06	295	185	1,70	1,11	304
3-7	7,8	46,9	53,0	1,13	315	215	1,61	1,11	311
3-8	7,5	52,7	58,3	1,11	398	330	1,35	1,06	387
3-9	7,5	43,3	45,9	1,06	398	330	1,35	1,06	398
3-10	6,9	51,5	58,8	1,14	398	330	1,35	1,06	379
3-11	9,4	39,8	57,2	1,44	289	170	1,74	1,12	228
3-12	10,3	36,7	66,5	1,81	280	158	1,80	1,13	156

Таблица 4.4

Оценка морозостойкости тяжелого бетона
по методикам [20, 31, 32, 135]

№ се- рии	Морозостойкость бетона, циклы, по методике, представленной в							
	[20]		[31]		[32]		[135]	
	KM^0	F_6^P	K_F	F_6^P	$m, \text{с/см}^3$	F_6^P	K_F	F_6^P
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1-1	0,85	148	3,37	145	4,3	112	8,3	119
1-2	0,77	133	3,29	144	4,0	104	9,4	96
1-3	0,74	126	3,08	141	4,1	107	10,2	78
1-4	0,77	134	2,31	126	4,5	117	10,7	65

Окончание табл. 4.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1-5	0,88	155	2,90	137	3,8	100	8,9	107
1-6	0,91	160	3,43	146	4,2	109	9,4	96
1-7	0,80	139	3,49	147	4,2	109	8,8	109
1-8	1,03	186	3,94	153	5,3	141	7,3	139
1-9	1,06	195	2,93	185	6,0	175	6,4	165
1-10	1,04	188	4,29	158	5,5	147	7,7	131
1-11	0,53	84	2,80	136	3,2	87	11,2	53
1-12	0,52	57	2,34	126	2,1	67	12,3	22
2-1	1,12	204	4,01	205	6,3	177	6,1	161
2-2	1,03	185	3,75	201	6,0	165	6,6	152
2-3	0,94	167	3,37	194	5,7	154	7,2	141
2-4	0,97	173	2,92	184	5,9	162	5,7	169
2-5	0,96	172	3,54	197	6,2	173	5,5	172
2-6	1,15	211	4,00	205	6,6	190	5,2	178
2-7	1,05	190	4,18	208	6,4	181	5,3	176
2-8	1,42	265	4,92	204	6,6	190	2,1	247
2-9	1,30	246	5,11	264	8,4	269	1,9	257
2-10	1,69	321	4,34	211	7,3	223	1,8	259
2-11	0,82	143	3,35	193	4,6	120	7,5	135
2-12	0,67	112	3,06	187	3,7	97	9,4	96
3-1	1,98	380	5,32	337	9,4	362	1,2	294
3-2	1,67	316	4,93	329	8,6	301	1,6	268
3-3	1,42	265	4,41	318	8,9	322	2,3	241
3-4	1,54	289	4,16	312	9,2	346	2,2	244
3-5	1,71	324	4,86	328	9,7	388	1,5	274
3-6	1,88	359	5,05	332	9,5	370	1,2	294
3-7	1,92	367	5,96	349	9,5	370	1,1	303
3-8	2,07	398	5,72	345	10,3	445	0,5	418
3-9	2,21	423	6,35	421	9,6	386	0,4	454
3-10	2,30	445	6,17	353	10,7	488	0,4	466
3-11	1,25	231	5,20	335	7,1	213	3,3	215
3-12	1,02	184	4,76	326	6,6	190	4,7	187

Средний коэффициент вариации для предлагаемой модели составил: для режима $F-1$ – 13,3 % (табл. 4.5); для режима $F-2$ – 14,8 % (табл. 4.6), что не превышает допустимого значения 15 %. Следовательно, предлагаемая модель обеспечивает требуемую достоверность для расчета морозостойкости бетона. Коэффициент вариации при оценке морозостойкости бетонов по предлагаемой модели с воздухововлекающими добавками составил 21,0 %. Хотя значение коэффициента вариации превышает допустимое значение (15 %) можно сделать вывод о том, что и с применением воздухововлекающих добавок предлагаемая модель обеспечивает достаточную для практических целей достоверность. Высокое значение коэффициента вариации можно объяснить тем, что для оценки морозостойкости использовали не собственные данные, а данные [121], в которых отсутствовали необходимые сведения о виде и минералогическом составе применяемого вяжущего, что не позволило учесть полноту факторов при оценке морозостойкости. Сравнение средних значений коэффициентов вариации, полученных при оценке морозостойкости по методикам [20, 31, 32, 52, 135] (табл. 4.5) свидетельствует о том, что из рассмотренных методик самые значительные отклонения фактических значений от расчетных имеют методики [20] и [31] (рис. 4.1).

Далее проведена оценка достоверности зависимости (3.40) для расчета коррозионной стойкости бетона. Для статистической обработки использовали те же составы бетонных смесей, которые использовали для оценки достоверности расчета морозостойкости (табл. 2.5). За структурно-механические характеристики контрольных образцов при испытаниях на коррозионную стойкость приняты данные табл. 4.1. Коррозионную стойкость бетона для двух режимов испытаний образцов вычисляли по (4.40). Потеря прочности была принята 15 %. Статистическую оценку модели для расчета коррозионной стойкости проводили двумя способами: сопоставлением расчетных и фактических значений количества циклов (табл. 4.7) и сопоставлением расчетных значений количества циклов насыщения и высушивания с данными для образцов с известной коррозионной стойкостью [99] (табл. 4.7). Необходимые данные для расчета коррозионной стойкости составов бетона с известной солеустойкостью принимали из [99]. Недостающие данные получали расчетом, в частности, степень гидратации определяли по (3.8) и

(3.9), максимально возможную степень гидратации по (3.12). Значение параметра k_D для принятого в [99] режима испытаний образцов оценивали на основании предварительного испытаний образцов цементного камня, изготовленного из цементного теста с В/Ц = 0,25; 0,3; 0,35 и 0,40. Обработка результатов испытаний позволила получить следующую зависимость для оценки параметра k_D :

$$k_D = 4,11 \cdot \exp(0,38 \cdot X) . \quad (4.3)$$

Количество циклов насыщения и высушивания рассчитывали с учетом допустимой потери прочности образцов 15 %.

Средний коэффициент вариации для предлагаемой модели составил: для режима КС-1 – 13,2 %; для режима F-2 – 14,4 %, что не превышает допустимого значения 15 %. Коэффициент вариации при оценке коррозионной стойкости бетонов с известной солестойкостью составил 15,8 %, что незначительно превышает допустимое значение.

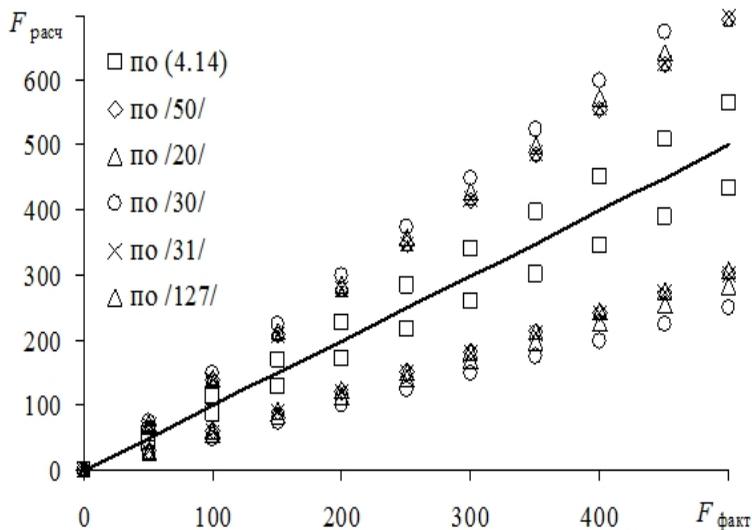


Рис. 4.1. Зависимость расчетной морозостойкости ($F_{расч}$) от фактической ($F_{факт}$) при оценке по различным моделям

Таблица 4.5

Статистическая оценка моделей расчета морозостойкости бетона

№ серии образцов	Коэффициент вариации, % при оценке морозостойкости					
	Прямым методом	Расчетными методами				
		[52]	[20]	[31]	[32]	[135]
1	14,9	42,6	71,2	86,8	56,3	48,1
2	13,7	42,6	71,2	86,8	38,2	35,8
3	11,2	35,1	25,9	28,1	23,6	32,0
Среднее	13,3	39,0	43,1	50,0	39,4	38,6

Таблица 4.6

Статистическая оценка достоверности модели расчета морозостойкости для режима испытаний образцов F-2

№ серии образцов	Коэффициент вариации, % при оценке морозостойкости	
	Прямым методом	Предлагаемым методом
1	-	18,7
2	-	13,3
3	-	12,6
Среднее		14,8

Таблица 4.7

Статистическая оценка достоверности модели расчета солестойкости бетона для режима испытаний образцов КС-1 и КС-2

№ серии образцов	Коэффициент вариации, % при оценке солестойкости по режиму	
	КС-1	КС-2
1	12,7	15,6
2	11,0	12,6
3	16,0	14,9
Среднее	13,2	14,4

5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ МОРОЗОСТОЙКОСТИ И КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННОГО БЕТОНА

5.1. Использование расчетной модели на стадии проектирования и изготовления конструкций

В настоящее время Государственная стратегия обеспечения долговечности бетона в конструкциях и сооружения претерпевает существенное изменение. Кратко предлагаемую стратегию можно сформулировать следующим образом: обеспечение требуемой долговечности бетона на стадии проектирования и изготовления. Следует отметить, что данная идея не нова, аналогичной точки зрения еще в середине прошлого века придерживались известные исследователи морозостойкости бетона академик П. А. Ребиндер и профессор С. В. Шестоперов. Огромный объем проведенных во всем мире научно-исследовательских работ по получению морозо- и коррозионностойкого бетона, лабораторные и натурные эксперименты, практика строительства и эксплуатации различного рода сооружений свидетельствует том, что проблема получения долговечного бетона уже может быть успешно решена известными технологическими приемами с достаточно высокой надежностью. Вариант такого решения существует в европейских нормах EN 206 [136] и действующих в настоящее время ТНПА на проектирование и изготовление бетонных и железобетонных конструкций [137, 138]. Согласно [137, 138] к технологическим факторам, обеспечивающим получение бетона заданной долговечности в различных эксплуатационных средах относятся: максимально допустимое значение водоцементного отношения, минимально допустимый расход цемента и минимальный класс бетона по прочности на сжатие. В этой связи представляет интерес рассмотреть возможность использования предложенной системы прогнозирования на стадии проектирования и изготовления конструкций, в частности при назначении минимальной прочности и водоцементного отношения.

Поскольку в ТНПА действующих на территории Республики Беларусь отсутствует привязка классов по условиям эксплуатации к маркам бетона по морозостойкости, воспользуемся данными

А. М. Подвального [139, 140], который предлагает следующую привязку морозостойкости к классам по условиям эксплуатации (табл. 5.1).

Согласно, действующему ТНПА [131], в табл. 5.2 приведены технологические характеристики, обеспечивающие получение бетона заданной долговечности для указанных классов по условиям эксплуатации.

Таблица 5.1

Соотношение между классами по условиям эксплуатации и морозостойкостью бетона [139, 140]

Соответствующий классу параметр бетона	Классы бетона по условиям эксплуатации			
	XF1	XF2	XF3	XF4
Марка бетона по морозостойкости	F25-F50	F100-F150	F200-F300	F400- F600

Таблица 5.2

Предельные значения параметров, определяющих долговечность бетона [137]

Параметры бетонной смеси	Классы бетона по условиям эксплуатации			
	XF1	XF2	XF3	XF4
Максимальное В/Ц	0,60	0,55	0,50	0,45
Минимальный класс по прочности на сжатие	C25/30	C25/30	C25/30	C30/37
Минимальный расход цемента, кг/м ³	280	300	300	320
Прочие требования	Морозостойкий заполнитель			

Некоторую настороженность при анализе данных, приведенных в табл. 5.2, вызывает то, что ужесточение условий эксплуатации (переход от XF1 к XF3) не влечет за собой и соответствующее повышение класса бетона по прочности на сжатие, что было бы вполне логично. И это тем более странно, что значения требуемого максимального водоцементного отношения сокращаются, а мини-

мальный расход цемента возрастает. На наш взгляд, этот момент в действующих ТНПА требует корректировки.

Для оценки морозостойкости тяжелых бетонов нами была предложена расчетная модель (3.37), которая включает такой параметр, как прочность бетона f_0 к моменту воздействия замораживания и оттаивания. Преобразовав (3.37) соответствующим образом, можем записать

$$f_0 \geq \frac{F_6 \cdot k_D}{2 \cdot \frac{\alpha_{\max}}{\alpha_0 \left(1 - \frac{W_0}{100}\right)_{\text{првсзА}}}}, \text{ МПа.} \quad (5.1)$$

Если принять, что

$$A = \frac{\alpha_{\max}}{\alpha_0 \left(1 - \frac{W_0}{100}\right)_{\text{првсзА}}}, \quad (5.2)$$

где A – структурный параметр, то средняя прочность бетона на сжатие определится как

$$f_0 \geq \frac{F_6 \cdot k_D}{2 \cdot A} = \frac{1}{2} \cdot F_6 \cdot \frac{k_D}{A}, \text{ МПа.} \quad (5.3)$$

Из (5.3) следует, что средняя прочность бетона определяет долговечность материала F_6 в принятых условиях эксплуатации k_D и зависит от структурных характеристик материала A . По зависимости (5.3) можно рассчитать минимальное значение средней прочности бетона, которая обеспечивает требуемую морозостойкость. По значению же средней прочности, задаваясь значением коэффициента вариации, можно перейти к классу бетона по прочности на сжатие.

Используя данные табл. 5.1, по зависимости (5.3), было определено значение средней прочности бетона. Для этого по значению водоцементного отношения (табл. 5.2) определяли водосодержание цементного теста X по (3.10), предварительно рассчитав водоцементное отношение цементного теста по (3.28). Модуль крупности песка принят 2,5, коэффициент нормальной плотности цемента 0,27. Коэффициенты влияния загрязненности смеси заполнителей, алюминатности цемента и дополнительного объема вовлеченного воздуха в (5.2) приняты равными 1,0. Параметр k_D рассчитывали, используя полученные ранее зависимости (3.19) и (3.20) для стандарт-

ного метода испытаний ($F-1$), т.к. долговечность выражена в стандартных циклах замораживания и оттаивания (табл. 5.1).

Для расчета структурного параметра A предварительно определяли значение степени гидратации по (3.8) и (3.9) и максимально возможную степень гидратации цемента по (3.12). Коэффициенты влияния загрязненности смеси заполнителей, алюминатности цемента и дополнительного объема вовлеченного воздуха в (5.2) приняты равными 1,0. Значение объема открытых капиллярных пор W_0 определяли по значению водопоглощения по массе, которое в свою очередь принимали по табл. 5.3, в которой приведены данные, заимствованные из [141].

Таблица 5.3

Водопоглощение бетона, % по массе в зависимости от водоцементного отношения бетонной смеси [141]

Водопоглощение бетона (W_m), % по массе при водоцементном отношении		
0,45	0,55	0,60
до 4,2 (4,2)*	свыше 4,2 до 4,7 (4,5)*	свыше 4,7 до 5,7 (5,2)*

Примечание: в скобках указаны значения, которые использовали для расчета.

Водопоглощение по объему (объем открытых капиллярных пор) определяли по формуле

$$W_0 = \frac{W_m \cdot \rho_0}{\rho_B}, \quad (5.4)$$

где ρ_0 – средняя плотность бетона, кг/м^3 (в расчетах принята равной 2400 кг/м^3);

ρ_B – плотность воды, кг/м^3 (1000 кг/м^3).

Класс бетона определяли по вычисленному значению средней прочности при нормативном коэффициенте вариации 13,5 %. Результаты расчетов сведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Расчетные значения средней прочности и класса бетона
для различных классов по условиям эксплуатации

Класс бетона по условиям эксплуатации	Класс бетона по прочности на сжатие							
	Значение величин в (5.3)				$f_{0\min}$, МПа	$f_{0\max}$, МПа	C_{\min}	C_{\max}
	n_{\min}	n_{\max}	k_D	A				
XF1	25	50	0,68	1,27	7,1	14,3	B7,5	C ⁸ / ₁₀
XF2	100	150	0,37	1,21	15,3	23,0	C ⁸ / ₁₀	C ¹² / ₁ 5
XF3	200	300	0,27	1,14	23,5	35,3	C ¹² / ₁₅	C ²⁰ / ₂ 5
XF4	400	600	0,24	1,09	43,6	65,4	C ²⁵ / ₃₀	C ⁴⁰ / ₅ 0

Анализ данных табл. 5.4 и сравнение рассчитанных значений средней прочности бетона (класса бетона) с нормируемыми значениями, принятыми в ТНПА [131] (табл.5.2) показывает, что расчетные данные не вполне соответствуют принятым в ТНПА значениям. Так для классов по условиям эксплуатации XF1 и XF2 имеет место значительное расхождение расчетных и нормированных значений, меньше для XF3 и практически полное совпадение для XF4. Это может быть вызвано тем, что оценка агрессивности сред XF1 и XF2 принятая в [132, 133] разнится с оценкой, принятой в Европейских нормах. Если руководствоваться значениями классов бетона по прочности на сжатие полученных расчетом (табл. 5.4), то для классов по условиям эксплуатации XF1-XF3 возможна существенная экономия цемента без опасности снижения долговечности бетонных и железобетонных конструкций. В целом же проведенные расчеты показали возможность использования предлагаемой модели для определения технологических параметров, обеспечивающих получение долговечного бетона, что позволяет предложить ее использование для практических целей, а именно при проектировании составов морозостойких и коррозионностойких бетонов.

5.2. Методики проектирования состава тяжелого (конструкционного) бетона с учетом требований по морозостойкости

По общепринятой схеме методика проектирования состава бетона реализуется в два этапа. На первом этапе определяют состав бетона, который обеспечивает требуемые значения удобоукладываемости бетонной смеси и прочности бетона, а на втором – предполагаемую морозостойкость бетона [198]. В основе разрабатываемой методики проектирования состава бетона лежат исследования, представленные в [142–146].

Проектирование состава бетона начинают с определения водоцементного отношения бетонной смеси, которое удобно рассчитывать, основываясь на формуле, предложенной в [101]:

$$\left(\frac{B}{Ц}\right)_c = \frac{0,3 \cdot k_3 \cdot f_{ц}}{k_{то} \cdot f_б} + 0,1, \quad (5.5)$$

где k_3 – коэффициент, зависящий от качества заполнителей (для щебня принимают равным 1,0, а для гравия – 0,9);

$f_{ц}$ – активность цемента, МПа;

$k_{то}$ – коэффициент, зависящий от отпускной прочности бетона;

$f_б$ – прочность бетона, МПа.

Величину отпускной прочности бетона можно учесть следующим образом [146]:

$$k_{то} = 1 + 0,009 \cdot (f_{отп} - 70), \quad (5.6)$$

где $f_{отп}$ – отпускная прочность бетона, %.

Поскольку разрабатываемая методика проектирования состава бетона ориентирована в первую очередь на прогнозирование морозостойкости, к недостаткам формулы (5.5) можно отнести то, что ею не учитываются как содержание воздуха в бетонной смеси (вовлеченный в бетонную смесь воздух – результат применения соответствующих химических добавок), так и загрязненность заполнителей. Попытаемся устранить указанные недостатки.

Фактически по формуле (5.5) рассчитывают не водоцементное отношение бетонной смеси, а отношение суммы объемов воды и воздуха к расходу цемента. Учет содержания воздуха в бетоне не

нов и предложен еще на заре развития бетоноведения Р. Фере. Формула для расчета прочности бетона в его редакции [147] выглядит следующим образом:

$$f_b = K \cdot \frac{C}{B+V}, \text{ МПа.} \quad (5.7)$$

где K – коэффициент, зависящий от активности цемента;

C, B – абсолютные объемы цемента и воды;

V – объем воздушных пор в единице объема бетона.

Таким образом, фактически при введении воздухововлекающих и микрогазообразующих добавок можно записать:

$$\left(\frac{B}{\Pi}\right)_b = \left(\frac{B+B_v}{\Pi}\right)_b, \quad (5.8)$$

где B_v – объем воздушных пор, л.

Учет загрязненности заполнителя, т.е. содержание в них глины, ила и пыли осуществляют в (5.5) посредством коэффициента k_3 . Для получения численного значения коэффициента можно воспользоваться данными, представленными в [131]. После соответствующей обработки приведенных в табл. 22 данных из этого источника, а также проведения дополнительных экспериментов получена следующая зависимость для определения коэффициента:

$$k_3 = 1 + 0,04 \cdot (0,35 \cdot G_{\text{гл}}^{\text{II}} + 0,65 \cdot G_{\text{гл}}^{\text{III}})^{1,5}, \quad (5.9)$$

где $G_{\text{гл}}^{\text{II}}, G_{\text{гл}}^{\text{III}}$ – содержания пылевидных, глинистых и илистых частиц в заполнителе, % от массы мелкого и крупного заполнителя соответственно.

В (5.9) доля песка в смеси заполнителей принята в среднем 0,35. Далее рассчитывают водоцементное отношение цементного теста:

$$\left(\frac{B}{\Pi}\right)_t = (0,58 + 0,07 \cdot M_k) \cdot \left(\frac{B}{\Pi}\right)_b, \quad (5.10)$$

и относительное водосодержание цементного теста:

$$X = \frac{\left(\frac{B}{\Pi}\right)_T}{K_{\text{НГ}}}, \quad (5.11)$$

где $K_{\text{НГ}}$ – коэффициент нормальной густоты цемента, соответствующий водоцементному отношению цементного теста нормальной густоты (НГ в %): $K_{\text{НГ}} = \frac{\text{НГ}}{100}$.

Затем определяют предельную (согласно воззрениям профессора И. Н. Ахвердова [93]) водоудерживающую способность цементного теста (верхняя граница связности цементного теста):

$$\left(\frac{B}{\Pi}\right)_T^{\text{п}} = 1,65 \cdot K_{\text{НГ}}. \quad (5.12)$$

Водопотребность бетонной смеси рассчитывают по формулам в зависимости от водоцементного отношения цементного теста при

$$\left(\frac{B}{\Pi}\right)_T \geq \left(\frac{B}{\Pi}\right)_T^{\text{п}}:$$

$$B = \frac{B_0}{1 - \left(\frac{B}{\Pi}\right)_T^{\text{п}} \cdot k_y}, \quad (5.13)$$

а при $\left(\frac{B}{\Pi}\right)_T < \left(\frac{B}{\Pi}\right)_T^{\text{п}}$:

$$B = \frac{B_0}{1 - \left(\frac{B}{\Pi}\right)_T^{\text{п}} \cdot k_y} + 10 \cdot \text{НГ} \left[\left(\frac{B}{\Pi}\right)_T^{\text{п}} - \left(\frac{B}{\Pi}\right)_T \right]. \quad (5.14)$$

Проанализируем формулы (5.13) и (5.14), посредством которых учитываются основные факторы, влияющие на водопотребность бетонной смеси. Величина расхода воды для сверхжесткой бетонной смеси (на чистых заполнителях, крупном песке и щебне крупностью до 20 мм) может быть принята равной 110 кг (B_0), что соответствует нижней границе связности цементного теста. Величина коэффициента k_y , определяется удобоукладываемостью бетонной смеси и равна [146]:

– для подвижной бетонной смеси в зависимости от осадки конуса (ОК в см):

$$k_y = 0,7 + 0,094\sqrt{\text{ОК}}; \quad (5.15)$$

– для жесткой бетонной смеси в зависимости от показателя жесткости (Ж в с):

$$k_v = 1,05 \left(\frac{1}{Ж} \right)^{0,16}. \quad (5.16)$$

Если свойства заполнителей отличны от указанных выше, то к рассчитанному по (5.13) или (5.14) расходу воды прибавляются поправки, значения которых могут быть определены из рекомендаций, представленных в [131].

Расход цемента рассчитывают с учетом содержания воздуха, вовлеченного в бетонную смесь при введении воздухововлекающих (и иных подобных) добавок:

$$Ц = \frac{B+10 \cdot V_B}{\left(\frac{B}{Ц} \right)_б}, \quad (5.17)$$

где V_B – воздухововлечение бетонной смеси, д. ед.

Объем вовлеченного (защемленного) воздуха V_B определяют экспериментально или расчетом по следующим зависимостям [121]:

$$V_B = 24,1 + 0,52 \cdot Ж - 1,1 \cdot D_{щ} + 0,0005 \cdot Ж^2 + 0,013 \cdot D_{щ}^2 - 0,006 \cdot Ж \cdot D_{щ}, \quad \% , \quad (5.18)$$

или

$$V_B = 27,1 - 1,19 \cdot ОК - 0,44 \cdot D_{щ} + 0,02 \cdot ОК^2 + 0,003 \cdot D_{щ}^2 + 0,01 \cdot ОК \cdot D_{щ}, \quad \% , \quad (5.19)$$

где Ж – жесткость бетонных смесей, с. (по техническому вискозиметру);

$D_{щ}$ – наибольшая крупность зерен крупного заполнителя, мм;

ОК – осадка конуса бетонных смесей, см.

Объем цементного теста определяют по формуле

$$V_m = \frac{Ц}{\rho_c} + \frac{B}{\rho_B} + 0,01 \cdot V_B, \quad \text{м}^3, \quad (5.20)$$

где ρ_c и ρ_B – плотность цемента и воды соответственно, кг/м³.

Затем рассчитывают долю песка в смеси заполнителей:

$$r = 45 - 14 \cdot (1 - V_m)^{1,5}, \%, \quad (5.21)$$

и, наконец, расходы мелкого и крупного заполнителей:

$$\Pi = 0,01 \cdot r \cdot (1 - V_m) \cdot \rho_n, \text{ кг}, \quad (5.22)$$

$$\text{Щ} = (1 - 0,01 \cdot r) \cdot (1 - V_m) \cdot \rho_{\text{щ}}, \text{ кг}, \quad (5.23)$$

где ρ_n , $\rho_{\text{щ}}$ – плотность зерен мелкого и крупного заполнителя соответственно, кг/м³.

Итак, запроектирован состав бетона, обеспечивающий требуемую удобоукладываемость бетонной смеси и прочность бетона. Далее необходимо рассчитать предполагаемую морозостойкость бетона.

Морозостойкость бетона определяют, используя зависимость (3.37). При этом допустимая потеря прочности бетона (δ) принимается равной 5 %.

Величину прочности к моменту начала замораживания и оттаивания (f_0) принимают равной прочности бетона в проектном возрасте.

Все параметры и коэффициенты, входящие в (3.37) определяются по предложенным ранее зависимостям.

Если рассчитанная величина морозостойкости бетона меньше проектного значения, то состав бетона пересчитывают, начиная с уравнения (5.5), увеличивая прочность бетона и уменьшая тем самым водоцементное отношение.

5.3. Пример проектирования состава тяжелого (конструкционного) бетона с учетом требований по морозостойкости

Исходные данные.

Требования к бетону. Проектный класс по прочности на сжатие $C^{25}/_{30}$. Требуемая марка бетона по морозостойкости F200.

Требования к бетонной смеси. Марка по подвижности П2.

Материалы для приготовления бетонной смеси.

Вяжущее – портландцемент ПЦ-500-Д0; $f_{\text{ц}} = 49,2$ МПа; НГ = 25 %.
Истинная плотность – 3100 кг/м³.

Мелкий заполнитель – песок природный с $M_k = 2,6$. $P_{отм} = 2,1$ % по массе. Истинная плотность – 2650 кг/м^3 .

Крупный заполнитель – гранитный щебень фр. 5–20 мм. $P_{отм} = 1,5$ % по массе. Плотность зерен – 2600 кг/м^3 .

Химическая добавка – воздухововлекающая добавка «Микропоран».

Определяем коэффициент, зависящий от отпускной прочности бетона:

$$k_{то} = 1 + 0,009 \cdot (100 - 70) = 1,27.$$

Определяет коэффициент, зависящий от загрязненности заполнителей:

$$k_3 = 1 + 0,04 \cdot (0,35 \cdot 2,1 + 0,65 \cdot 1,5)^{1,5} = 1,09.$$

Определяем водоцементное отношение бетонной смеси

$$\left(\frac{B}{Ц}\right)_б = \frac{0,3 \cdot 1,09 \cdot 49,2}{1,27 \cdot 38,6} + 0,1 = 0,37.$$

Уточняем водоцементное отношение бетонной смеси с учетом объема вовлеченного воздуха:

$$\left(\frac{B}{Ц}\right)_б = \left(\frac{B+B_B}{Ц}\right)_б = 0,39.$$

Рассчитываем водоцементное отношение цементного теста:

$$\left(\frac{B}{Ц}\right)_т = (0,58 + 0,07 \cdot 2,6) \cdot 0,39 = 0,29.$$

Относительное водосодержание цементного теста:

$$X = \frac{0,29}{0,25} = 1,16.$$

Определяем предельную водоудерживающую способность цементного теста (верхняя граница связности цементного теста):

$$\left(\frac{B}{Ц}\right)_т^n = 1,65 \cdot 0,25 = 0,41.$$

Определяем водопотребность бетонной смеси при

$$\left(\frac{B}{Ц}\right)_T < \left(\frac{B}{Ц}\right)_T^П \quad B = \frac{80}{1-0,41 \cdot 0,95} + 10 \cdot 25 \cdot [0,41 - 0,29] = 162 \text{ кг.}$$

Для подвижной бетонной смеси в зависимости от осадки конуса коэффициент равен

$$k_v = 0,7 + 0,094\sqrt{7} = 0,95.$$

Определяем расход цемента:

$$Ц = \frac{162+10 \cdot 0,0737}{0,39} = 417 \text{ кг,}$$

где объем вовлеченного (защемленного) воздуха V_b равен

$$V_b = 27,1 - 1,19 \cdot 7 - 0,44 \cdot 20 + 0,02 \cdot 7^2 + 0,003 \cdot 20^2 + 0,01 \cdot 7 \cdot 20 = 7,37 \text{ \%}.$$

Определяем объем цементного теста:

$$V_m = \frac{417}{3100} + \frac{162}{1000} + 0,01 \cdot 7,37 = 0,37 \text{ м}^3.$$

Доля песка в смеси заполнителей:

$$r = 45 - 14 \cdot (1 - 0,37)^{1,5} = 38 \text{ \%}.$$

Расходы мелкого и крупного заполнителей:

$$П = 0,01 \cdot 38 \cdot (1 - 0,37) \cdot 2650 = 634 \text{ кг,}$$

$$Щ = (1 - 0,01 \cdot 38) \cdot (1 - 0,37) \cdot 2600 = 1016 \text{ кг.}$$

Определяем объем открытых капиллярных пор бетона:

$$W_o = 0,37 \cdot \left[0,29 - 0,23 \cdot \frac{68,5}{100}\right] = 0,049 \text{ д. ед.}$$

Определяем параметр k_D для базового режима испытаний образцов на морозостойкость:

$$k_D^{F^{-1}} = 0,07 + 0,22 \cdot (1,19 - 0,5) = 0,22, \text{ Мпа / цикл.}$$

Определяем коэффициенты, учитывающие влияния загрязненности смеси заполнителей, объема вовлеченного воздуха и вида цемента на морозостойкость бетона:

$$k_{\text{III}} = 1 - 0,02 \cdot \sqrt{2^3} = 0,94,$$

$$k_B = 1 + 0,02 \cdot 7,37^2 = 2,08,$$

$$k_{C_3A} = 1 - 0,0015 \cdot (5,2 - 2)^2 = 0,99.$$

Далее воспользовавшись формулой (3.37) определяем морозостойкость бетона:

$$F_{\bar{6}} = \frac{2 \cdot \left(1 + \frac{5}{100}\right) \cdot f_0 \cdot \frac{72,1}{68,5} \cdot \left(1 - \frac{4,9}{100}\right)}{0,22} \cdot 0,94 \cdot 2,08 \cdot 0,99 = 757 \text{ циклов.}$$

Подобранный состав бетона обеспечивает требуемую марку бетона по морозостойкости.

6. СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ БЕТОНА И КОРРОЗИОННОЕ СОСТОЯНИЕ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ

6.1. Депассивация стальной арматуры железобетонных конструкций

Переход состояния стали из пассивного состояния в активное – основное условие начала коррозионного процесс. Какие бы ни были благоприятные условия для начала коррозии арматуры (высокая влажность окружающей среды и бетона, наличие деполяризатора и др.), она не начнется, пока сталь находится в пассивном состоянии [148].

Систематизируем основные факторы, предположительно могущие вызвать процесс активации арматуры.

Снижение щелочности поровой жидкости ниже критической величины: $pH = 11,8$. Это может быть спровоцировано, во-первых, применением вяжущих, потенциально не дающих высокого значения щелочности, например, глиноземистого цемента, кислотоупорного цемента на основе жидкого стекла, различных смол для получения полимербетонов [149] и др. Во-вторых, изменение щелочности поровой жидкости может быть наблюдаться в процессе эксплуатации железобетонной конструкции при взаимодействии продуктов гидратации клинкера, в первую очередь гидроокиси кальция, с активными минеральными добавками. Активные (а также и инертные) минеральные добавки в бетон могут вводиться как с целью экономии вяжущего, например, при применении высокомарочных цементов для производства низкопрочных бетонов. Кроме того, данный технологический прием используется и при реализации специфических задач – например, при коррозии бетона первого вида (выщелачивании) рекомендуют применение именно активных минеральных добавок с целью связывания свободной гидроокиси кальция, но забывая при этом о том, что повышается риск начала коррозии стальной арматуры. При применении легких бетонов следует считаться с возможностью связывания достаточно активных тонкодисперсных фракций, содержащихся в крупном заполнителе, и особенно в пористом песке, со свободной гидроокисью кальция при тепловой обработке бетона. К реакционноспособным материалам можно отнести керамзит, аглопорит, перлит и др. В-третьих, в последние годы становится популярной обработка подсушенных поверхностных слоев

бетонных и железобетонных конструкций (особенно дорожных покрытий и мостовых конструкций) водными растворами фторидов (и иных веществ). Обработка поверхности бетона на глубину нескольких мм резко повышает плотность образующейся своеобразной «корочки» и соответственно непроницаемость бетона. Это значительно дешевле, чем, например, увеличивать водонепроницаемость бетона посредством снижения водоцементного отношения (в первую очередь повышением расхода цемента) или введением разнообразных уплотняющих добавок. Однако в данном случае толщина защитного слоя чисто механически остается постоянной, но фактически защитные свойства бетона в перспективе должны снижаться, поскольку уже существенная часть бетона утратила свои защитные свойства по отношению к стальной арматуре – в результате обработки реагентом щелочность поровой жидкости снижается ниже критического значения. Следует отметить, что данные о коррозионной стойкости стальной арматуры после обработки реагентами отсутствуют и вопрос требуют тщательного изучения.

Использование при изготовлении железобетонных изделий вяжущих, заполнителей, воды, химических добавок, содержащих ионы, способные в перспективе вызвать активацию стали. Проводя аналогию с многочисленными достаточно достоверными данными, полученными для чистых металлов в нейтральных средах (рН около 7), можно отметить, что наиболее агрессивны ионы хлора, интенсивно разрушающие пассивирующую пленку на поверхности стальной арматуры. Далее в ряду снижения агрессивности ионов можно поставить сульфаты, нитраты и т. д. Что касается ионов хлора, то их отрицательное влияние на сталь равным образом может быть распространено и на стальную арматуру железобетонных конструкций. Что касается иных ионов, то их отрицательное воздействие на металл под слоем бетона весьма спорно. В литературе отсутствуют прямые указания на то, что, например, сульфаты или нитраты способны вызвать депассивацию стали с ее последующей коррозией. Более того, добавка сульфата натрия широко используется в качестве эффективного ускорителя твердения бетона и документы, ограничивающие ее применение, отсутствуют. Равным образом сказанное относится и к нитратам, например, нитрату кальция, – добавке, достаточно эффективно повышающей плотность бе-

тона. Разумеется, приведенные рассуждения распространяются лишь на ненапряженную арматуру. Если арматура напряжена, то может иметь место качественно иной вид коррозии, а именно коррозионное растрескивание, особенно эффективно проявляющее себя именно в присутствии выше означенных ионов. Таким образом, основное внимание должно быть уделено компонентам бетонной смеси, содержащим хлориды. Надо отметить, что в нашей стране вяжущие, содержащие свободные водорастворимые хлор-ионы, не производятся, и, вероятно, не используются. Гранитный щебень также потенциально не может содержать хлориды в достаточно большом количестве. Мелкий заполнитель определенных месторождений вполне может содержать ионы хлора, но вероятность наличия их в мытом песке весьма низка. Вода для затворения бетона, в отличие от стран, использующих для этой цели морскую воду, практически не содержит ионы хлора в количестве, достаточном для активации стальной арматуры. Таким образом, основное внимание должно быть уделено именно химическим добавкам, потенциально содержащим ионы хлора в количестве, превышающем критическое значение. Не в полной мере в литературе нашло отражение влияние добавок ингибиторов коррозии стальной арматуры на изменение длительности пассивного состояния арматуры, в том числе при наличии в поровой жидкости бетона активирующих ионов. Есть качественное описание процесса, однако количественное влияние той либо иной добавки ингибитора на критическое содержание, например, хлор-ионов, практически отсутствует. Вопрос усложняется тем, что как ионы хлора, так и ингибирующие процесс коррозии стали ионы способны реагировать, причем с непредсказуемой интенсивностью, как непосредственно с компонентами вяжущего, так и с продуктами его гидратации.

Одним из факторов, вызывающих активацию стальной арматуры, может быть нарушение функций защитного слоя бетона в процессе эксплуатации железобетонных конструкций. Во-первых, практически в любых эксплуатационных условиях неизбежно идет химическая реакция взаимодействия углекислого газа воздуха, проникающего из окружающей среды в капиллярно-пористую структуру бетона, со свободной гидроксидом кальция с образованием карбоната кальция и снижением щелочности поровой жидкости вплоть до величины $pH = 9$. Этот процесс практически не может быть

предотвращен, идет послойно и при достижении фронтом карбонизированного бетона поверхности стальной арматуры происходит переход ее из пассивного состояния в активное. Для прогнозирования этого процесса существуют достаточно точные расчетные многофакторные модели. Во-вторых, следует учитывать возможное поступление агрессивных ионов извне в тело эксплуатирующейся железобетонной конструкции. Обычно это относится к водным растворам агрессивных веществ, содержащих ионы хлора и контактирующих с поверхностью железобетонных конструкций. Вследствие диффузии ионов хлора в водонасыщенном или влажном бетоне они постепенно накапливаются в приарматурной зоне защитного слоя и при превышении количества ионов критического значения начинается активация стали. В определенных условиях (например, при избытке агрессивного раствора и малой влажности бетона) проникновение агрессивного раствора осуществляется посредством капиллярного всасывания и депассивация стали происходит весьма быстро. Для данного направления также существуют достаточно глубокие исследования, позволяющие с приемлемой для практических целей точностью прогнозировать долговечность железобетонных конструкций. Вместе с тем, следует отметить, что при рассмотрении этого вопроса критическое количество агрессивных ионов будет иным, чем в предыдущем случае, рассматриваемом влияние добавок, содержащих агрессивные компоненты, на стадии изготовления конструкции. Это объясняется тем, что поскольку гидратационные процессы в основном завершены, то взаимодействие хлор-ионов (или иных агрессивных ионов) с продуктами гидратации цемента либо невозможно, либо несущественно.

Разрушение защитного слоя бетона в процессе эксплуатации железобетонных конструкций вплоть до оголения поверхности арматуры может происходить за счет чисто механического нарушения защитного слоя в результате ударов, образования трещин, нарушения защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре в результате коррозии бетона. При коррозии 1 вида выщелачивание гидроокиси кальция неизбежно приводит к снижению щелочности поровой жидкости бетона; послойное разрушение защитного слоя при коррозии 2 вида снижает его толщину и, соответственно, саму функцию защиты; образование сети микроотре-

щин или механическое разрушение бетона защитного слоя при коррозии 3 вида. Кроме того, при недостаточной морозостойкости бетона также разрушается защитный слой вплоть до оголения стальной арматуры. Данные вопросы достаточно специфические и для их решения вряд ли могут быть даны обобщенные критерии стойкости стальной арматуры в тех либо иных условиях.

Таким образом, проанализировав основные причины депассивации стальной арматуры, можно наметить основное направление исследований: уточнить критическое количество добавок, активирующих коррозионный процесс стальной арматуры, в первую очередь хлор-ионов, в том числе при применении ингибиторов коррозии стали.

6.2. Коррозионная стойкость стальной арматуры при введении добавок, содержащих хлор-ионы

Критическая концентрация ионов хлора, накапливаемая в приарматурной зоне бетона (слой цементного камня либо бетона, непосредственно соприкасающийся с поверхностью арматуры), является одним из основных факторов, определяющих длительность пассивного состояния стали. Считается, что при накоплении хлор-ионов в количестве, превышающем критическое, наступает переход стали из пассивного состояния в активное с неизбежной последующей коррозией. Фактически критическая концентрация определяет продолжительность индукционного периода (время от начала эксплуатации конструкции до момента активации стальной арматуры) и ее знание устанавливает точность прогноза долговечности железобетонных конструкций в условиях воздействия сред, содержащих ионы хлора. Обычно полагают, что содержание хлоридов (в пересчете на ионы хлора) в количестве 0,4 % от массы цемента является достаточно гарантированной границей пассивного состояния стальной арматуры. Однако следует отметить, что сведения о численной величине критической концентрации противоречивы, пример ее систематизации [150] (выборка из нормативных документов) проведен в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Критическое количество хлор-ионов в бетоне

Страна	Нормативный документ	Критическая концентрация хлор-ионов
СССР	СНиП 2.03.11-85	Для железобетонных конструкций менее или равно 0,4 % от массы цемента. Для предварительно напряженных конструкций менее или равно 0,1 % от массы цемента. Для определенных оговоренных конструкций не допускается
США	Комитет 201 American Concrete Institute	Менее или равно 0,15 % в железобетонных конструкциях во влажной неагрессивной не содержащей хлоридов среде. Менее или равно 0,1 % в железобетонных конструкциях во влажной агрессивной, в том числе содержащей хлориды среде. Менее или равно 0,06 % в предварительно напряженных конструкциях
США	Стандарт 318-83 American Concrete Institute	Менее или равно 1 % в железобетонных конструкциях в сухой среде
США	Стандарт ASTM C	Менее или равно 0,08 % в предварительно напряженных железобетонных конструкциях
Япония	Стандарт	Менее или равно 0,6 кг в 1 м ³ бетона. Менее или равно 0,3 кг в 1 м ³ в товарном бетоне на месте отгрузки Менее или равно 0,04 % в мелком заполнителе в расчете на NaCl

На территории ЕС действуют нормы, близкие по значениям СНиП 2.03.11-85 (табл. 6.2)

Таблица 6.2
Максимальное допустимое содержание хлоридов в бетоне

Бетон	Максимальная доля Cl ⁻ в % от массы цемента
Неармированный бетон	1,0
Железобетон	0,4
Напряженный железобетон	0,2

Проанализировав данные табл. 6.1 и 6.2, нетрудно убедиться в том, что количественно критерии различаются между собой. Что касается результатов отдельных исследований, то величины критической концентрации еще более разнообразны как в количественном отношении, так и по самой технике оценки. Оценка может быть проведена не только по количеству ионов хлора, но и по общему содержанию добавки, агрессивной с точки зрения воздействия на арматуру. Например, для добавки ПВК установлено [151], что при ее содержании до 1,75 от массы цемента арматура находится в пассивном состоянии, а при 2 % – в неустойчивом состоянии. И рекомендуется вводить ПВК до 1,5 %.

Электрохимические исследования, описанные в [152], показали, что при содержании хлор-ионов 0,5 % от массы цемента наступает разрыв пассивирующей пленки, а при большем количестве – активация стали. При этом отмечается, что эта величина (0,5 %) не является постоянной, а зависит от плотности и влажности бетона. Следует обратить внимание на отмеченное замечание о возможном влиянии плотности бетона на его защитные свойства в присутствии агрессивных ионов. В табл. 6.1 и 6.2 этот фактор отсутствует и требует обязательного уточнения.

Для уточнения границ применения добавок, содержащих ионы хлора (еще раз отметим, что именно эти ионы считаются наиболее агрессивными по отношению к чистой стали) были поставлены эксперименты, в которых варьировались структурные особенности бетона, определяемые в первую очередь расходом цемента и водоцементным отношением (табл. 6.3).

Расход цемента изменялся от 220 до 600 кг, а водоцементное отношение – от 0,33 до 1,02, то есть охватывался практически весь диапазон используемых в настоящее время бетонов. Подвижность бетонных смесей составляла от 2 до 21 см, что обеспечивало слитную структуру бетона. Жесткие смеси в опытах не использовали, поскольку трудно учесть последующее влияние раковин и иных дефектов, возникающих из-за недостаточного уплотнения бетонной смеси. В опытах использовали портландцемент ПЦ500-Д0 ОАО «Красносельск-стройматериалы», мытые гранитный щебень и кварцевый песок, питьевую воду.

Применение мытых заполнителей позволило исключить возможное влияние находящихся в них хлор-ионов. Расчетные (с помощью компьютерной программы «Технолог») характеристики бетона различных составов приведены в табл. 6.4.

Как следует из данных, представленных в табл. 6.4, прочностные и структурные характеристики бетонов также различаются в весьма широких пределах.

Для каждого состава (табл. 6.3) вводились добавки хлористого натрия (из расчета 0,4, 0,6 % и 0,8 % от массы цемента) (табл. 6.5).

Таблица 6.3

Составы бетона

№ состава	Расход, кг на 1м ³ бетона				В/Ц
	Цемент	Песок	Щебень	Вода	
1	220	796	1175	180	0,82
2	220	789	1135	198	0,90
3	220	755	1098	225	1,02
4	300	735	1170	180	0,60
5	300	735	1122	198	0,66
6	300	696	1090	225	0,75
7	400	659	1160	181	0,45
8	400	641	1130	199	0,50
9	400	625	1080	224	0,56
10	600	483	1130	196	0,33
11	600	467	1095	215	0,36
12	600	428	1064	242	0,40

Таблица 6.4

Характеристики бетона

№ состава	Марка смеси	f , МПа	F , циклы	W , атм
1	П1	21,6	25	2,0
2	П2	19,7	25	2,0
3	П4	19,3	25	2,0
4	П1	31,2	80	3,6
5	П2	27,3	25	2,0
6	П4	24,6	25	2,0
7	П1	42,9	360	7,9
8	П2	38,2	275	6,5
9	П4	33,8	142	4,4
10	П1	65,1	613	13,1
11	П2	57,8	552	11,7
12	П4	49,7	462	9,48

Таблица 6.5

Расход добавки в кг/м³

№ состава	NaCl, кг/м ³ , при содержании хлор-ионов, % от массы цемента		
	0,4 %	0,6 %	0,8 %
1	1,45	2,18	2,90
2	1,45	2,18	2,90
3	1,45	2,18	2,90
4	1,98	2,97	3,95
5	1,98	2,97	3,95
6	1,98	2,97	3,95
7	2,64	3,95	5,27
8	2,64	3,95	5,27
9	2,64	3,95	5,27
10	3,95	5,93	7,91
11	3,95	5,93	7,91
12	3,95	5,93	7,91

В опытах применяли именно добавку хлористого натрия, а не иные вещества, содержащие хлор-ионы (например, хлористый кальций), поскольку NaCl согласно современным воззрениям не оказывает существенного влияния на процессы структурообразования цементного теста и камня и коррозионное разрушение бетона.

Для изготовления армированных образцов (размером $70 \times 70 \times 140$ мм) использовали формы 2 ФК 70. Торцы арматурных стержней защищались быстротвердеющей мастикой на основе эпоксидной смолы с добавкой цемента в качестве наполнителя.

Образцы твердели в нормальных условиях в течение 28 суток. Коррозионное состояние стальной арматуры оценивали в соответствии с методиками, представленными в [154–156]. Скорость поляризации стальной арматуры при снятии анодных поляризационных кривых была принята равной 20 мВ/мин. Поляризационные кривые, откорректированные с учетом электрического сопротивления образцов, полученные через 20 циклов испытаний насыщения/высушивания, представлены на рис. 6.1–6.16. Начальные кривые, а также полученные через 10 циклов испытаний, не показаны, поскольку нас интересует защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре уже после затухания гидратационных процессов.

Систематизируем полученные результаты, основываясь на связи водоцементного отношения бетонной смеси плотности тока при потенциале +300 мВ (не более 10 мкА/см^2) и стационарного потенциала арматуры (не менее -350 мВ по нормальному каломельному электроду), как критериев границы «пассивного-активного» состояния стальной арматуры (гистограммы на рис. 6.17 и 6.18).

В соответствии с полученными результатами можно сделать основной вывод: введение в бетон на стадии изготовления 0,6 % от массы цемента, а тем более 0,4 % хлор-ионов явной коррозии стальной арматуры не вызывает. Сталь находится в устойчивом пассивном состоянии. Характерно, что увеличение расхода цемента, а, следовательно, снижение водоцементного отношения и повышение плотности бетона подавляют отрицательное воздействие хлор-ионов. И это несмотря на то, что при расходе цемента 600 кг общее содержание вводимых в бетон хлор-ионов в два раза больше, чем при расходе цемента 300 кг. Намечается явная тенденция возрастания защитных свойств бетона с повышением расхода цемента. Вместе с тем, при равном расходе цемента, защитные свойства бетона

ухудшаются с увеличением расхода воды и повышением тем самым подвижности бетонной смеси и капиллярной пористости бетона: плотность тока увеличивается, а стационарный потенциал разблагораживается.

В целом, полученные результаты соответствуют общепринятым. Например, согласно графикам на рис. 6.19 [153], в бетоне с добавкой 0,5 % хлор-ионов стальная арматура находится в устойчивом пассивном состоянии, но только в проектном возрасте. В раннем же возрасте (7 суток после изготовления) сталь находится в активном состоянии и склонна к коррозии. Этот, казалось бы, противоречивый факт объясняется связыванием хлор-ионов в малорастворимые гидрохлоралюминаты кальция с естественной потерей части агрессивных свойств по отношению к стали [168]. На рис. 6.20 приведены данные по кинетике связывания хлорида кальция [168]. Обработка нами этих данных (рис. 6.21) показывает, что в нерастворимые и малорастворимые соединения может связаться до 40 % введенной добавки хлорида. И это явление объясняет кажущееся противоречие полученных нами результатов. Да, при расходе цемента 600 кг количество вводимых ионов хлора в два раза больше, чем при расходе цемента 300 кг. Но и количество связываемых хлор-ионов в первом случае также будет существенно больше, чем во втором.

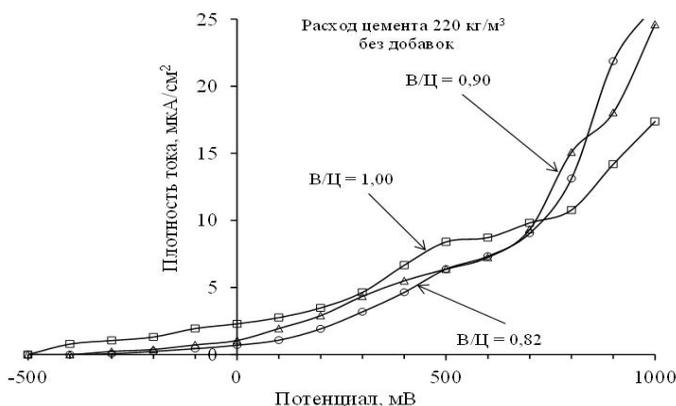


Рис. 6.1. Влияние водоцементного отношения в бетоне без добавок при расходе цемента 220 кг/м³ на коррозионное состояние стальной арматуры

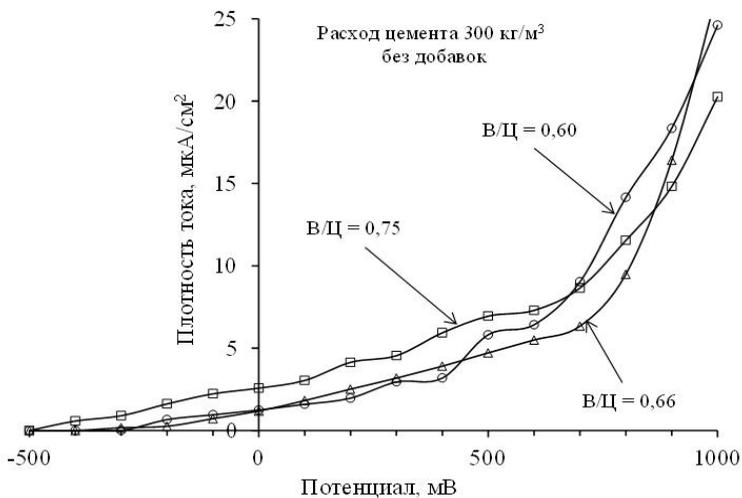


Рис. 6.2. Влияние водоцементного отношения в бетоне без добавок при расходе цемента 300 кг/м³ на коррозионное состояние стальной арматуры

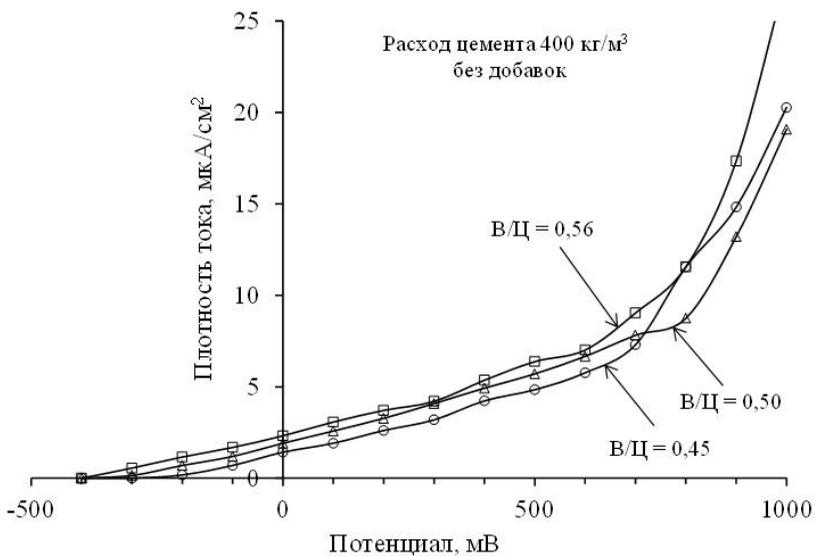


Рис. 6.3. Влияние водоцементного отношения в бетоне без добавок при расходе цемента 400 кг/м³ на коррозионное состояние стальной арматуры

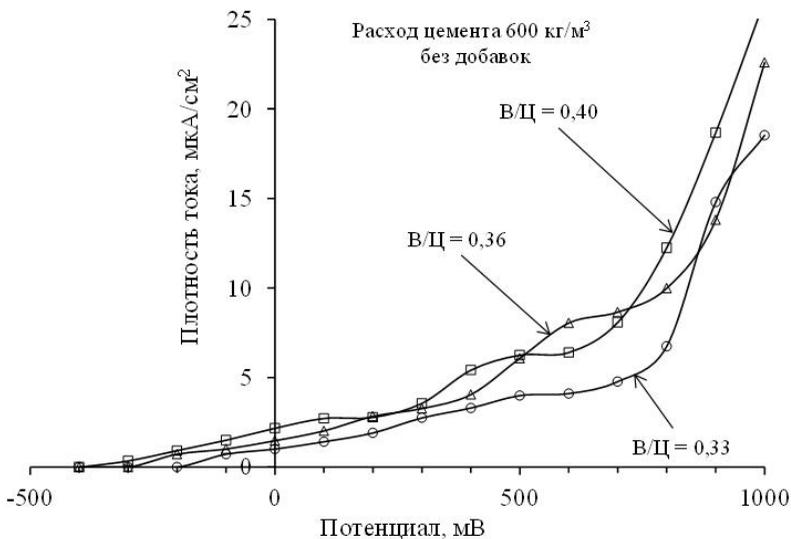


Рис. 6.4. Влияние водоцементного отношения в бетоне без добавок при расходе цемента 600 кг/м³ на коррозионное состояние стальной арматуры

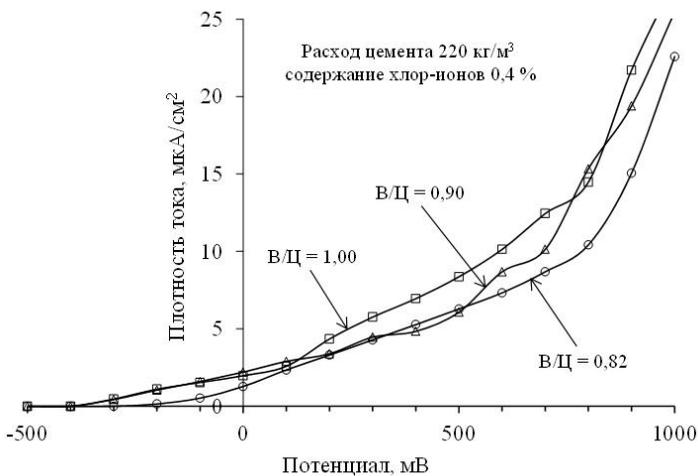


Рис. 6.5. Влияние водоцементного отношения в бетоне с содержанием хлор-ионов 0,4 % при расходе цемента 220 кг/м³ на коррозионное состояние стальной арматуры

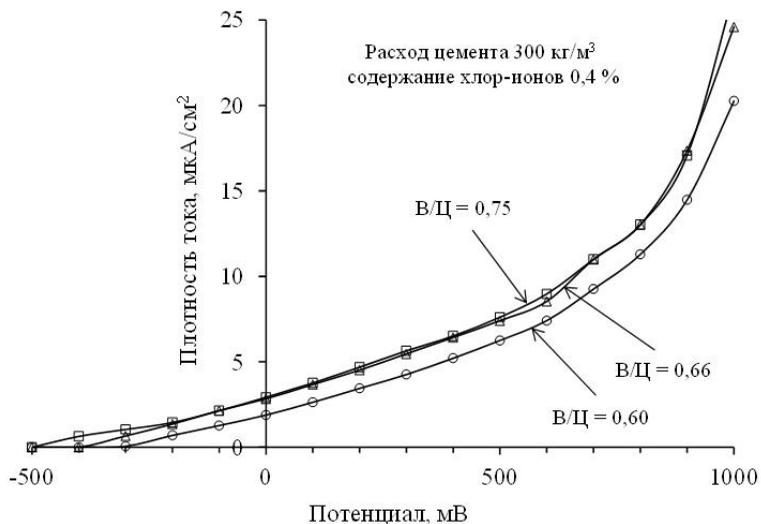


Рис. 6.6. Влияние водоцементного отношения в бетоне с содержанием хлор-ионов 0,4 % при расходе цемента 300 кг/м³ на коррозионное состояние стальной арматуры

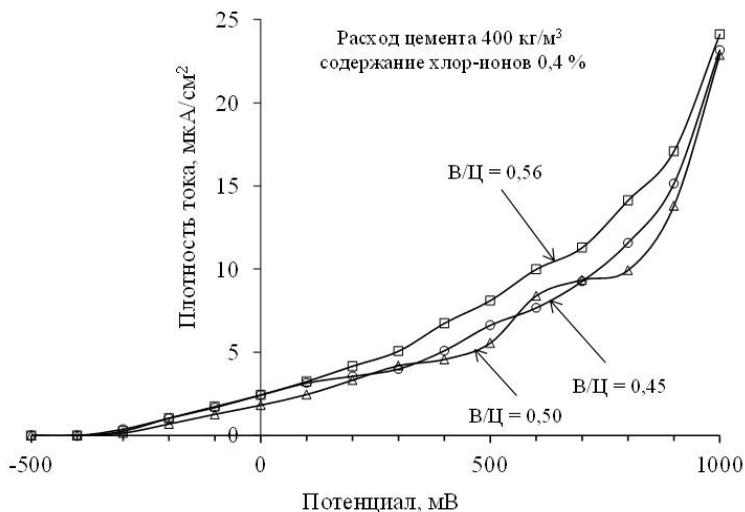


Рис. 6.7. Влияние водоцементного отношения в бетоне с содержанием хлор-ионов 0,4 % при расходе цемента 400 кг/м³ на коррозионное состояние стальной арматуры

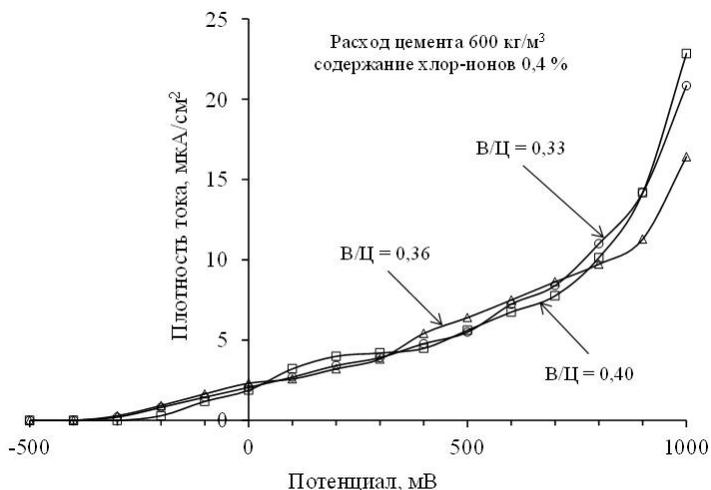


Рис. 6.8. Влияние водоцементного отношения в бетоне с содержанием хлор-ионов 0,4 % при расходе цемента 600 кг/м³ на коррозионное состояние стальной арматуры

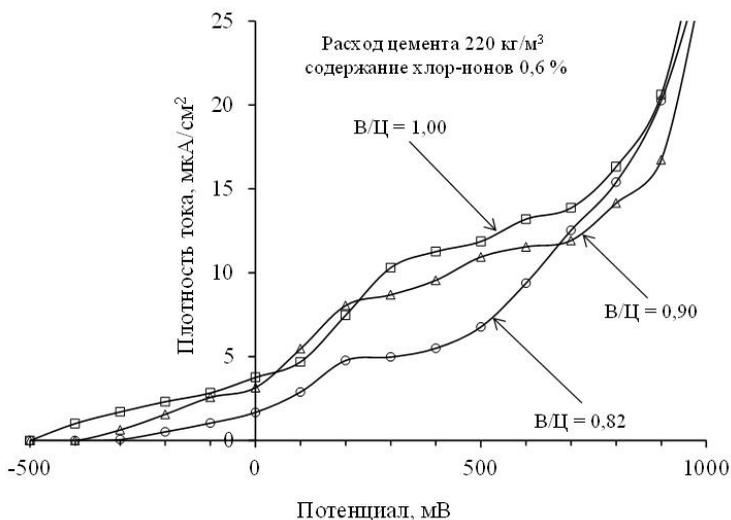


Рис. 6.9. Влияние водоцементного отношения в бетоне с содержанием хлор-ионов 0,6 % при расходе цемента 220 кг/м³ на коррозионное состояние стальной арматуры

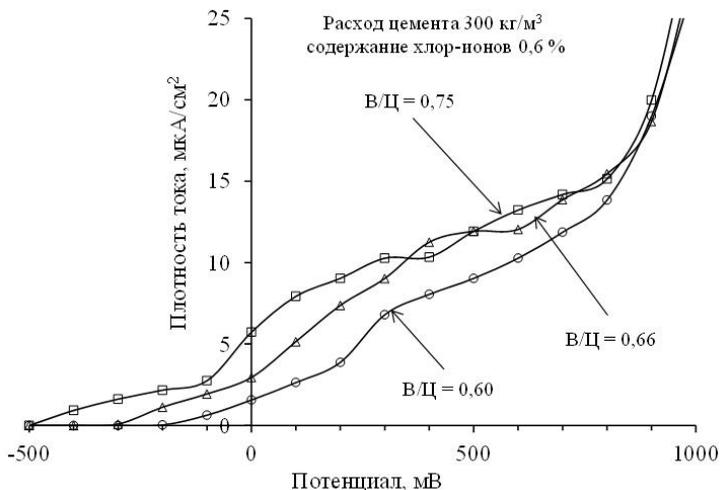
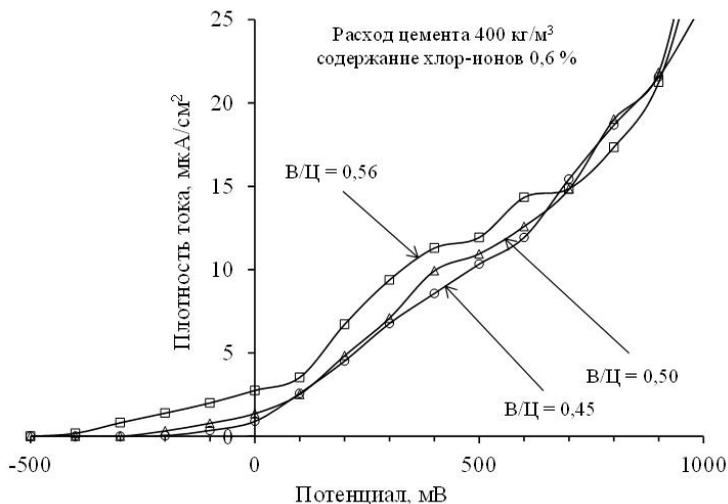


Рис. 6.10. Влияние водоцементного отношения в бетоне с содержанием хлор-ионов 0,6 % при расходе цемента 300 кг/м³ на коррозионное состояние стальной арматуры



Рису. 6.11. Влияние водоцементного отношения в бетоне с содержанием хлор-ионов 0,6 % при расходе цемента 400 кг/м³ на коррозионное состояние стальной арматуры

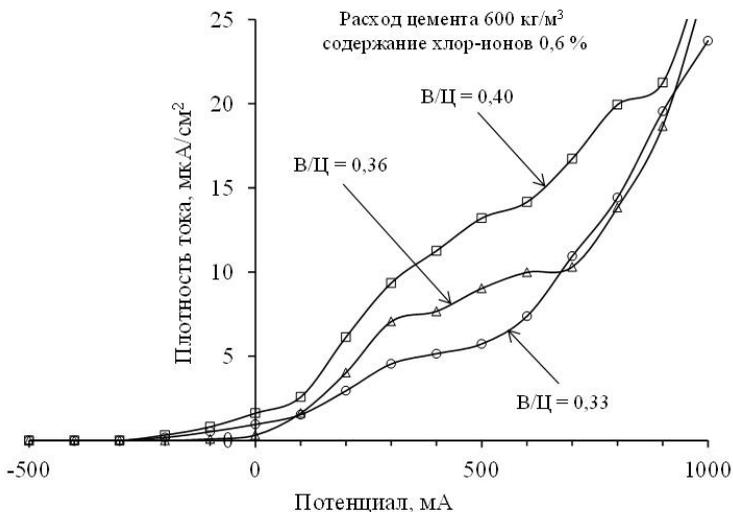


Рис. 6.12. Влияние водоцементного отношения в бетоне с содержанием хлор-ионов 0,6 % при расходе цемента 600 кг/м³ на коррозионное состояние стальной арматуры

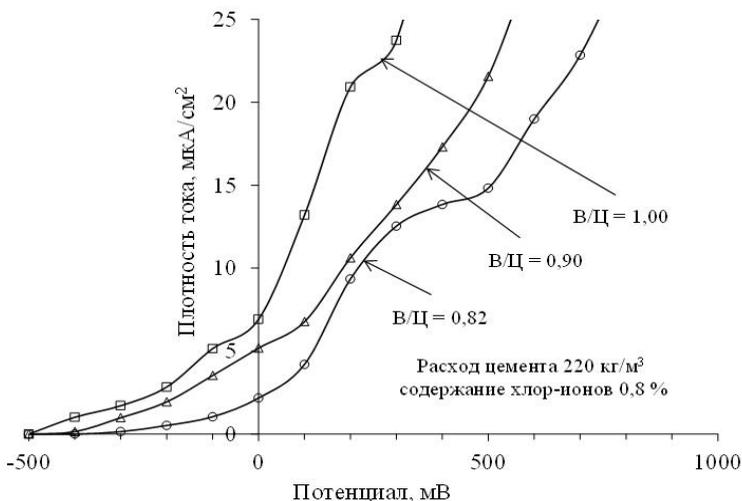


Рис. 6.13. Влияние водоцементного отношения в бетоне с содержанием хлор-ионов 0,8 % при расходе цемента 250 кг/м³ на коррозионное состояние стальной арматуры

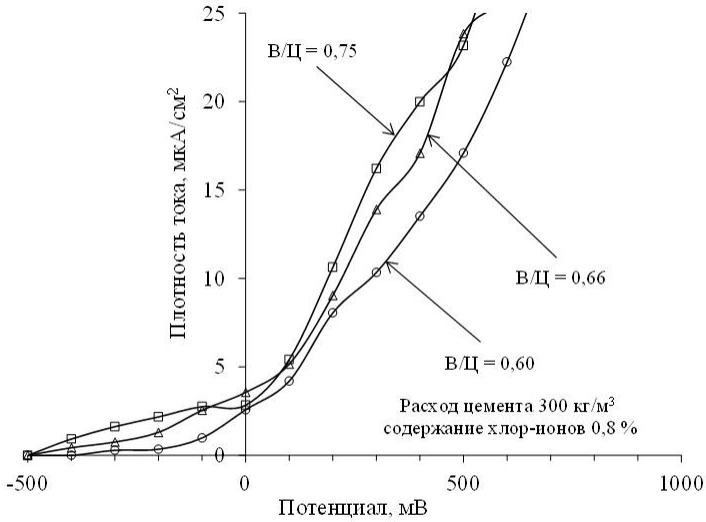


Рис. 6.14. Влияние водоцементного отношения в бетоне с содержанием хлор-ионов 0,8 % при расходе цемента 300 кг/м³ на коррозионное состояние стальной арматуры

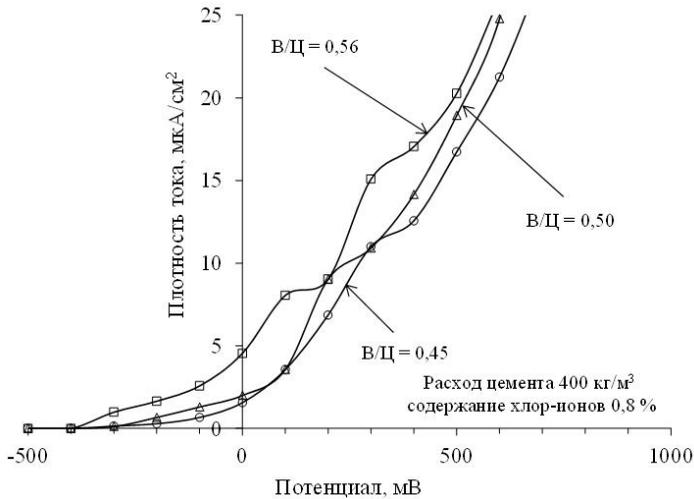


Рис. 6.15. Влияние водоцементного отношения в бетоне с содержанием хлор-ионов 0,8 % при расходе цемента 400 кг/м³ на коррозионное состояние стальной арматуры

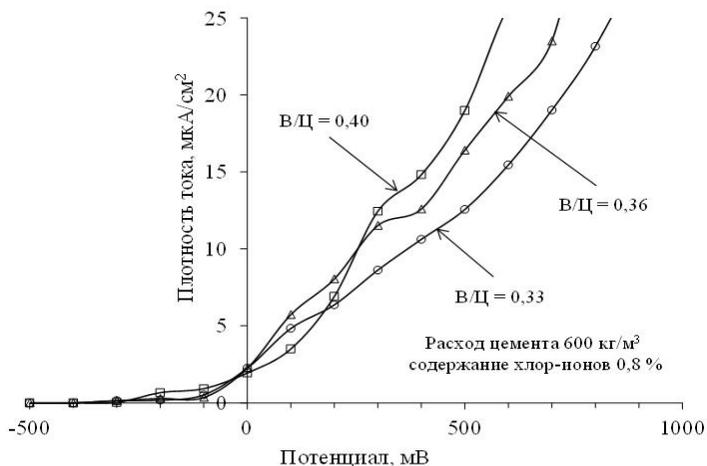


Рис. 6.16. Влияние водоцементного отношения в бетоне с содержанием хлор-ионов 0,8 % при расходе цемента 600 кг/м³ на коррозионное состояние стальной арматуры

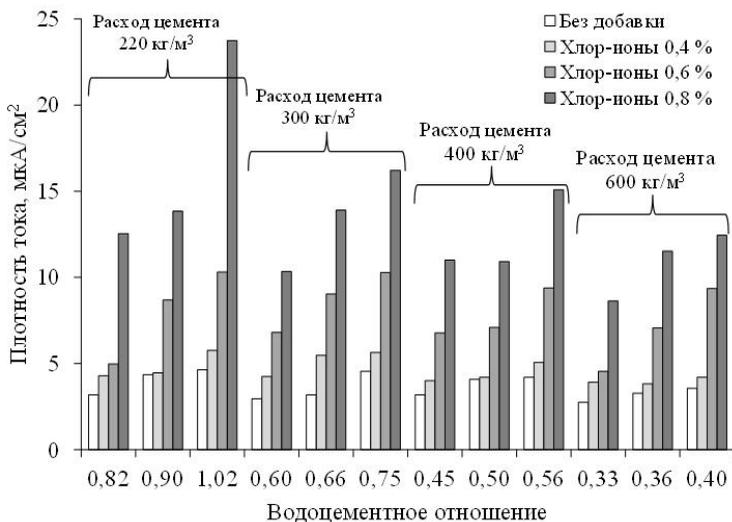


Рис. 6.17. Влияние водоцементного отношения на плотность тока при потенциале +300 мВ

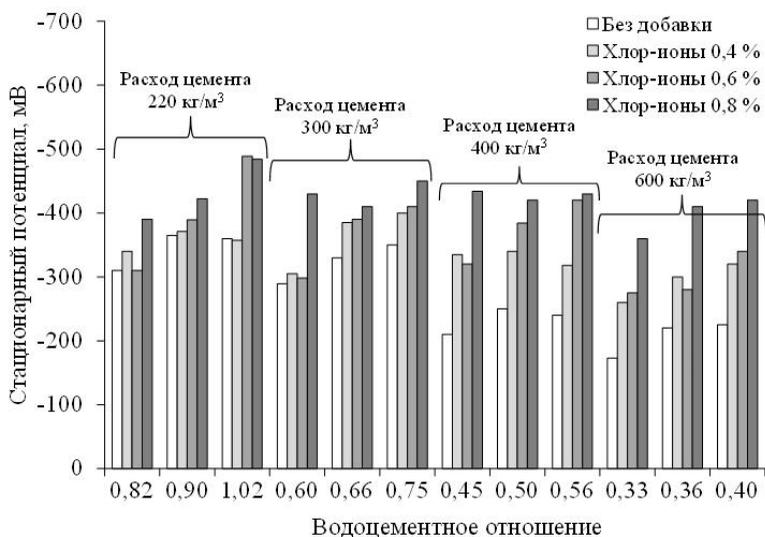


Рис. 6.18. Влияние водоцементного отношения на стационарный потенциал

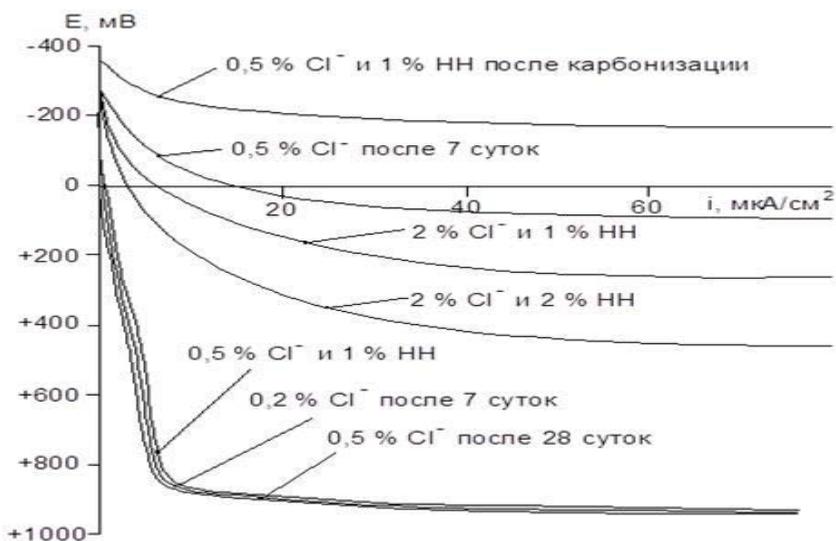


Рис. 6.19. Анодные поляризационные кривые стальной арматуры в бетоне с добавками хлор- и нитрит-ионов [153]

В итоге общее содержание свободных хлор-ионов в бетоне будет независимым от расхода цемента. Следовательно, коррозионное состояние стальной арматуры будет примерно равным, несколько ухудшаясь с ростом водоцементного отношения.

Таким образом, вне зависимости от плотности бетона и марки бетонной смеси можно констатировать, что в целом граничные величины хлор-ионов, приведенные в табл. 6.2, для железобетона подтверждаются.

Важной особенностью является то, что содержание агрессивных ионов в бетоне (табл. 6.2) назначается только применительно к вводимым химическим добавкам. Возможное наличие хлор-ионов в компонентах бетонной смеси (вяжущее, заполнители, вода затворения) должно быть в пределах, ограниченных соответствующими нормативными документами. Однако желательно, по мере накопления экспериментальных данных, регламентировать критическое количество агрессивных ионов с привязкой не к расходу цемента, а к структурным особенностям бетона.

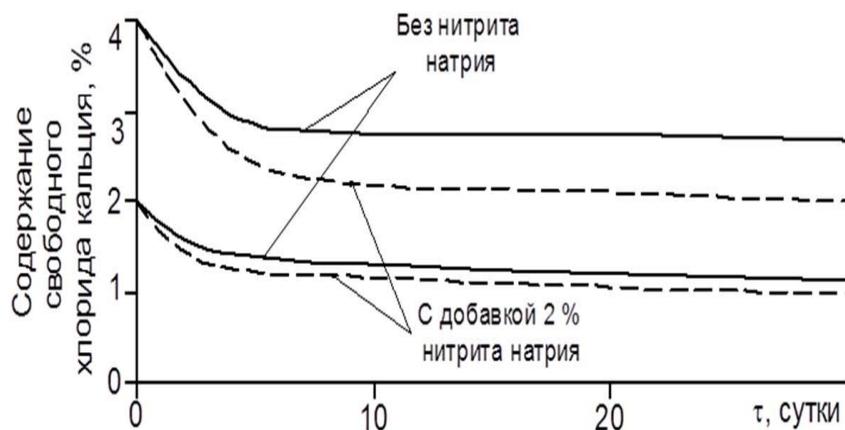


Рис. 6.20. Кинетика связывания хлор-ионов в гидроксид алюмината кальция (по данным Ратинова Б. В. [168])

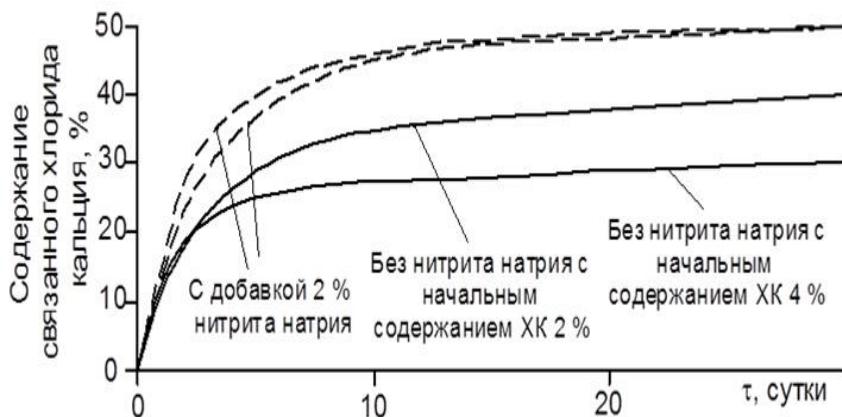


Рис. 6.21. Кинетика связывания хлор-ионов в гидроклоралюминаты кальция (обработка данных на рис. 3.20)

Что касается железобетонных конструкций, находящихся в эксплуатации, то, на наш взгляд, назначение критической концентрации хлор-ионов в единицах массы цемента является не совсем удачным как по причине отсутствия информации о расходе цемента, так и применительно к самой технике отбора проб, поскольку для приготовления навески используют растворную часть бетона. В затвердевшем бетоне, с уже стабилизировавшимися процессами гидратации, количество вяжущего уже не играет существенной роли, а кинетика деградации защитного слоя определяется структурой бетона, его проницаемостью для агрессивных ионов и депассиватора, которым является кислород воздуха.

Например, сравним две аналогичных конструкции, но с различным исходным расходом цемента – 200 и 600 кг на 1 м³ бетона. В их приарматурной зоне содержатся хлор-ионы в количестве 0,4 % от массы цемента, то есть формально – накоплена критическая концентрация и защитные свойства бетона по отношению стали идентичны. Но для второй конструкции содержание хлор-ионов (и их концентрация в поровой жидкости) будет в три раза больше, чем для первой. А поскольку процессы гидратации цемента практически приостановились, а следовательно и вероятность связывания агрессивных ионов в малорастворимые соединения незначительна, то опасность коррозии стали определяется только концентрацией хлор-

ионов в поровой жидкости [169], и возможность коррозии арматуры в конструкции с повышенным расходом цемента будет существенно выше, чем в ЖБК с низким расходом цемента. В связи с этим необходимо, вероятно, оперировать таким удобным (при экспериментальном определении хлоридов в бетоне действующих конструкций) параметром, как количество хлор-ионов в долях от массы растворной части бетона (м. р. ч.), что потребует в дальнейшем постановки дополнительных исследований.

Проведенные ранее в БНТУ исследования [101], подкрепленные данными других авторов [152, 170], показывают, что критическое содержание хлор-ионов гарантированно составляет около 0,15 % от массы растворной части бетона. В [152] отмечается, что при содержании хлор-ионов в количестве 0,15 % от массы бетона арматура интенсивно корродирует, 0,10–0,15 % вызывают незначительную коррозию в виде тонкого налета ржавчины, а при 0,1 % сталь не корродирует.

В принципе, на критическую концентрацию хлор - ионов оказывают влияние и иные факторы. Так, согласно [170], критическая концентрация определяется влажностью бетона и неким показателем «качество» – плохое и хорошее (рис. 6.22). В [171] схема несколько модифицирована (рис. 6.23) посредством привязки к влажностным условиям эксплуатации ЖБК, характеризуемых относительной влажностью воздуха. Это предложение, безусловно, правильно, однако не доведено до инженерного расчета. Кроме представленных гипотетических моделей, аналитические зависимости для расчета критической концентрации хлор-ионов отсутствуют.

На наш взгляд, в настоящее время за величину критической концентрации хлор-ионов следует брать наихудший случай, а именно нижний экстремум кривой, характерной для бетона с наименьшей плотностью (рис. 6.22 и 6.23). Попытаемся связать (в соответствии с гипотетическими моделями) коррозионную стойкость стальной арматуры со структурными особенностями бетона.

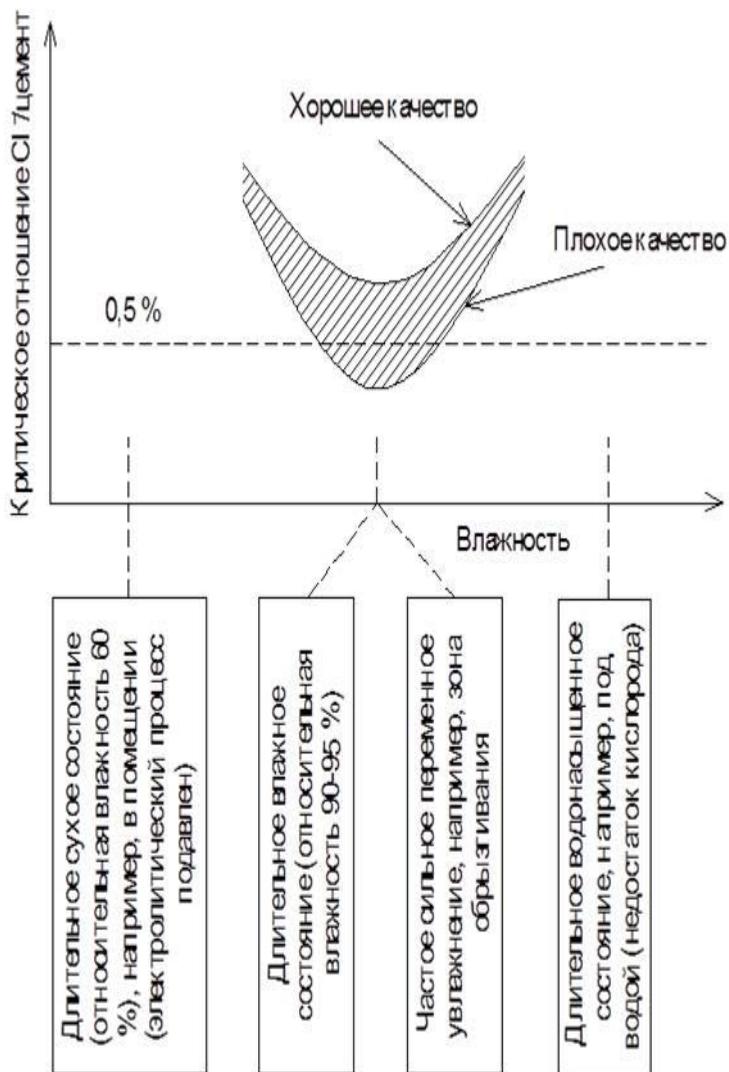


Рис. 6.22. Зависимость критической концентрации хлоридов от качества и влажности защитного слоя бетона

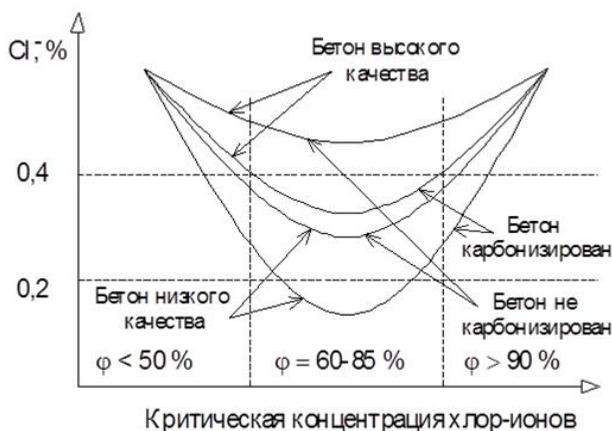


Рис. 6.23. Влияние свойств бетона на критическую концентрацию хлор-ионов

6.3. Связь структурных особенностей бетона с коррозионным состоянием стальной арматуры

Вначале более подробно рассмотрим влияние содержания хлор-ионов на коррозионное состояние стальной арматуры. Попытаемся количественно оценить взаимосвязь водоцементного отношения бетонной смеси и плотности тока (рис. 6.24–6.28). Интерес представляет то, что при содержании хлор-ионов в количестве 0,6 % от массы цемента стальная арматура еще находится в устойчивом пассивном состоянии. И лишь при повышении содержания хлор-ионов до 0,8 % вне зависимости от плотности бетона сталь переходит в неустойчивое пассивное состояние, при котором коррозия арматуры возможна. В соответствии с полученными результатами можно сделать основной вывод: введение в бетон на стадии изготовления 0,6 % от массы цемента, а тем более 0,4 % хлор-ионов коррозии стальной арматуры не вызывает. Сталь находится в устойчивом пассивном состоянии. Характерно, что увеличение расхода цемента, а, следовательно, снижение водоцементного отношения и повышение плотности бетона подавляют отрицательное воздействие хлор-ионов. И это несмотря на то, что при расходе цемента 600 кг общее содержание вводимых в бетон хлор-ионов в два раза больше, чем при расходе цемента 300 кг.

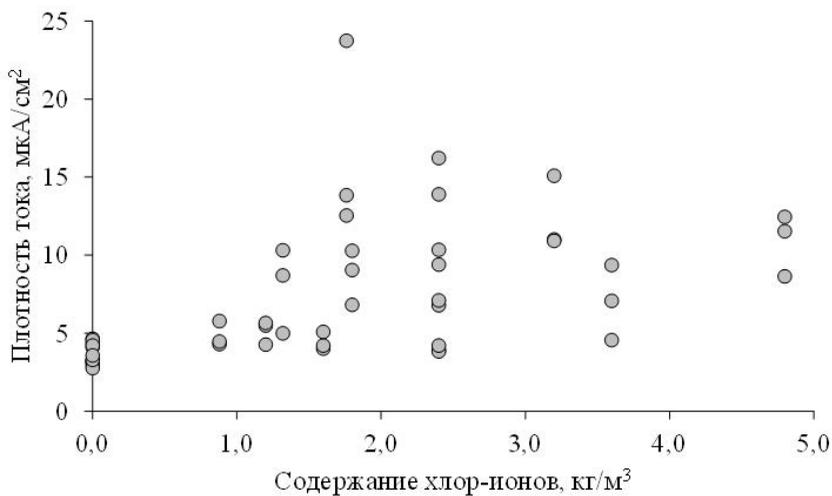


Рис. 6.24. Зависимость плотности тока при потенциале +300 мВ от начального содержания хлор-ионов (в кг/м³) в бетоне

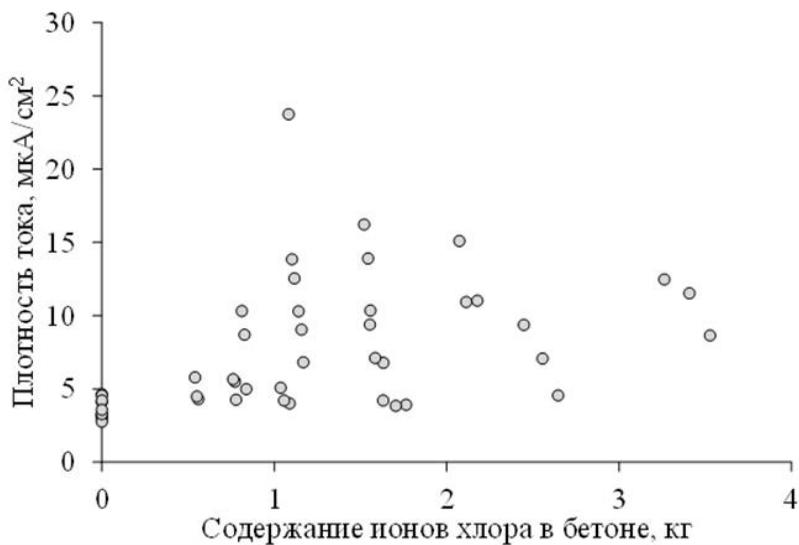


Рис. 6.25. Зависимость плотности тока при потенциале +300 мВ от содержания «свободных» хлор-ионов (в кг/м³) в бетоне

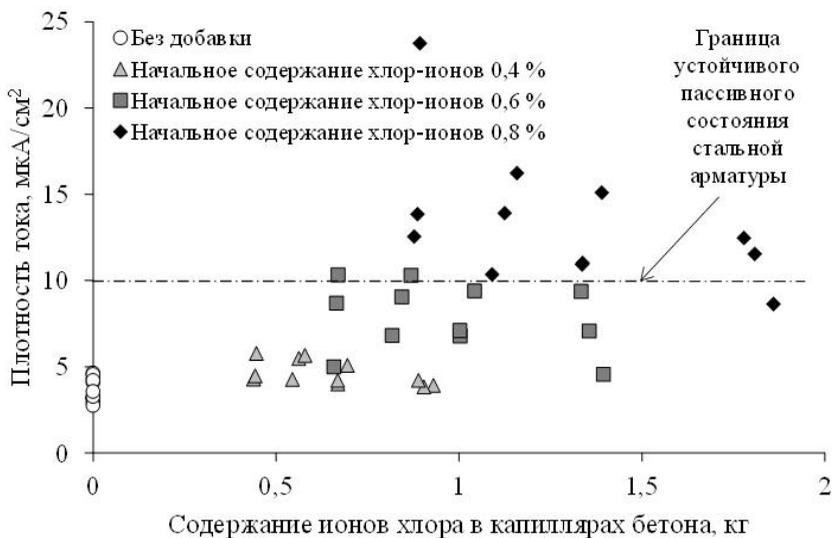


Рис. 6.26. Зависимость плотности тока при потенциале +300 мВ от содержания «свободных» хлор-ионов (в кг/м³) в капиллярах бетона

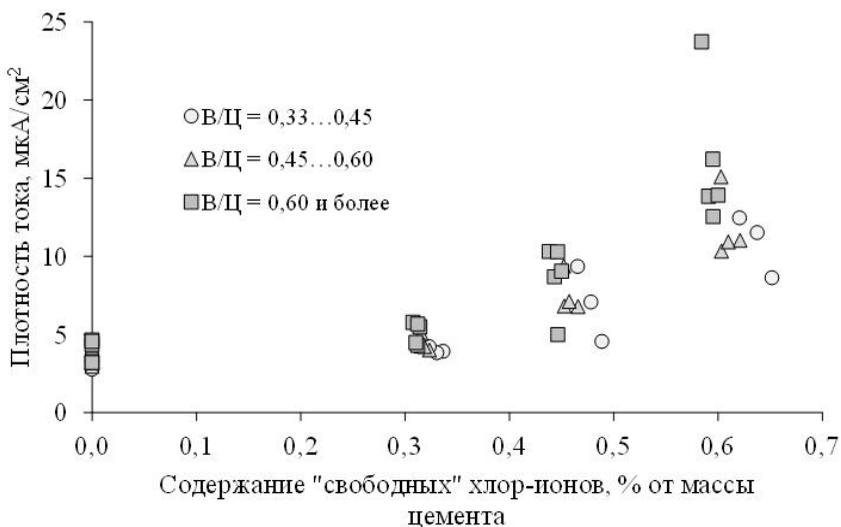


Рис. 6.27. Зависимость плотности тока при потенциале +300 мВ от содержания «свободных» хлор-ионов (в % от массы цемента) в бетоне

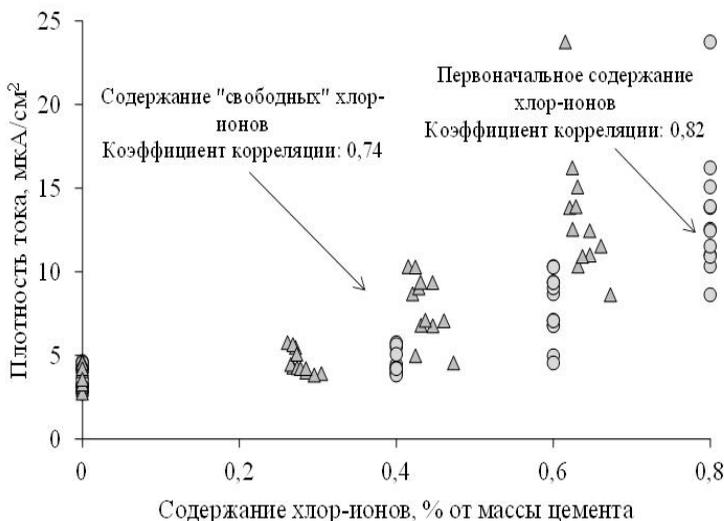


Рис. 6.28. Зависимость плотности тока при потенциале +300 мВ от содержания хлор-ионов (в % от массы цемента) в бетоне

Намечается явная тенденция возрастания защитных свойств бетона с повышением расхода цемента. Вместе с тем, при равном расходе цемента, защитные свойства бетона ухудшаются с увеличением расхода воды и повышением тем самым подвижности бетонной смеси: плотность тока увеличивается, а стационарный потенциал разблагораживается.

Если рассмотреть общее начальное содержание хлор-ионов в кг/м³ (рис. 6.24), то какая-либо устойчивая связь с плотностью тока отсутствует. Для проверки высказанного предположения о том, что связанные в гидрохлоралюминаты кальция хлор-ионы теряют свою агрессивность по отношению к стали, были проведены соответствующие расчеты. Приведенные на рис. 6.21 данные (обработка результатов, полученных В. Б. Ратиновым) показывают, что количество связанных хлор-ионов примерно равно 30–40 % от исходного содержания. Если принять степень гидратации цемента равной примерно 70 %, то легко рассчитать массу продуктов гидратации цемента и, соответственно, количество связанных в ГХАК и «свободных» хлор-ионов (табл. 6.6–6.8).

Таблица 6.6

Содержание химически связанных ионов хлора при начальном содержании 0,4 % от массы цемента

Состав	Содержание хлор-ионов				
	Начальное, кг/м ³ бетона	Химически связанных		Свободных	
		кг/м ³ бетона	% от массы цемента	кг/м ³ бетона	% от массы цемента
1	0,88	0,29	0,132	0,59	0,268
2	0,88	0,30	0,134	0,58	0,266
3	0,88	0,31	0,139	0,57	0,261
4	1,20	0,38	0,126	0,82	0,274
5	1,20	0,39	0,128	0,81	0,272
6	1,20	0,39	0,132	0,81	0,268
7	1,60	0,46	0,115	1,14	0,285
8	1,60	0,49	0,122	1,11	0,278
9	1,60	0,51	0,127	1,09	0,273
10	2,40	0,57	0,095	1,83	0,305
11	2,40	0,62	0,104	1,78	0,296
12	2,40	0,69	0,115	1,71	0,285

Таблица 6.7

Содержание химически связанных ионов хлора при начальном содержании 0,6 % от массы цемента

Состав	Содержание хлор-ионов				
	Начальное, кг/м ³ бетона	Химически связанных		Свободных	
		кг/м ³ бетона	% от массы цемента	кг/м ³ бетона	% от массы цемента
1	1,32	0,39	0,175	0,93	0,425
2	1,32	0,39	0,179	0,93	0,421
3	1,32	0,41	0,185	0,91	0,415
4	1,80	0,51	0,168	1,29	0,432
5	1,80	0,51	0,171	1,29	0,429
6	1,80	0,53	0,176	1,27	0,424
7	2,40	0,61	0,153	1,79	0,447
8	2,40	0,65	0,163	1,75	0,437
9	2,40	0,68	0,169	1,72	0,431
10	3,60	0,76	0,127	2,84	0,473
11	3,60	0,83	0,139	2,77	0,461
12	3,60	0,92	0,153	2,68	0,447

Таблица 6.8

Содержание химически связанных ионов хлора при начальном содержании 0,8 % от массы цемента

№ состава	Содержание хлор-ионов				
	Начальное, кг/м ³ бетона	Химически связанных		Свободных	
		кг/м ³ бетона	% от массы цемента	кг/м ³ бетона	% от массы цемента
1	1,76	0,39	0,175	1,37	0,625
2	1,76	0,39	0,179	1,37	0,621
3	1,76	0,41	0,185	1,35	0,615
4	2,40	0,51	0,168	1,89	0,632
5	2,40	0,51	0,171	1,89	0,629
6	2,40	0,53	0,176	1,87	0,624
7	3,20	0,61	0,153	2,59	0,647
8	3,20	0,65	0,163	2,55	0,637
9	3,20	0,68	0,169	2,52	0,631
10	4,80	0,76	0,127	4,04	0,673
11	4,80	0,83	0,139	3,97	0,661
12	4,80	0,92	0,153	3,88	0,647

Однако соответствующий график, приведенный на рис. 6.25, показывает, что и в этом случае видимая связь содержания уже «свободных» хлор-ионов и коррозионного состояния стальной арматуры отсутствует.

Можно предположить, что хлор-ионы равномерно распределяются в капиллярно-пористом пространстве цементного камня. Но те ионы, которые находятся в гелевой пористости, заведомо должны обладать меньшей подвижностью, поскольку и вода в таких мелких капиллярах более связана, чем в крупных. В связи с этим было рассчитано содержание хлор-ионов в мелких (гелевых) капиллярах и крупных. На рис. 6.26 представлен график, но и он не позволяет связать выше указанные зависимости. Однако если рассматривать содержание «свободных» хлор-ионов в процентах от массы цемента, то можно отметить, появляющуюся связь агрессивных ионов и коррозионного состояния стальной арматуры, характеризующегося

плотностью тока при потенциале + 300 мВ (рис. 6.27 и 6.28). И, в принципе, может быть получена формула для описания взаимосвязи.

Мы попытались связать некоторые свойства бетона с коррозионным состоянием стальной арматуры. В табл. 6.9 представлены структурные характеристики бетона, рассчитанные для составов (табл. 6.3) по полученным в [101] формулам.

Исходя из водоцементного отношения бетонной смеси рассчитывалось водоцементное отношение теста $((В/Ц)_т)$ с учетом воды, пошедшей на смачивание песка (принято 3,5 %) и щебня (1,5 %). Затем определялось относительное водосодержание цементного теста (X) как отношение водоцементного отношения теста к коэффициенту нормальной плотности цемента. Степень гидратации цемента рассчитывалась по формулам (6.1 и 6.2) в зависимости от относительного водосодержания теста:

– при $X \leq 1,65$

$$\alpha_{28}^{20} = 60 \cdot X - \sqrt[3]{(1,65 \cdot X)^2} \cdot e^{1,65 \cdot X}, \% \quad (6.1)$$

– при $X > 1,65$

$$\alpha_{28}^{20} = 70 + 5 \cdot (X - 1,65), \% \quad (6.2)$$

Таблица 6.9

Структурные характеристики бетона

Со- став	$(В/Ц)_т$	X	$\alpha, \%$	Цемент, кг		Пористость бетона, %		
				$Ц_г$	$Ц_{нг}$	Общая	Капиллярная	Гелевая
1	0,611	2,264	73,1	161	59	14,6	11,5	3,1
2	0,697	2,582	74,7	164	56	16,3	13,1	3,2
3	0,828	3,066	77,1	170	50	18,9	15,6	3,3
4	0,456	1,688	70,2	211	89	13,7	9,6	4,1
5	0,518	1,919	71,3	214	86	15,4	11,2	4,2
6	0,614	2,275	73,1	219	81	18,0	13,7	4,3
7	0,351	1,301	63,8	255	145	12,9	7,9	5,0
8	0,399	1,478	67,9	272	128	14,4	9,1	5,3
9	0,465	1,722	70,4	281	119	16,7	11,2	5,5
10	0,270	1,001	52,8	317	283	13,1	7,0	6,2
11	0,304	1,125	57,8	347	253	14,5	7,7	6,8
12	0,352	1,303	63,9	383	217	16,5	9,0	7,5

Общая пористость бетона рассчитывалась по значениям расхода цемента (Π), водоцементного отношения бетонной смеси и степени гидратации цемента:

$$\Pi_{\text{об}}^{\delta} = \frac{\Pi \cdot \left[0,98 \cdot \left(\frac{B}{\Pi} \right)_{\delta} - 0,0094 - 0,174 \cdot \alpha \right]}{1000} \quad (6.3)$$

Капиллярная пористость рассчитывалась по аналогичной формуле

$$\Pi_{\text{к}}^{\delta} = \frac{\Pi \cdot \left[0,98 \cdot \left(\frac{B}{\Pi} \right)_{\delta} - 0,0094 - 0,369 \cdot \alpha \right]}{1000} \quad (6.4)$$

А гелевая пористость равна разности общей и капиллярной.

Попытаемся увязать между собой некоторые свойства бетона (приведены в табл. 6.4) и структурные характеристики (табл. 6.9) с коррозионным состоянием стальной арматуры (рис. 6.29 – 6.40). А в табл. 6.10 приведены рассчитываемые для каждой взаимосвязи коэффициенты корреляции.

Таблица 6.10

Коэффициент корреляции

Взаимосвязь	Без добавки	Содержание хлор-ионов, % от массы цемента		
		0,4	0,6	0,8
$V/\Pi - i$	0,61	0,67	0,44	0,76
$f_b - i$	-0,57	-0,67	-0,47	-0,62
$F - i$	-0,49	-0,71	-0,45	-0,57
$W - i$	-0,51	-0,71	-0,47	-0,58
$\Pi_{\text{к}} - i$	0,77	0,84	0,67	0,77
$\Pi_{\text{о}} - i$	0,85	0,81	0,87	0,89
$V/\Pi - \varphi$	-0,93	-0,69	-0,68	-0,55
$f_b - \varphi$	0,92	0,79	0,67	0,56
$F - \varphi$	0,90	0,76	0,63	0,51
$W - \varphi$	0,90	0,79	0,64	0,52
$\Pi_{\text{к}} - \varphi$	-0,91	-0,74	-0,83	-0,85
$\Pi_{\text{о}} - \varphi$	-0,65	-0,60	-0,85	-0,69

Проанализировав полученные данные, можно констатировать, что водоцементное отношение бетонной смеси, прочность бетона, а также его морозостойкость и водонепроницаемость не позволяют увязать с коррозионной стойкостью стальной арматуры, а, следовательно, и получить какие-либо формулы, которые можно было бы использовать для прогнозирования состояния стали. Особо следует остановиться на взаимосвязи прочности бетона и коррозионного состояния стальной арматуры. Дело в том, что ныне действующие нормативные документы для различных эксплуатационных сред предполагают и бетоны различной прочности – чем агрессивнее среда, тем рекомендуется для использования бетон большей прочности. В принципе, такие рекомендации логичны, поскольку чем больше прочность бетона, тем выше его и плотность. Однако на рис. 6.31 и 6.32 четкую взаимосвязь выявить не удастся, наблюдается только тенденция, которую не удастся довести до математического воплощения.

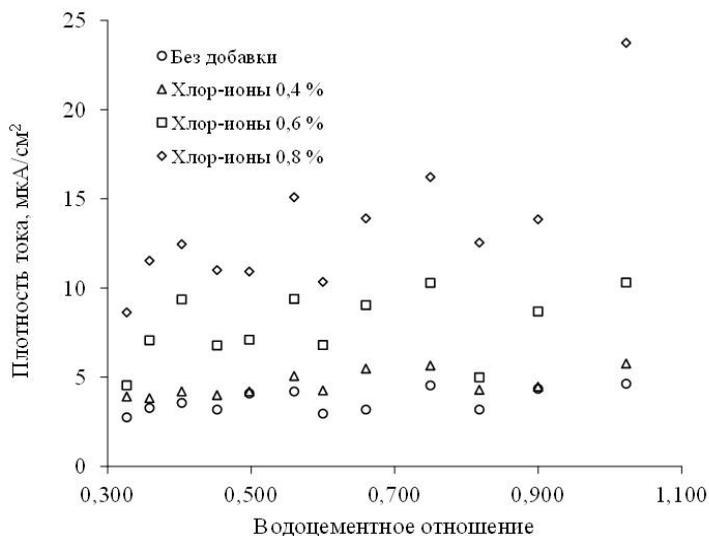


Рис. 6.29. Зависимость плотности тока при потенциале +300 мВ от водоцементного отношения бетонной смеси

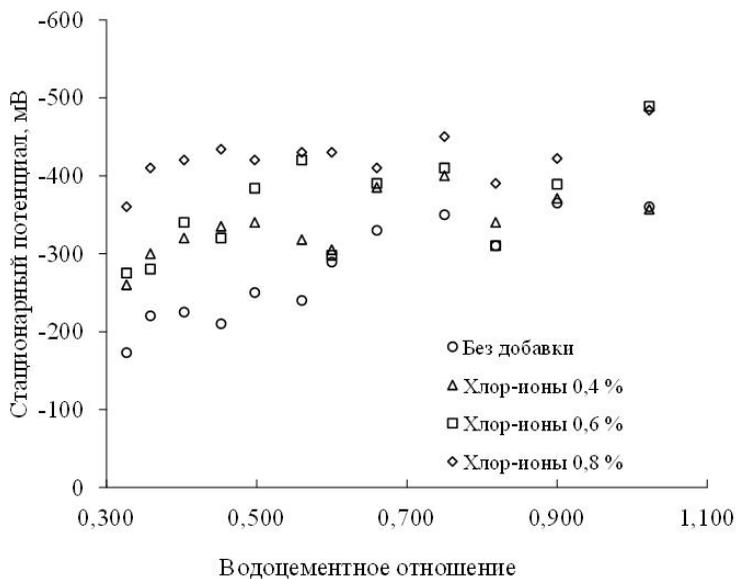


Рис. 6.30. Зависимость стационарного потенциала стальной арматуры от водоцементного отношения бетонной смеси

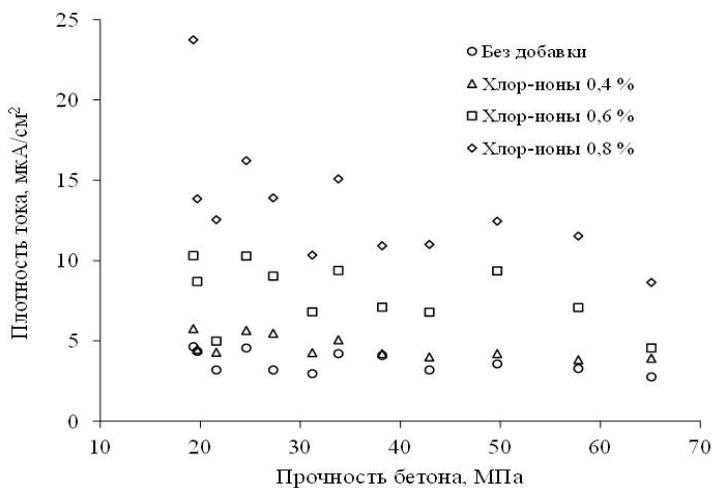


Рис. 6.31. Зависимость плотности тока при потенциале +300 мВ от прочности бетона

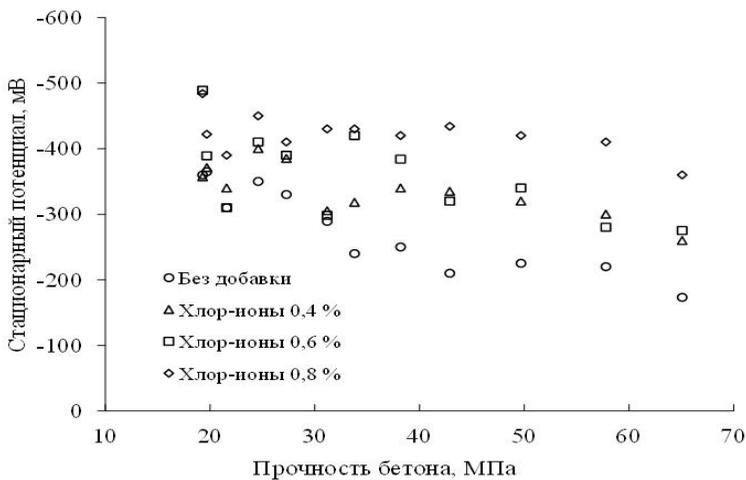


Рис. 6.32. Зависимость стационарного потенциала стальной арматуры от прочности бетона

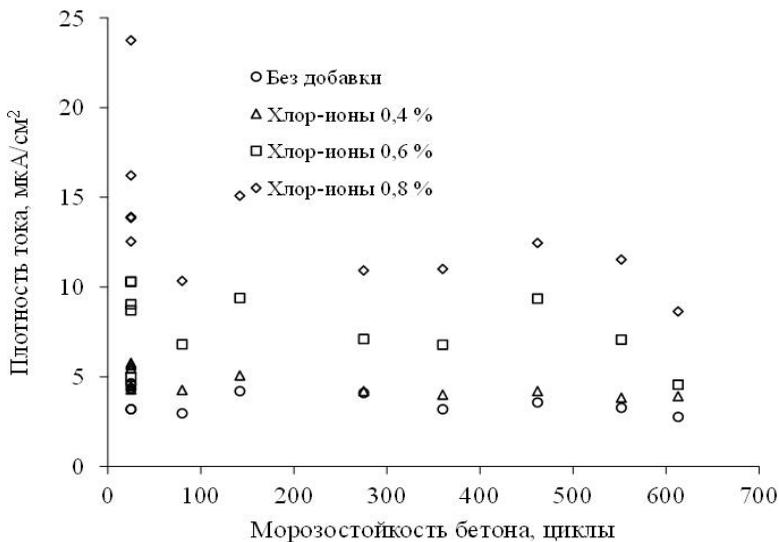


Рис. 6.33. Зависимость плотности тока при потенциале +300 мВ от морозостойкости бетона

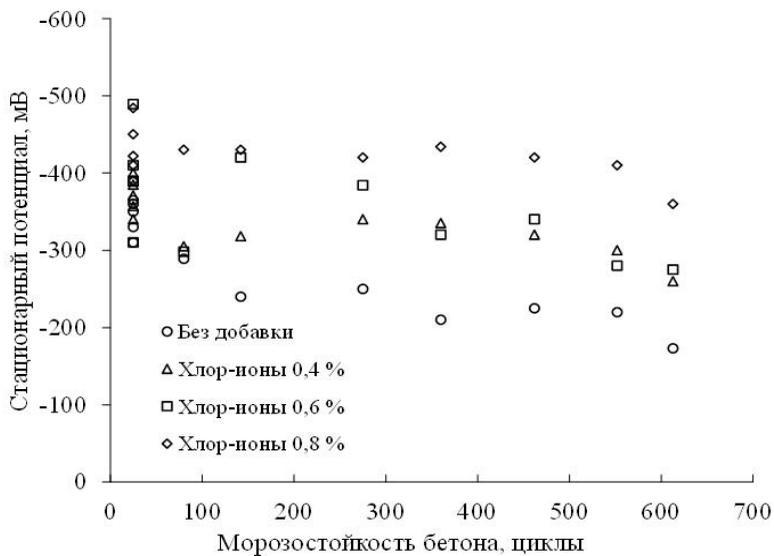


Рис. 6.34. Зависимость стационарного потенциала стальной арматуры от морозостойкости бетона

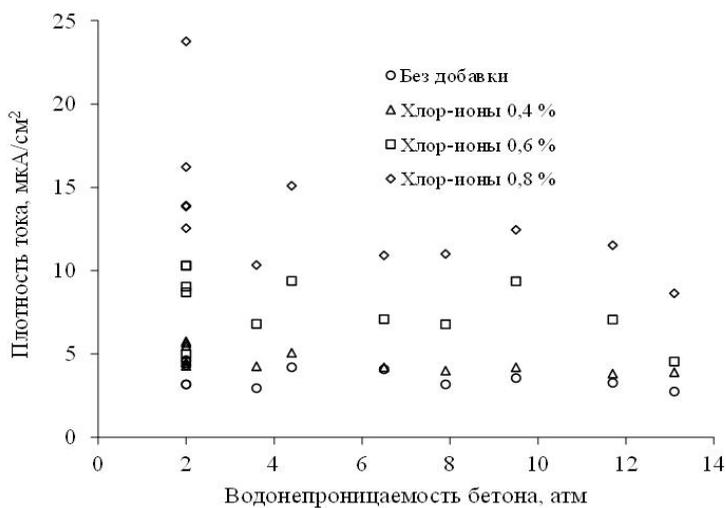


Рис. 6.35. Зависимость плотности тока при потенциале +300 мВ от водонепроницаемости бетона

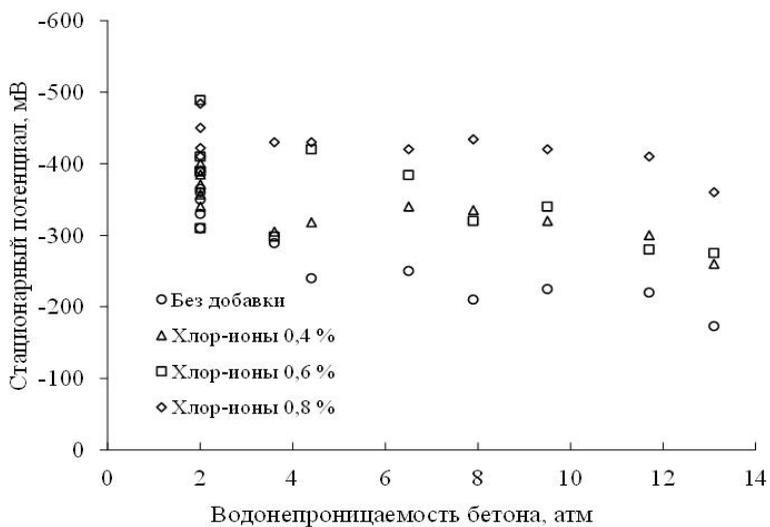


Рис. 6.36. Зависимость стационарного потенциала стальной арматуры от водонепроницаемости бетона

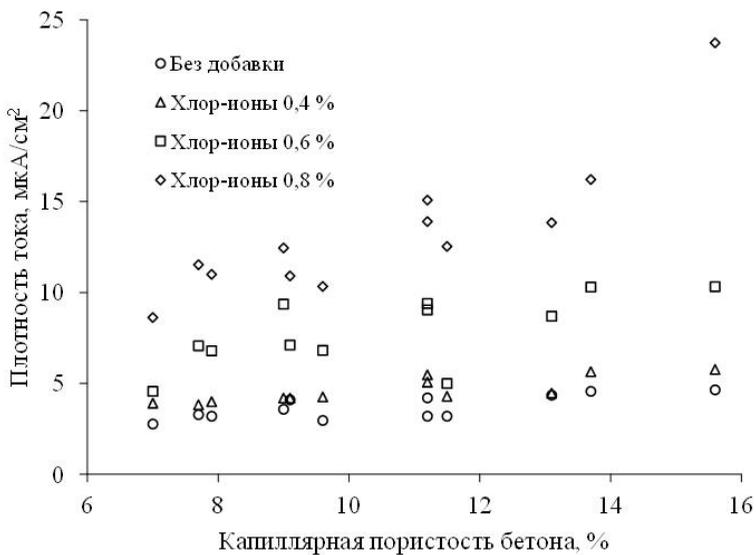


Рис. 6.37. Зависимость плотности тока при потенциале +300 мВ от капиллярной пористости бетона

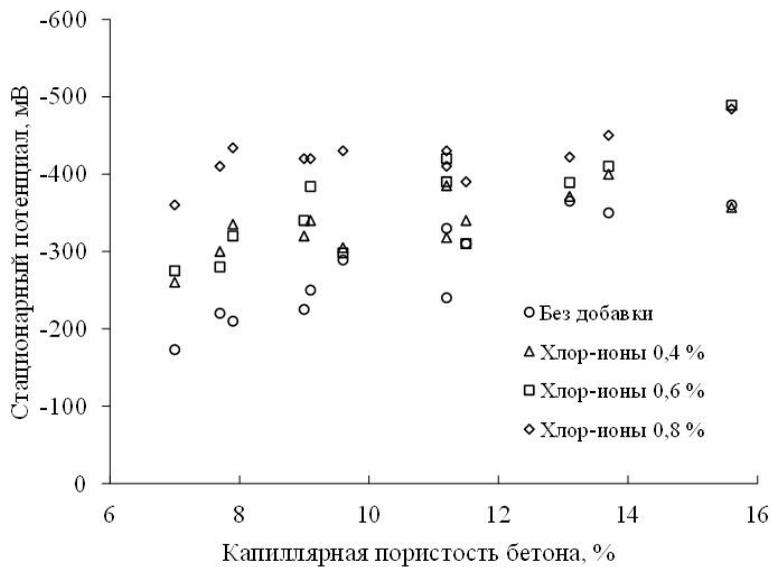


Рис. 6.38. Зависимость стационарного потенциала стальной арматуры от капиллярной пористости бетона

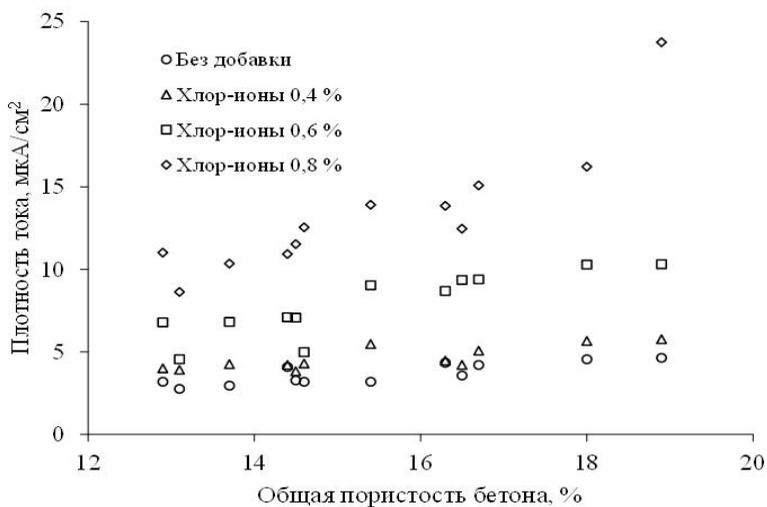


Рис. 6.39. Зависимость плотности тока при потенциале +300 мВ от общей пористости бетона

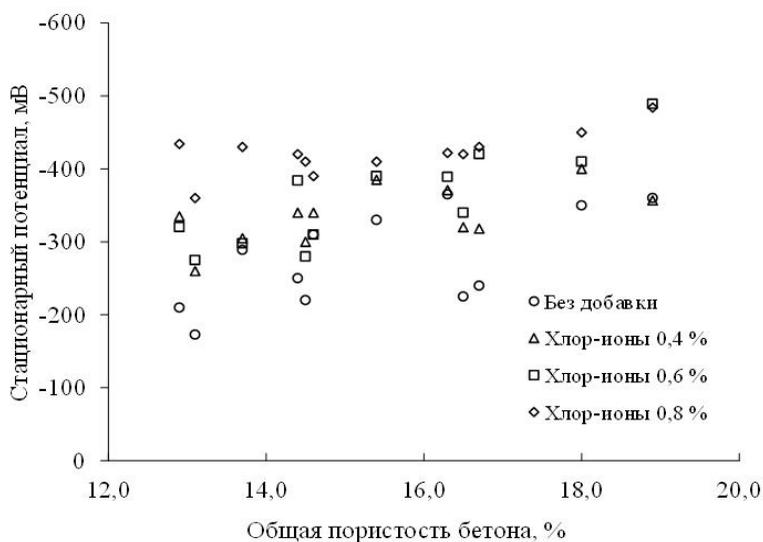


Рис. 6.40. Зависимость стационарного потенциала стальной арматуры от общей пористости

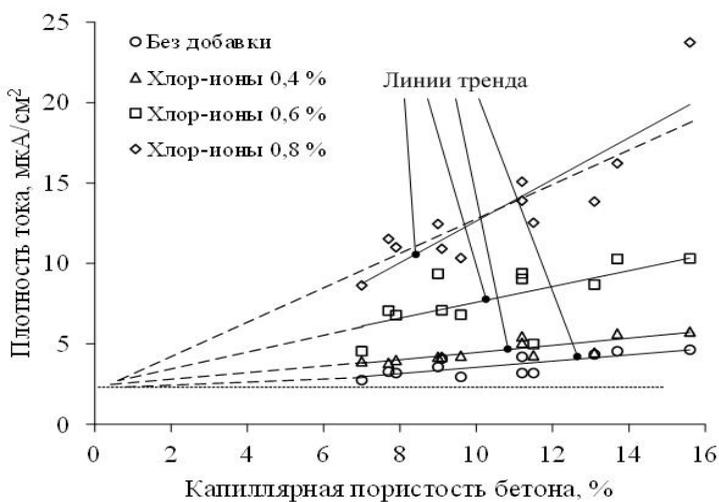


Рис. 6.41. Зависимость плотности тока при потенциале +300 мВ от капиллярной пористости бетона

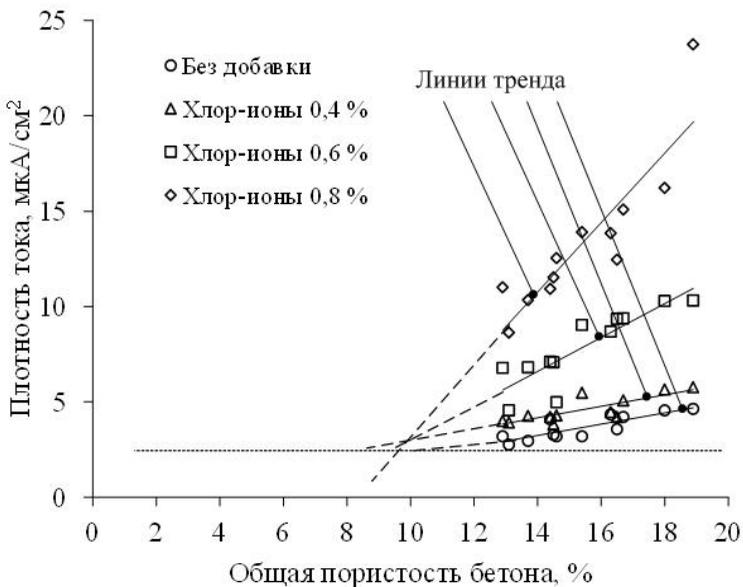


Рис. 6.42. Зависимость плотности тока при потенциале +300 мВ от общей пористости

Еще более отчетливо эта связь заметна на рис. 6.41 и 6.42.

Что же касается пористости бетона, то как для капиллярной, так и общей можно отметить достаточно устойчивую связь (рис. 6.37–6.40).

Величины коэффициентов корреляции (табл. 6.10) свидетельствуют о том, что между характеристиками пористости бетона и плотностью коррозионного тока есть связь, близкая к функциональной. И это дает возможность получить простые выражения для расчета плотности тока.

Для фактора плотности, характеризуемой капиллярной пористостью (Π_k в %), плотность тока (i) равна [198–200]

$$i = i_{\text{бдо}} + \beta_1 \cdot \Pi_k, \text{ мкА/см}^2, \quad (6.5)$$

где $i_{\text{бдо}}$ – плотность тока в особо плотном бетоне без добавок при капиллярной пористости, равной нулю, мкА/см²;

β_1 – коэффициент, зависящий от начального содержания хлоридов, (мкА/см²)/%.

А если плотность бетона характеризовать общей пористостью (P_o в %), то плотность тока может быть рассчитана по формуле [198–200]

$$i = i_{\text{бдоп}} + \beta_2 \cdot (P_o - P_{\text{ооп}}), \text{ мкА/см}^2, \quad (6.6)$$

где $i_{\text{бдоп}}$ – плотность тока в особо плотном бетоне без добавок при общей пористости, соответствующей границе особо плотного бетона, мкА/см²;

β_2 – коэффициент, зависящий от начального содержания хлор-ионов (мкА/см²)/%;

$P_{\text{ооп}}$ – общая пористость бетона, соответствующая границе особо плотного бетона.

Обработка данных на рис. 6.41 позволила получить выражения для расчета коэффициента β_1 [198–200]:

$$\beta_1 = \beta_{1\text{бдо}} + k_1 \cdot \text{Cl}^3, \text{ мкА/см}^2/\%, \quad (6.7)$$

где $\beta_{1\text{бдо}}$ – коэффициент β_1 для особо плотного бетон без добавок при капиллярной пористости, равной нулю, (мкА/см²)/% (может быть принят равным 0,13);

k_1 – поправочный коэффициент, (мкА/см²)/%⁴, (может быть принят равным 1,7);

Cl – содержание хлор-ионов в бетоне, % от массы цемента.

А обработка данных на рис. 6.42 позволила получить выражения для расчета коэффициента β_2 [198–200]

$$\beta_2 = \beta_{2\text{бдо}} + k_2 \cdot \text{Cl}^3, \text{ мкА/см}^2/\%, \quad (6.8)$$

где $\beta_{2\text{бдо}}$ – коэффициент β_2 для особо плотного бетон без добавок при общей пористости, соответствующей границе особо плотного бетона, (мкА/см²)/% (может быть принят равным 0,21);

k_2 – поправочный коэффициент, (мкА/см²)/%⁴ (может быть принят равным 2,8).

Следовательно, подставив (6.7) в (6.5), а (6.8) в (6.6) можно получить соответствующие выражения для расчета плотности тока:

$$i = i_{\text{бдо}} + \beta_{1\text{бдо}} + k_1 \cdot \text{Cl}^3 \cdot \Pi_{\text{к}}, \text{ мкА/см}^2, \quad (6.9)$$

$$i = i_{\text{бдоп}} + \beta_{2\text{бдоп}} + k_2 \cdot \text{Cl}^3 \cdot (\Pi_{\text{о}} - \Pi_{\text{ооп}}), \text{ мкА/см}^2, \quad (6.10)$$

Приняв, что критерий плотности тока, соответствующий переходу стальной арматуры из пассивного состояния в активное, составляет около 10 мкА/см², можно получить и соответствующие формулы для расчета предельного содержания хлор-ионов) [198, 201]:

– при контроле по капиллярной пористости:

$$\text{Cl} = \sqrt[3]{\frac{10 - i_{\text{бдо}} - \beta_{1\text{бдо}}}{k_1 \cdot \Pi_{\text{к}}}}, \text{ \%}, \quad (6.11)$$

– при контроле по общей пористости:

$$\text{Cl} = \sqrt[3]{\frac{10 - i_{\text{бдоп}} - \beta_{2\text{бдоп}}}{k_2 \cdot (\Pi_{\text{о}} - \Pi_{\text{ооп}})}}, \text{ \%}. \quad (6.12)$$

Таким образом, получены простые формулы, позволяющие еще на стадии проектирования состава бетона рассчитать, в зависимости от его пористости (капиллярной или общей), критическое содержание хлор-ионов, вызывающее возможность перехода стальной арматуры из пассивного состояния в активное) [198–201].

И это может послужить основой для разработки системы прогнозирования коррозионного состояния стальной арматуры железобетонных конструкций.

В свете изложенного можно коснуться весьма перспективного технологического приема кардинального повышения плотности бетона, снижения капиллярной и общей пористости бетона – «сухого» формования. Принцип технологии заключается в уплотнении сухой бетонной смеси с последующей пропиткой водой, паром и пр. [157–163]. Этот прием позволяет получать бетон с уникальными свойствами по прочности, морозостойкости, водонепроницаемости и коррозионной стойкости, включая и защитные свойства по отношению к стальной арматуре [164–167].

6.4. Влияние ингибиторов коррозии стали на коррозионное состояние стальной арматуры

Таким образом, нами получены формулы, позволяющие рассчитывать критическое количество хлор-ионов в бетоне в связи с его структурными особенностями. Желательно было бы учесть и влажность бетона, как показано на рис. 6.22 и 6.23, однако на современном этапе развития бетоноведения это маловероятно. Попытаемся также получить уравнение для учета качественных и количественных характеристик добавок-ингибиторов коррозии стали на величину критического количества хлор-ионов. Ранее [101] такое уравнение было получено, но только для расчета критического количества хлор-ионов в % от массы растворной части бетона. Но в свете уже выполненных исследований критическое количество желательно привязать к общепринятой дозировке, а именно от массы цемента. Это позволило бы упростить проектирование состава бетона, предназначенного для эксплуатации в агрессивных средах, а также при реализации специфических технологических приемов, например, при зимнем бетонировании с использованием противоморозных добавок, содержащих хлор-ионы.

Ранее эффективность различных добавок ингибиторов была описана в литературе, причем как для «чистого» металла, так и для арматуры железобетонных конструкций [101, 168, 172–182]. При этом констатировалось, что та или иная добавка в той или иной степени влияет на коррозионное состояние стальной арматуры, но формулы для конкретных технологических расчетов получены не были. Получить их для такой оценки можно лишь после анализа экспериментов.

Нами было рассмотрено влияние некоторых химических добавок (хлорид кальция ХК, нитрит натрия НН, тетраборат натрия ТБН и тринатрийфосфат ТНФ) на коррозионное состояние стальной арматуры железобетонных. Еще раз подчеркнем, что в соответствии с П1-99 к СНиП 3.09.01-85 «Применение добавок» ТНФ не входит в перечень добавок, повышающих защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре, но согласно [189] фосфаты являются достаточно эффективными ингибиторами коррозии стали. Эксперименты проводили в соответствии с методикой, приведенной в СТБ 1168-99 «Метод контроля коррозионного состояния стальной арматуры в бетоне и защитных свойств бетона»: снимали анодные поля-

коррозионного состояния стальной арматуры в бетоне и защитных свойств бетона»: снимали анодные поляризационные кривые после изготовления образцов, через 10 и 20 циклов насыщения в воде и высушивания и оценивали коррозионное состояние арматурных стержней. Критерий – если при потенциале +300 мВ плотность поляризующего тока не превышает 10 мкА/см², то сталь находится в пассивном состоянии. Расход цемента (в этих и других опытах портландцемент ОАО «Касносельскстройматериалы», марка 500, нормальная густота 26 %) составлял 300 кг на 1 м³ бетона, доля песка в смеси заполнителей – 0,4, а марка бетонной смеси по удобоукладываемости – П1. Добавки вводили в количестве 1 и 2 % от массы цемента. Режим твердения армированных образцов – 28 суток в нормальных условиях.

На рис. 6.43 представлены некоторые результаты (после 20 циклов насыщения в воде и высушивания) из проведенных исследований, достаточно ярко характеризующих ингибирующий эффект. Как и ожидалось, наибольшие защитные свойства по отношению к стальной арматуре характерны для бетона без добавок.

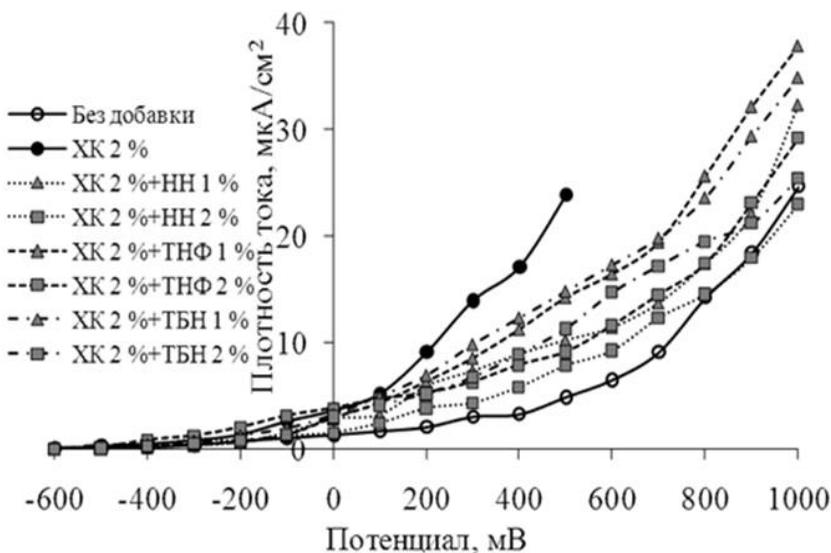


Рис. 6.43. Анодные поляризационные кривые стальной арматуры в бетоне

При введении добавки хлорида кальция в количестве 2 % (содержание хлор-ионов составляет около 1,3 % от массы цемента) плотность тока при потенциале +300 мВ достигает 15 мкА/см², то есть стальная арматура переходит в область неустойчивого пассивного состояния – коррозия стали возможна. Введение же добавок НН, ТНФ и ТБН позволяет нейтрализовать активирующее действие хлор-ионов и перевести сталь из неустойчивого пассивного состояния в пассивное. Эффективность ингибирующего действия добавок может быть выстроена в ряд: НН > ТНФ > ТБН и возрастает с увеличением их дозировки. Следует констатировать, что при введении добавки ТБН в количестве 1 % сталь находится на границе пассивного состояния. Таким образом, введение исследованных добавок в бетонную смесь позволяет повысить критическое количество хлор-ионов, вызывающих активацию стали, по меньшей мере в 2–3 раза, что согласуется с имеющимися в литературе данными.

Для получения формулы, позволяющей рассчитывать критическое количество хлор-ионов, эксперименты были расширены. Кроме описанных выше ингибиторов коррозии стали была исследована и добавка ОХП.

Оценку эффективности добавок ингибиторов коррозии стали производили в соответствии с требованиями ГОСТ 30459-96 «Добавки для бетонов. Методы определения эффективности».

При проведении экспериментов использовали цемент, аналогичный вяжущему в предыдущем опыте. Расход цемента составлял 350, песка – 750, щебня (фракции от 5 до 10 мм) – 1130 и воды – 176 кг/м³. Подвижность бетонной смеси составляла 3 см. Добавку ХК вводили в количестве 3 % от массы цемента. Ее, а также добавки ингибиторов коррозии стали (в количестве 1,50; 1,75; 2,00; 2,25; 2,50 и 3,00 % от массы цемента) вводили в бетонную смесь с водой затворения. Дозировка добавок, на основе предварительных опытов была выбрана такой, чтобы для всех исследованных добавок анодные поляризационные кривые проходили (или были близки к критической точке - плотность тока при потенциале +300 мВ должна быть примерно равной 10 мкА/см², то есть моменту перехода стали из пассивного состояния в активное). Образцы (балочки размером 7×7×14 см, центрально армированные стальными стержнями диаметром 10 мм)

твердели 28 суток в нормальных условиях, после чего снимали анодные поляризационные кривые (рис. 6.44–6.47).

Определение критического количества хлор-ионов проводили следующим образом. Начальное содержание хлор-ионов (на стадии приготовления бетонной смеси) составляло 1,92 % от массы цемента. Если предположить, что примерно 40 % хлор-ионов в процессе твердения бетона связывается в гидрохлоралюминаты кальция (как показано выше), то содержание свободных хлор-ионов к моменту испытания армированных образцов составляет 1,15 % от массы цемента. Далее на рис. 6.44–6.47 выбирались анодные поляризационные кривые, лежащие наиболее близко к критической точке. Как оказалось, для добавок НН, ОХП, ТНФ и ТБН это кривые для стальной арматуры в бетоне с расходом указанных добавок 1,75; 2,00; 2,25 и 2,50 соответственно. А далее, отнеся содержание свободных хлор-ионов к содержанию соответствующих добавок, легко рассчитывали коэффициент эффективности добавок. Конечно, это не совсем точно, поскольку коэффициент должен представлять собой не конкретное число, а некоторую область (как это и имеет место на анализируемых рисунках), но, на наш взгляд, для первоначальных расчетов вполне приемлемо. Таким образом, критическое количество хлор-ионов в бетоне с добавкой ингибитора ($Cl_{кр}^и$ % от массы цемента) определяется критическим количеством хлор-ионов в бетоне без добавки ингибитора ($Cl_{кр}^{би}$ % от массы цемента – может быть принято равным в соответствии с литературными данными и нашими исследованиями равным 0,4 %), коэффициентом эффективности добавки ингибитора ($k_{эф}^и$ в д. ед.) и дозировкой добавки (D в % от массы цемента) [198–200]:

$$Cl_{кр}^и = Cl_{кр}^{би} + k_{эф}^и \cdot D, \quad \% \quad (6.13)$$

Обработка данных на рисунках позволяет примерно оценить коэффициент эффективности исследованных добавок: 0,40; 0,35; 0,33 и 0,30 для добавок НН, ОХП, ТНФ и ТБН соответственно.

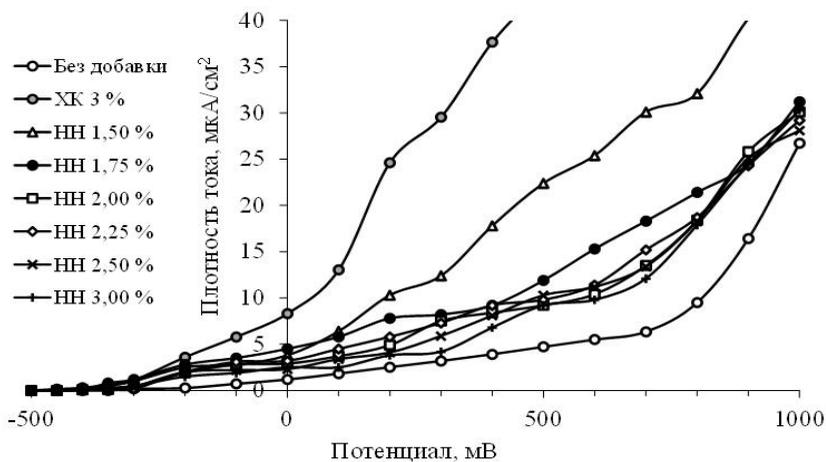


Рис. 6.44. Анодные поляризационные кривые стальной арматуры в бетоне с добавкой НН

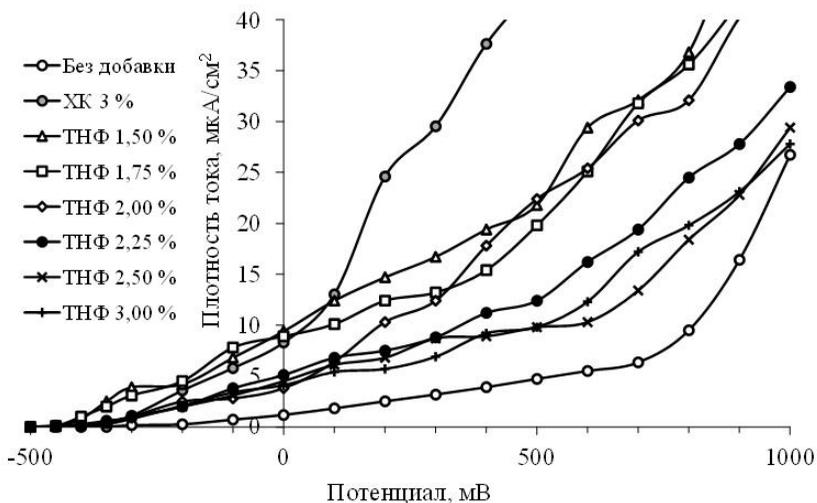


Рис. 6.45. Анодные поляризационные кривые стальной арматуры в бетоне с добавкой ТНФ

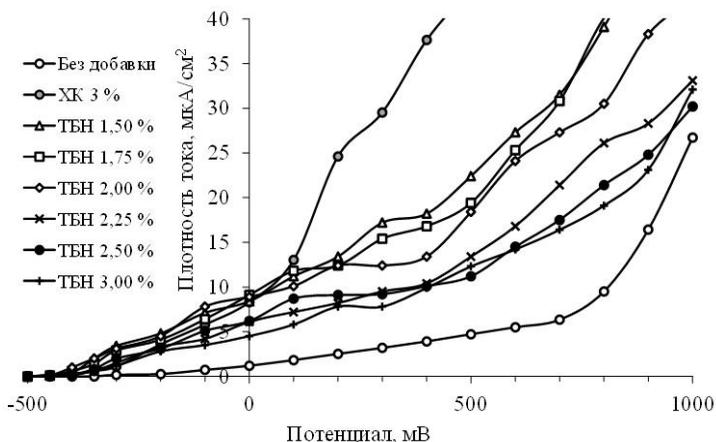


Рис. 6.46. Анодные поляризационные кривые стальной арматуры в бетоне с добавкой ТБН

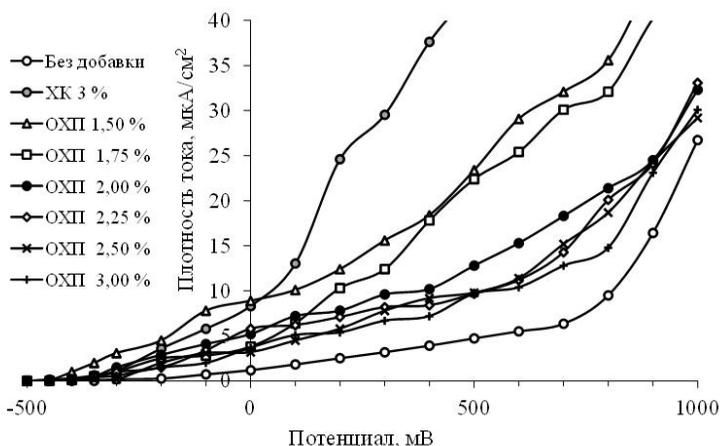


Рис. 6.47. Анодные поляризационные кривые стальной арматуры в бетоне с добавкой ОХП

Полученные результаты достаточно удобны при расчетах дозировки ингибирующих добавок как на стадии изготовления конструкций, так и в случае их эксплуатации в средах, содержащих хлор-ионы.

Инженеры технологи предпочитают не использовать добавки, содержащие хлор-ионы, при изготовлении железобетонных изделий и конструкций. Однако при ведении бетонных работ при отрицательных температурах, особенно низких, зачастую трудно избежать использования таких, например, добавок, как хлорид кальция или хлорид натрия, весьма эффективно снижающих температуру замерзания бетонной смеси.

Предположим, по рекомендательным документам рассчитано, что для обеспечения твердения (при отрицательной температуре) бетона с расходом цемента 360 и воды 180 кг/м³ необходимо ввести 3 % хлористого натрия. Необходимо рассчитать дозировку добавки ОХП, обеспечивающее пассивное состояние стальной арматуры в бетоне.

Содержание хлор-ионов в NaCl составляет около 40 %, следовательно, критическое количество хлор-ионов равно $0,4 \cdot 3 = 1,2$ % от массы цемента. Если исходить (не учитывая влияния плотности бетона на критическое количество хлор-ионов), что критическое количество хлор-ионов равно 0,4 % от массы цемента, то необходимая дозировка добавки ОХП согласно (6.14) составит [198–200]:

$$D_{\text{ОХП}} = \frac{\text{Cl}_{\text{кр}}^{\text{н}} - \text{Cl}_{\text{кр}}^{\text{би}}}{k_{\text{эф}}^{\text{н}}} = \frac{1,2 - 0,4}{0,35} = 2,3, \text{ \%}. \quad (6.15)$$

Расчеты достаточно элементарны, но, в принципе, позволяют избежать начала коррозии стальной арматуры уже на стадии твердения железобетонных изделий и конструкций.

В целом, представленные выше формулы для расчета критического количества хлор-ионов могут быть использованы для разработки системы прогнозирования длительности пассивного состояния железобетонных конструкций при внешнем воздействии на них растворов, содержащих хлор-ионы.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов:

- не обнаружена устойчивая связь коррозионного состояния стальной арматуры с содержанием «свободных» хлор-ионов, количеством хлор-ионов в единице объема бетона;
- устойчивая связь плотности коррозионного тока и стационарного потенциала стали в бетоне с различными водоцементными отношениями, прочностью, морозостойкостью и водонепроницаемостью не установлена;

- обнаружена взаимосвязь капиллярной или общей пористости бетона с коррозионным состоянием стальной арматуры;
- отсутствующая надежная связь прочности бетона и коррозионного состояния стальной арматуры, фактически заложенная в действующие нормативные документы, требует дополнительных исследований;
- получены формулы, позволяющие связать критическое количество хлор-ионов в бетоне с плотностью бетона, характеризуемой капиллярной или общей пористостью. Формулы могут послужить основой при разработке модели для прогнозирования долговечности железобетона, а также при совершенствовании действующих нормативных документов;
- результаты исследований свидетельствуют о возможности отнесения добавки ОХП к эффективным ингибиторам коррозии стальной арматуры. Добавки ТНФ (тринатрийфосфат) и ОХП могут быть включены во входящий в действующие нормативные документы перечень добавок, повышающих защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре;
- получена формула, позволяющая рассчитывать критическое количество хлор-ионов в бетоне с добавками ингибиторов коррозии стали. Действенность добавок ингибиторов может быть оценена по величине коэффициента эффективности, который для добавок НН, ОХП, ТНФ и ТБН соответственно равен 0,40; 0,35; 0,33 и 0,30. Формула может быть использована при расчете состава противоморозных добавок, обеспечивающего пассивное состояние стальной арматуры, а также при прогнозировании коррозионной стойкости железобетонных конструкций при внешнем агрессивном воздействии солей, содержащих хлор-ионы.

Результаты исследований связи структурных характеристик цементного камня и бетона с их защитными свойствами по отношению к стальной арматуре были использованы для разработки методики прогнозирования коррозионного состояния железобетона [183–188], позволяющей с достаточной для практических целей достоверностью еще на стадии проектирования состава бетонной смеси предвидеть долговечность железобетонных конструкций.

7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВОВ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ БЕТОНОВ

7.1. Апробация модели на объектах ПО «Беларускалий»

Предложенную расчетную модель можно использовать для проектирования составов коррозионностойких бетонов используя для ее уточнения результаты обследования при оценке фактического состояния бетона, подвергавшегося в процессе эксплуатации воздействию агрессивной среды [189]. В 1998–2002 гг. была проведена работа по обследованию и разработке проектной документации по усилению для ремонта и антикоррозионной защите чаши сгустителя 3-го рудоуправления ПО «Беларускалий» [189]. Основной частью данной работы являлась разработка составов коррозионностойкого бетона для восстановления разрушенных конструкций сгустителя и разработка рекомендаций по выбору материалов и технологии производства бетонных работ.

При выполнении данных работ потребовалось научное обоснование при назначении требований к составам бетонам и его характеристикам. Для этих целей была использована разработанная расчетная модель, которая позволила обосновать технологические параметры бетонных смесей и дать исходные данные проектной группе для проведения необходимых проверочных расчетов по несущей способности конструкций сгустителя.

Исходные данные для расчета технологических параметров были получены при проведении обследования конструкций сгустителя. Обследование проводилось в два этапа. На первом этапе изучалась проектная документация, где устанавливались проектные характеристики бетона (прочность, водонепроницаемость и т. д.). На втором этапе определяли фактические характеристики бетона на момент обследования.

Основной характеристикой бетона, которая позволяет определить степень коррозионного повреждения бетона является его прочность. Однако также интересует характер коррозионного повреждения. Так как большинство конструкций сгустителя железобетонные, то, выясняя характер разрушения, можно определить причины повреждения, а именно чем оно вызвано: коррозией ар-

матуры с последующим разрушением защитного слоя или разрушением самого бетона при действии коррозионной среды. На иллюстрациях приведен характер разрушения конструкций сгустителя [190] (рис. 7.1–7.5).



Рис. 7.1. Внешний вид железобетонной колонны сгустителя



Рис. 7.2. Внешний вид верхней части (чаши) сгустителя



Рис. 7.3. Внешний вид нижней части (чаши) ступителя



Рис. 7.4. Внешний вид центральной колонны ступителя

Анализ данных обследования показывает, что практически во всех случаях разрушение конструкций вызвано коррозией арматуры, т. е. связано с неверным выбором на стадии проектирования толщины и плотности защитного слоя. Сам бетон находится в удовлетворительном состоянии, о чем свидетельствуют результаты определения прочности по образцам-кернам, отобранным из конструкций. Однако существует конструкция, а именно «переливной канал» (рис. 7.5), где проявляются явные признаки повреждения бетона.



Рис. 7.5. Внешний вид «переливного канала» сгустителя

«Переливной канал» эксплуатируется в зоне переменного уровня, т. е. подвергается периодическому насыщению агрессивной средой и высушиванию, а также действию отрицательных температур в зимний период эксплуатации. Отсутствие признаков коррозии арматуры «переливного канала» связано со значительной толщиной защитного слоя. По проекту толщина защитного слоя принята 150 мм, по факту она составила от 180 до 200 мм.

Следующим этапом работ являлась разработка рекомендаций по восстановлению, ремонту и антикоррозионной защите конструкций сгустителя. Так как разработанная проектная документация предусматривала демонтаж «переливного канала» с устройством новой конструкции, появилась необходимость установить требования к

бетону и запроектировать его состав для устройства новой монолитной конструкции.

Для решения этой задачи была использована предложенная методика проектирования составов бетона. Проектирования состава начинали с оценки агрессивности эксплуатационной среды. Поскольку температура агрессивной среды в сгустителе по разным данным колеблется от 0 °С до 50 °С, то для оценки агрессивности эксплуатационной среды не подходил общепринятый метод, который заключается в назначении специальных требований к бетону (марка по водонепроницаемости). Это связано с тем, что действие нормативного документа [141] распространяется только на жидкие агрессивные среды с температурой от 5 до 25 °С, о чем есть соответствующая запись в разделе «область применения». В связи с этим было предложено для оценки агрессивности среды использовать модель (3.40). В (3.40) входит параметр k_D , который в данном случае может являться параметром, характеризующим агрессивность среды. Трансформировав (3.40) соответствующим образом, мы получили зависимость для расчета параметра k_D :

$$k_D \leq \frac{2 \cdot f_0 \left(1 + \frac{\delta}{100}\right) \frac{\alpha_{\max}}{\alpha_0 \left(1 - \frac{W_0}{100}\right)}}{n}, \text{ МПа/год}, \quad (7.1)$$

где f_0 – проектная прочность бетона, которая принята равной 35,0 МПа (по табл. 7.1);

δ – фактическая потеря прочности бетона за время эксплуатации, %;

α_{\max} – максимально возможная степень гидратации цемента, которая с допустимым приближением принята равной 100 %;

α_0 – начальная степень гидратации цемента, которая с допустимым приближением принята равной 70 %;

W_0 – водопоглощение бетона по объему, %, определялось по значению водопоглощения по массе (5.4), которое в свою очередь определяли, зная проектную марку бетона по водонепроницаемости [141];

n – время эксплуатации конструкции на момент обследования, годы.

Фактическую потерю прочности бетона определяли на основании результатов обследования по формуле

$$\delta = \frac{f_0 - f_\phi}{f_0} \cdot 100 = \frac{35,0 - 15,2}{35,0} \cdot 100 = 56,6 \%, \quad (7.2)$$

где f_ϕ – средняя прочность бетона на момент обследования, МПа (табл. 7.1)

После подстановки данных в (7.1) получаем

$$k_D \leq \frac{2 \cdot 35,0 \cdot \left(1 + \frac{56,6}{35,0}\right) \cdot \frac{100}{70} \cdot \left(1 - \frac{10,8}{100}\right)}{29} = 4,82 \text{ , МПа/год}, \quad (7.3)$$

Далее, используя зависимость (5.1) и задаваясь межремонтным сроком эксплуатации (30 лет), определяли минимально необходимую прочность бетона для принятой в проекте марки бетона по водонепроницаемости:

$$f_0 \geq \frac{30 \cdot 4,82}{2 \cdot \frac{100}{70} \cdot \left(1 - \frac{4,5 \cdot 2,4}{100}\right) \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0} = 56,7 \text{ , МПа}, \quad (7.4)$$

Коэффициенты влияния загрязненности смеси заполнителей, дополнительного объема вовлеченного воздуха и минералогического состава цемента в (7.4) приняты равными 1,0.

Используя вычисленное значение прочности бетона (56,7 МПа) запроектировали состав бетона по изложенной выше методике. Был получен следующий состав (№ 1):

цемент (ПЦ-500-Д0) – 462 кг/м³;
песок (Мк = 2,6) – 687 кг/м³;
щебень (фр. 5–20 мм) – 1148 кг/м³;
вода – 171 л/м³.

В результате экспериментальной проверки запроектированного состава фактическая подвижность бетонной смеси составила $OK_{\text{факт}} = 1,5$ см и средняя прочность бетона в возрасте 28 сут нормально-влажностного твердения $f_0 = 58,3$ МПа. Запроектированный состав в целом соответствует предъявляемым требованиям по прочности, однако, он не был рекомендован по следующим соображениям.

Учитывая, что приготовление бетонной смеси будет производиться непосредственно на стройплощадке при использовании гравитационного смесителя, бетонная смесь должна иметь подвижность не менее 5 см. Для увеличения подвижности бетонной смеси необходимо использовать пластифицирующую добавку [116, 117, 192]. В качестве такой добавки была принята пластифицирующая (водоредуцирующая) добавка С-3 [116, 117, 192]. Введение добавки С-3 позволяет существенно увеличить подвижность (с марки по подвижности П1 до П5) бетонной смеси практически без снижения прочности [116, 117, 168]. Одновременно введение добавки С-3 для получения бетонной смеси с маркой по подвижности П2 дает возможность снизить водоцементное отношение, что позволяет сократить расхода цемента без снижения прочности бетона.

Была проведена необходимая корректировка запроектированного состава бетона с учетом введения добавки С-3 и получен следующий состав (№ 2):

цемент – 430 кг/м³;

песок (Мк = 2,6) – 724 кг/м³;

щебень (фр. 5–20 мм) – 1148 кг/м³;

вода – 150 л/м³.

добавка С-3 – 0,5 % от массы цемента.

Фактические характеристики бетонной смеси и физико-механические свойства бетона с добавкой С-3 по результатам лабораторных испытаний представлены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Характеристики бетонной смеси и физико-механические свойства бетона

Параметр	№ состава	
	№ 1	№ 2
Подвижность бетонной смеси, см (марка смеси)	8,5 (П2)	7,0 (П2)
Прочность на сжатие, МПа, в возрасте 28 сут. нормального твердения	57,5 (C ³⁰ / ₃₇)	58,0 (C ³⁰ / ₃₇)
Водопоглощение по массе, %	4,1	3,8
Водонепроницаемость, МПа (марка по водонепроницаемости)	0,8 (W8)	0,8 (W8)
Морозостойкость, циклы (потеря прочности, %)	300 (4,2)	300 (3,1)

Как следует из данных в табл. 7.1, ведение добавки С-3 позволило получить бетонную смесь и бетон с требуемыми характеристиками и одновременно сократить расход цемента на 6,9 %.

Состав бетона был рекомендован и применен для устройства монолитного пояса переливного канала. Работы проводились в августе 1999 года.

В 2008 году в рамках авторского надзора по просьбе эксплуатирующей организации был проведен профилактический осмотр и обследование конструкций ступителя. На основании выполненного обследования установлено, что бетон монолитного пояса «переливного канала» находится в удовлетворительном состоянии. Прочность бетона, определенная неразрушающими методами на момент обследования составляла 55–64 МПа. Визуальным осмотром не выявлено признаков коррозионного разрушения бетона, местами имеются дефекты, вызванные механическими повреждениями.

7.2. Ускоренный метод контроля морозостойкости конструкционного бетона

Мы уже отмечали аналогию между процессами, протекающими в бетоне при его морозном разрушении и действии циклического насыщения и высушивания в растворах солей. Установлено также, что основные факторы, определяющие морозостойкость, одновременно являются основными факторами, от которых зависит коррозионная стойкость бетона (рис. 7.6 и 7.7). Более того, удастся использовать одни и те же параметры для расчета морозостойкости (3.37) и коррозионной стойкости бетона (3.40). Все это позволяет сделать вывод о том, что существует тесная связь между морозостойкостью и коррозионной стойкостью бетона, т. е. определяя, например, коррозионную стойкость бетона насыщением и высушиванием в растворе соли можно одновременно оценить его морозостойкость. Следует отметить, что эта идея не нова. Она реализована, например, в действующем ТНПА на методы испытаний заполнителя из плотных горных пород [193] для оценки морозостойкости предусмотрено два метода: обычный (прямой) – замораживание и оттаивание в воде и ускоренный (косвенный) – насыщение и высушива-

ние в растворе сульфата натрия. Приведена соответствующая таблица для перехода от ускоренных циклов к стандартным циклам замораживания и оттаивания. Применение ускоренного метода позволяет значительно сократить сроки проведения испытаний.

Для бетона существуют методы ускоренной оценки морозостойкости, которые были рассмотрены в литературном обзоре, но все из предложенных методов требуют использования дорогостоящего оборудования (низкотемпературные климатические камеры), специальной подготовки образцов, а также специального оборудования для контроля параметров, принятых для оценки морозостойкости (дилатометр, ультразвуковые приборы и т. д.). Еще одним существенным недостатком ускоренных методов определения морозостойкости является то, что приведение ускоренных циклов испытаний к стандартным иногда вызывает большие затруднения. Проиллюстрируем это на примере оценки морозостойкости по третьему методу [8]. Для этого воспользуемся экспериментальными данными (табл. 4.5 и 4.6), которые использовали для статистического анализа модели для расчета морозостойкости. На рис. 7.6 представлена взаимосвязь стандартных циклов замораживания и оттаивания (F_6^{-20}) при испытаниях по режиму $F-1$ [11] и ускоренных (F_6^{-50}) при испытаниях образцов по режиму $F-2$ [8].

Как следует из рис. 7.6, зависимость между стандартными циклами и ускоренными циклами испытаний на морозостойкость носит не линейный характер, а изменяется по квадратичному закону. Элементарная обработка данных на рис. 7.6 позволила получить зависимость, связывающую стандартные циклы замораживания и оттаивания с ускоренными циклами [194, 195]:

$$F_6^{-20} = K \cdot \sqrt{F_6^{-50}}, \text{ циклы,} \quad (7.5)$$

где K – коэффициент, зависящий от состава бетона.

Следовательно, чтобы точно определить марку бетона по морозостойкости необходимо, предварительно, основываясь на экспериментальных данных, получить зависимость стандартных циклов от ускоренных.

В отличие от ускоренных методов определения морозостойкости, насыщение и высушивание образцов не требует дорогостоящего оборудования, и в тоже время позволяет оценивать коррозионную стойкость даже самых плотных бетонов в максимально сжатые сроки. Например, при испытании образцов бетона с расходом цемента 450 кг/м^3 (состав 3–9) по режиму КС-1 количество циклов насыщения и высушивания до допустимой потери прочности 15 % составило 27 %, в то время как требовалось не менее 68 ускоренных циклов замораживания и оттаивания (режим F_6-2) до потери прочности 5 % (табл. 4.6).

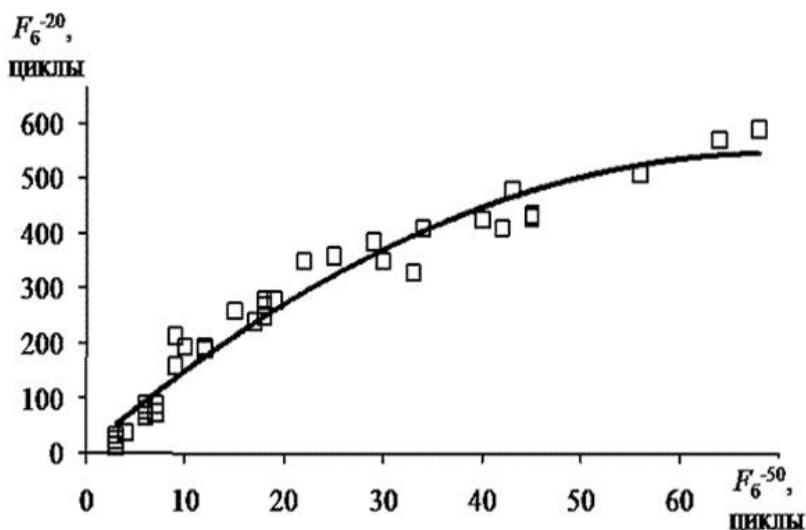


Рис. 7.6. Зависимость стандартных циклов замораживания и оттаивания (F_6^{-20}) от ускоренных циклов (F_6^{-50})

На основании изложенного выше, попытаемся выразить морозостойкость бетона (в стандартных циклах замораживания и оттаивания) через циклы насыщения и высушивания образцов в растворе соли. Для этого воспользуемся результатами испытаний образцов бетона (табл. 2.5), которые использовали при статистическом анализе модели для расчета морозостойкости и коррозионной стойкости

(табл. 4.5 и 4.11). На рис. 7.7 представлена зависимость стандартных циклов замораживания и оттаивания (F_6^{-20}) от коррозионной стойкости бетона (N_6^{KC-1}), определенной насыщением и высушиванием образцов по режиму КС-1.

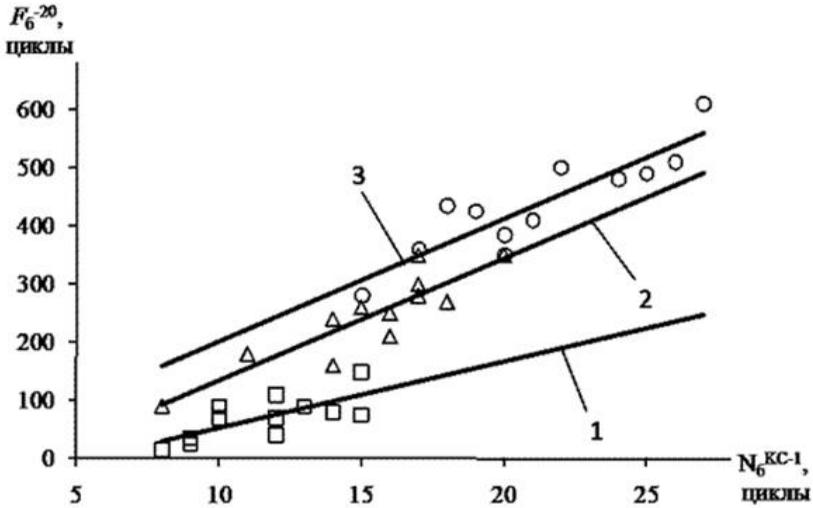


Рис. 7.7. Зависимость стандартных циклов замораживания и оттаивания (F_6^{-20}) от циклов насыщения и высушивания (N_6^{KC-1}) образцов по режиму КС-1
 1 – состав бетона с расходом цемента 250 кг/м³; 2 – состав бетона с расходом цемента 350 кг/м³; 3 – состав бетона с расходом цемента 450 кг/м³

Как следует из данных на рис. 7.7, существует устойчивая связь между циклами насыщения и высушивания и стандартными циклами замораживания и оттаивания. Как и для ускоренных циклов замораживания и оттаивания, количество циклов насыщения и высушивания зависит от состава бетона (расхода цемента).

Обработка данных на рис. 7.7 позволила получить следующую зависимость, связывающую стандартные циклы замораживания и оттаивания (F_6^{-20}) с циклами насыщения и высушивания образцов (N_6^{KC-1}) [194, 195]:

$$F_6^{-20} = A \cdot N_6^{KC-1} + B, \text{ циклы}, \quad (7.6)$$

где A и B – коэффициенты, зависящие от состава бетона (расхода цемента):

$$A = 11,4; B = - 61,6 \text{ для } \text{Ц} = 250 \text{ кг/м}^3,$$

$$A = 21,0; B = - 74,7 \text{ для } \text{Ц} = 350 \text{ кг/м}^3,$$

$$A = 21,0; B = - 8,3 \text{ для } \text{Ц} = 450 \text{ кг/м}^3.$$

Попытаемся оценить достоверность определения морозостойкости по предложенной зависимости (7.6). Для сравнения параллельно оценим достоверность определения морозостойкости с использованием стандартного метода ускоренных испытаний (F_6^ϕ – фактические результаты, F_6^p – расчетные) – табл. 7.3.

Сравнение значений коэффициентов вариации при оценке морозостойкости бетона по циклам насыщения и высушивания образцов (21,1 %) и при оценке по ускоренной методике (17,7 %) показывает, что коэффициенты вариации отличаются незначительно и, следовательно, для оценки морозостойкости бетона возможно использование метода насыщения и высушивания образцов в растворе соли.

Таблица 7.2

Статистическая оценка достоверности определения морозостойкости бетона по циклам насыщения и высушивания (7.6) и по методу ускоренных испытаний (7.5)

Серия	Морозостойкость бетона, циклы, определенная						
	F_6^ϕ	расчетом по					
		(7.6)			(7.5)		
		F_6^p	$F_6^\phi - F_6^p$	$(F_6^\phi - F_6^p)^2$	F_6^p	$F_6^\phi - F_6^p$	$(F_6^\phi - F_6^p)^2$
1	2	3	4	5	6	7	8
1-1	75	109	-34	1186	110	-35	1235
1-2	40	75	-35	1240	68	-28	754
1-3	35	41	-6	36	53	-18	324
1-4	70	52	18	324	96	-26	686
1-5	80	98	-18	324	96	-16	246
1-6	90	87	3	9	110	-20	400
1-7	70	75	-5	25	96	-26	686
1-8	190	166	24	576	177	13	179

Продолжение табл. 7.2

1	2	3	4	5	6	7	8
1-9	240	189	51	2581	238	2	4
1-10	195	109	86	7326	151	44	1962
1-11	25	41	-16	256	53	-28	774
1-12	15	30	-15	225	53	-38	1434
		$V_F, \%$		38,1	$V_F, \%$		30,0
2-1	270	303	-33	1109	249	21	441
2-2	195	261	-66	4396	177	18	334
2-3	160	177	-17	289	137	23	519
2-4	260	240	20	400	214	46	2126
2-5	250	261	-11	121	249	1	1
2-6	280	282	-2	4	261	19	371
2-7	270	219	51	2571	249	21	441
2-8	330	282	48	2274	396	-66	4376
2-9	410	366	44	1916	404	6	36
2-10	350	345	5	25	371	-21	441
2-11	215	156	59	3 441	137	78	6024
2-12	90	93	-3	9	96	-6	36
		$V_F, \%$		15,1	$V_F, \%$		14,4
3-1	430	517	-87	7517	478	-48	2299
3-2	385	412	-27	713	362	23	539
3-3	350	412	-62	3807	293	57	3219
3-4	410	433	-23	515	460	-50	2546
3-5	425	391	34	1176	448	-23	515
3-6	435	370	65	4264	478	-43	1845
3-7	480	496	-16	246	467	13	182
3-8	510	538	-28	767	525	-15	229
3-9	590	559	31	980	546	44	1913
3-10	570	559	11	121	543	27	743
3-11	360	349	11	121	324	36	1300
3-12	280	307	-27	713	249	31	945
		$V_F, \%$		10,0	$V_F, \%$		8,8
		$\bar{V}_F, \%$		21,1	$\bar{V}_F, \%$		17,7
2-2	195	261	-66	4396	177	18	334
2-3	160	177	-17	289	137	23	519

Окончание табл. 7.2

1	2	3	4	5	6	7	8
2-4	260	240	20	400	214	46	2126
2-5	250	261	-11	121	249	1	1
2-6	280	282	-2	4	261	19	371
2-7	270	219	51	2571	249	21	441
2-8	330	282	48	2274	396	-66	4376
2-9	410	366	44	1916	404	6	36
2-10	350	345	5	25	371	-21	441
2-11	215	156	59	3441	137	78	6 024
2-12	90	93	-3	9	96	-6	36
		$V_F, \%$		15,1	$V_F, \%$		14,4
3-1	430	517	-87	7517	478	-48	2299
3-2	385	412	-27	713	362	23	539
3-3	350	412	-62	3807	293	57	3219
3-4	410	433	-23	515	460	-50	2546
3-5	425	391	34	1176	448	-23	515
3-6	435	370	65	4264	478	-43	1 845
3-7	480	496	-16	246	467	13	182
3-8	510	538	-28	767	525	-15	229
3-9	590	559	31	980	546	44	1913
3-10	570	559	11	121	543	27	743
3-11	360	349	11	121	324	36	1300
3-12	280	307	-27	713	249	31	945
		$V_F, \%$		10,0	$V_F, \%$		8,8
		$\bar{V}_F, \%$		21,1	$\bar{V}_F, \%$		17,7

Можно отметить приемлемость получаемых результатов.

Библиографический список

1. The destruction of concrete by frost/ R. Collinz//Journal of the Ins. of CiV Eng. – 1944. – № 1. – P. 32.
2. The mechanism of frost action in concrete/ Т. Pow-ers//Cement, lime and gravel – 1966. – № 5. – PP. 91 – 124.
3. Nouvelles recherches sue la gelivite des betons/M. Valen-ta // Annales des institut Tech. – 1948. – № 3. – P. 16.
4. Власов, О. Е. Равновесие многокомпонентной и многофазной капиллярной системы/О. Е. Власов//Долговечность ограждающих строительных конструкций. – Москва: Госстройиздат, 1963. – 212 с.
5. Бабушкин, В. И. Физико-химические процессы коррозии бетона и железобетона/ В. И. Бабушкин. – Москва: Строй-издат, 1968. – 187 с.
6. Москвин, В. М. Бетон для строительства в суровых климатических условиях/В. М. Москвин [и др.]; под общей редакцией В. М. Москвина. – Москва: Стройиздат, 1973. – 172 с.
7. Чеховский, Ю. В. Ускоренные методы определения морозостойкости бетона. Обзорная информация/ Ю. В. Чеховский, А. В. Лифшиц// Промышленность сборного железобетона; обзорная информация – Москва: ВНИИЭСМ, 1986. – Выпуск 1. – Серия 3. – 45 с.
8. Бетоны. Ускоренные методы определения морозостойкости: ГОСТ 10060. 2–95. – Введ. 01.04.97. – Минск: Министерство архитектуры и строительства РБ, 1996. – 6 с.
9. Домокеев, А. И. Методы оценки и приемы повышения долговечности бортовых камней/А. И. Домокеев Л.: Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. Выпуск 20, 1971. – С. 51.
10. Нерубенко, С. Л. Нормирование и определение морозостойкости бетона/ С. Л. Нерубенко, В. А. Гвоздев// Долговечность и защита конструкций от коррозии: материалы международной конференции, Москва, 25–27 мая 1999 г. – Москва, 1999. – С. 232–238.
11. Бетоны. Базовый метод определения морозостойкости: ГОСТ 10060.1 – 95. – Введ. 01.04.97. – Минск: Министерство архитектуры и строительства РБ, 1996. – 6 с.
12. Добролюбов, Г. В. Прогнозирование долговечности бетона с добавками/ Г. В. Добролюбов, В. Б. Рагинов, Т. И. Розенберг; под общ. ред. Г. В. Добролюбова. – Москва: Стройиздат, 1983. – 212 с.

13. Горчаков, Г. И. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений/ Г. И. Горчаков, М. М. Капкин, Б. Г. Скрамтаев – Москва: Стройиздат, 1965. – 195 с.

14. Горчаков, Г. И. Зависимость морозостойкости бетонов от их структуры и температурных деформаций/ Г. И. Горчаков [и др.]// Бетон и железобетон, 1972. – № 10. – С. 7–10.

15. Баженов, Ю. М. Структурные характеристики бетонов/ Ю. М. Баженов [и др.]// Бетон и железобетон, 1972. – № 9. – С. 19.

16. Прогнозирование морозостойкости бетона при выборе его состава/ А. Е. Шейкин// Бетон и железобетон – 1979. – № 11. – С. 25–27.

17. Структурные изменения ячеистых бетонов при испытании на морозостойкость/ А. Н. Меркин [и др.]// Бетон и железобетон. – 1974. – № 11. – С. 11.

18. Бутт, Ю. М. Исследование влияния структуры цементного камня на морозостойкость/ Ю. М. Бутт [и др.]// Бетон и железобетон. – 1972. – № 1. – С. 21.

19. Горчаков, Г. И. Состав, структура и свойства цементных бетонов/ Г. И. Горчаков [и др.]; под редакцией Г. И. Горчакова. – Москва: Стройиздат, 1976. – 145 с.

20. Шейкин, А. Е. Цементные бетоны высокой морозостойкости/ А. Е. Шейкин, Л. М. Добшиц; под ред. А. Е. Шейкина. – Ленинград: Стройиздат, Ленинградское отд., 1989. – 128 с.

21. Пауэрс, Т. К. Физическая структура портландцементного теста/ Т. К. Пауэрс// Химия цемента; под ред. Х. Ф. У. Тейлора, пер. с англ. – Москва: Стройиздат, 1969. – С. 300–819.

22. Сизов, В. П. Прогнозирование морозостойкости бетона/ В. П. Сизов// Бетон и железобетон. – 1978. – № 10. – С. 25–27.

23. Бугрим, С. Ф. Ускоренный метод оценки морозостойкости бетона/ С. Ф. Бугрим// сб. науч. Трудов. – Москва: ВНИИСТ, 1977. – Вып. 36. – 89 с.

24. Ковшар, С. Н. Применение коэффициентов переноса влаги для оценки морозостойкости бетона / С. Н. Ковшар // Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций строительства зданий и сооружений: материалы II Межвузовской научно-технической конференции; Брест, 21–22 апреля 1998 г. – Брестский политехнический институт, 1998; редкол.: Н. П. Блещик [и др.] – Брест, 1998. – Ч. 1. – С. 107–110.

25. Лыков, А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах/ А. В. Лыков – Минск: Высшая школа, 1974. – 290 с.
26. Powers, T. C. Void spacing as a basis for producing air-entrained Concrete. //J. ACI, Proc. – 1954. – V50. – PP. 38–51.
27. Ковальская, Н. Н. Морозостойкость пропаренного бетона с добавками ПАВ/ Н. Н. Ковальская [и др.]//Бетон и железобетон. – 1982. – № 3. – С. 13–15.
28. Стольников, В. В. О теоретических основах сопротивляемости цементного камня и бетонов циклам замораживания и оттаивания/ В. В. Стольников// Второй международный симпозиум по зимнему бетонированию – Москва: Стройиздат, 1975. – Т. 2. – С. 253–263.
29. Горчаков, Г. И. Прогнозирование морозостойкости бетона с добавками/ Г. И. Горчаков [и др.]//Бетон и железобетон. – 1972. – № 10. – С. 7–10.
30. Dobrolubov, G. New Microscopic Method of Determining the Resistance of Highway Concrete to Freezing and to Anti-freeze Salts. // 14 World Congress of Road, Prague, Perm. In-tern. Ass. of Road Congress. – Q2 3/3. – 1971. – PP. 67–83.
31. Способ прогнозирования морозостойкости и водонепроницаемости бетонов по параметру воздухопроницаемости: а. с. № 5025220/33 от 29.01.1992г.
32. Бабицкий, В. В. Прогнозирование морозостойкости бетона/ В. В. Бабицкий, А. А. Дрозд// Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: материалы XI Международного научно-методического межвузовского семинара; Брест 25–27 ноября 2004 г. / Брестский государственный технический университет, 2005; редкол.: Н.П. Блещик [и др.] – Брест, 2005. – Ч. 1. – С. 212–217.
33. Бабицкий, В. В. Ускоренный метод определения морозостойкости бетона/В. В. Бабицкий [и др.] // НТИ Мелиорация и водное хозяйство. – 1979. – № 4. – С. 2–5.
34. Баженов, Ю. М. Структурные характеристики бетонов/ Ю. М. Баженов [и др.]// Бетон и железобетон. – 1972. – № 9. – С. 19.
35. Баженов, Ю. М. Способы определения состава бетона различных видов/ Ю. М. Баженов – Москва: Стройиздат, 1975. – 272 с.
36. Баженов, Ю. М. Получение бетона заданных свойств/ Ю. М. Баженов □и др. □, под редакцией Ю. М. Баженова. – Москва: Стройиздат, 1978. – 54 с.

37. Орендлихер, Л. П. Способы оценки влияния поверхностной гидрофобизации бетона и модифицирующих его структуру добавок/ Л. П. Орендлихер [и др.]// Бетон и железобетон. – 1979. – № 5. – С. 28–30.

38. Бетоны. Дилатометрический метод ускоренного определения морозостойкости: ГОСТ 10060.3 – 95. – Введ. 01.04.97. – Минск: Министерство архитектуры и строительства РБ, 1996. – 6 с.

39. Лифанов, И. И. К вопросу прогнозирования долговечности бетона/ И. И. Лифанов// Сб. трудов МИСИ – Москва. – № 141.

40. Печкин, О. Я. Оценка напряженного состояния бетонов при замораживании/ О. Я. Печкин// Бетон и железобетон. – 1978. – № 3. – С. 3–5.

41. Журков, С. Н. Напряжение в бетоне при замораживании/ С. Н. Журков, Э. И. Томашевский// Некоторые проблемы прочности твердого тела: сб. науч. труд. / Из-во «Наука». – 1959. – 68 с.

42. Шестоперов, С. В. Исследование возможности применения ультразвука для оценки морозостойкости бетона/ С. В. Шестоперов [и др.]// Бетон и железобетон. – 1979. – № 2. – С. 13–15.

43. Вайншток, И. В. Физические основы ультразвукового импульсного метода оценки прочности бетона/ И. С. Вайншток// Бетон и железобетон. – 1969. – № 7. – С. 18–20.

44. Разработать способы определения водонепроницаемости и морозостойкости гидротехнических бетонов неразрушающими методами: отчет о НИР (сводный.)/ Оргэнерго-строй; рук. темы Ю. Г. Хаюгин. – Москва, 1979. – 71 с. – № ГР 76028368.

45. Аль-Факих Омар Ахмед, Мохаммед Прочность обычного, модифицированного и напрягающего бетонов конструкций при циклическом замораживании-оттаивании с позиции механики разрушения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01/ Аль-Факих Омар; БНТУ – Минск, 2005. – 19 с.

46. Бондарович, А. И. Методика ускоренной оценки морозостойкости вибропрессованного бетона в изделиях/ А. И. Бондарович, Э. И. Батяновский// Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. трудов/ Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. РУП «Институт БелНИИС»; редкол. М. Ф. Марковский (председатель) □ и др. □. – Минск: издатель А. Н. Вараксин, 2014 – №6. – С. 34–44.

47. Дворкин, Л. И. Оптимальное проектирование составов бетона/ Л. И. Дворкин – Львов: Вища школа, 1981. – 159 с.

48. Исследование и разработка нового метода ускоренных испытаний бетона на морозостойкость: отчет о НИР (заключ.)/ МИСИ им. Куйбышева; рук. темы Н. Ф. Еремин – Москва, 1979. – 226с. – № ГР 76095530.

49. Коломиец, В. И. О целесообразности оценки морозостойкости высокопрочного керамзитобетона по уровню допустимых напряжений в структуре материала/В. И. Коломиец//Долговечность строительных конструкций. Теория и практика защиты от коррозии: материалы международной конференции, Москва, 7–9 окт. 2002 г./ НИИЖБ; ред-кол.: А. И. Звездов [и др.] – Москва, 2002. – С. 165–171.

50. Коломиец, В. И. К механизму морозного разрушения бетона/ В. И. Коломиец//Долговечность и защита конструкций от коррозии: материалы международной конференции, Москва, 25–27 мая 1999 г./ НИИЖБ; редкол.: А.И. Звездов [и др.], Москва, 1999. – С. 157–166.

51. Фокин, Г. А. Исследование морозостойкости ячеистых бетонов и методы ее повышения/ автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01/ Г. А. Фокин, МИСИ им. В. В. Куйбышева – Москва, 1968. – 14 с.

52. Vesikari, E. Durability design of concrete structures with respect to frost attack/E. Vesikari// Proceedings of the Fourth International Symposium on Cold Region Development. 13–16 June / Association of Finnish Civil Engineers. RIL, 2 pp.

53. Бетоны. Структурно-механический метод ускоренного определения морозостойкости: ГОСТ 10060.4 – 95. – Введ. 01.04.97. – Минск: Министерство архитектуры и строительства РБ, 1996. – 21 с.

54. Bleschic, N. Premises and major principles of deformation rapid structure-mechanical method of frost-resistance determination of lightweight concrete under single freezing and defrosting / N. Bleschic, O. Kulazherko//Durability design and fracture mechanics of concrete structures: international conference, Minsk, feb. 2003./БНТУ; редкол. Б. М. Хрусталева, С. Н. Леонович, Минск, 2003. – С. 216–226.

55. Блещик, Н. П. Предпосылки к ускоренному определению морозостойкости бетона структурно-механическим методом/ Н. П. Блещик, О. В. Лазаренко// Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строи-

тельства зданий и сооружений; материалы II межвузовской научно-технической конференции: Брест, 21–22 апр. 1998 г.; под ред. Н. П. Блещика [и др.] / Брестский политехнический институт – Брест, 1998. – С. 30–36.

56. Савин, В. И. К теории морозостойкости легких бетонов/ В. И. Савин// Долговечность и защита конструкций от коррозии: материалы международной конференции, Москва, 25–27 мая 1999 г. / НИИЖБ; редкол.: А. И. Звездов [и др.], Москва. 1999. – С. 213–218.

57. Москвин, В. М. Коррозия бетона/ В. М. Москвин. – Москва: Стройиздат, 1952. – 323 с.

58. Москвин, В. М. Коррозия бетона при действии калийных солей/ В. М. Москвин. – Москва, 1938: «Калий». – № 2. – С. 40–43.

59. Ильчуков, П. П. Влияние калийных солей на бетон/ П. П. Ильчуков // Строительная промышленность. – № 8, 1938. – С. 55–60.

60. Адамчик, К. А. К вопросу о причинах разрушения бетона морских сооружений в зоне переменного уровня и о мерах борьбы с разрушениями/ К. А. Адамчик//Коррозия бетона и методы борьбы с ней; сб. науч. трудов/ Из-во АН СССР, Москва, 1954. – 156 с.

61. Адамчик, К. А. Коррозионная морозостойкость бетонов/ К. А. Адамчик//Защита строительных конструкций от коррозии; сб. науч. трудов/ Госстройиздат, Москва, 1961. – 133 с.

62. Кинд, В. А. Условия образования сульфоалюмината кальция/ В. А. Кинд, А. А. Александровский// Строительные материалы № 2, 1929. – С. 37–50.

63. Кинд, В. А. Коррозия цементов и бетонов в гидротехнических сооружениях/ В. А. Кинд – Москва – Ленинград: Госэнергоиздат, 1955. – 370 с.

64. Бутт, Ю. М. Долговечность автоклавных силикатных материалов/ Ю. М. Бутт, К. К. Куатбаев. – Москва: Изд-во литературы по строительству, 1966. – 123 с.

65. Чехов, А. П. Исследование стойкости бетонных и железобетонных хранилищ минеральных удобрений/ А. П. Чехов, В. П. Митрохин// Серия «Строительство и архитектура»; Москва: изд. ВУЗов, 1966. – № 9. – 115 с.

66. Суботкин, М. И. Коррозия строительных конструкций на калийных комбинатах/ М. И. Суботкин, Л. Г. Токарева // Защита стро-

ительных конструкций от коррозии; сб. науч. трудов. Москва: Госстройиздат, 1962. – 125 с.

67. Токарева, Л. Г. Изучение коррозиестойчивости бетона в условиях воздействия агрессивных растворов на калийных комбинатах/ Л. Г. Токарева// сб. науч. трудов конференции. – Минск: Издво «Наука и техника», 1965. – 122 с.

68. Минас, А. И. Изучение солевой формы физической коррозии строительных материалов/ А. И. Минас// Вестник Казахского филиала АСИА СССР № 1 и 2, 1958. – 133 с.

69. Минас, А. И. Результаты изучения солевой формы физической коррозии строительных материалов/ А. И. Минас// Труды Казахского филиала АСИА СССР. Сб. 2(4), 1960. – 135 с.

70. Минас, А. И. Защита сооружений от солевой формы физической коррозии/ А. И. Минас// Защита строительных конструкций от коррозии; сб. науч. трудов. Москва: Госстройиздат, 1961. – 128 с.

71. Барташевич, А. А. Исследование стойкости цементного камня и бетона при солевой форме физической агрессии/ А. А. Барташевич// Бетон и железобетон. – № 11, 1964. – С. 33–35.

72. Барташевич, А. А. Механизм разрушения бетона под воздействием калийных солей / А. А. Барташевич// Коррозия и защита бетонных и железобетонных конструкций: тезисы докладов XXI научной конференции, Ленинград, 28 янв. 1963 г. / Ленинградский инженерно-строительный институт; редкол: Т. Г. Паюсова [и др.]. – Ленинград, 1963. – Вып. 1. – С. 171–172.

73. Объедков, В. А. Разрушение и методы защиты конструкций зданий обогатительных фабрик калийных комбинатов/ В. А. Объедков, А. С. Осментов// Износ и защита конструкций промышленных зданий с агрессивной средой производства: сб. науч. трудов/ Стройиздат. – Москва, 1962. – Вып. 2. – 86 с.

74. Станишевская, И. В. Механизм разрушения и способы повышения коррозионной стойкости бетона при диффузии и кристаллизации растворов солей сильвинита: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.23.05/ И. В. Станишевская; Белорус. политех. институт. – Минск, 1969. – 28 с.

75. Шайтаров, Л. Д. Исследование влияния некоторых технологических факторов на стойкость цементных материалов в условиях калийной агрессии: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.23.05/ Л. Д. Шайтаров; Белорус. политех. институт. – Минск, 1967. – 25 с.

76. Бабушкин, В. И. Коррозия бетона и железобетона и борьба с ней/ В. И. Бабушкин [и др.]// Журнал ВХО им. Менделеева – 1965. – Т. 10. – № 5. – С. 22–38.

77. Ахвердов, И. Н. Влияние расклинивающего действия воды на изменение прочности бетона при циклическом насыщении солями/ И. Н. Ахвердов, Е. П. Довнар// ДАН БССР – 1968. – Т. XII. – № 5. – С. 20–43.

78. Ахвердов, И. Н. Технология железобетонных конструкций специального назначения/ И. Н. Ахвердов. – Минск: Наука и техника, 1993. – 240 с.

79. Шалимо, М. А. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии/ М. А. Шалимо. – Минск: Высшая школа, 1986. – 200 с.

80. Гусев, Б. В. Особенности математических моделей коррозии бетона// Б. В. Гусев, А. С. Файвусович// Долговечность и защита конструкций от коррозии: материалы международной конференции, Москва, 25–27 мая 1999 г./ НИИЖБ; редкол. А. И. Звездов [и др.]. – Москва, 1999. – С. 61–66.

81. Барташевич, А. А. К механизму солевой физической коррозии бетона/ А. А. Барташевич [и др.]// Защита строительных конструкций в агрессивных средах химических и нефтехимических производств: сб. науч. трудов/ Мин-промстрой СССР, Москва, 1970. – 72 с.

82. Путан, Л. А. Исследование определяющих причин солевой физической коррозии цементных материалов: авто-реф. дис.... канд. техн. наук: 05.23.05/ Л. А. Путан; Бело-рус. политех. институт. – Минск, 1971. – 26 с.

83. Крейс, У. И. Косвенная оценка коррозионной стойкости бетонов по показателям их физической структуры/ У. И. Крейс, Т. К. Нигол // Тр. НИИЖБ. Москва, 1975. – Вып.17. – С. 100–132.

84. Москвин, В. М. Коррозия бетона и железобетона и методы их защиты/ В. М. Москвин [и др.] – Москва: Стройиз-дат, 1980 – 536 с.

85. Исследование кристаллизации и диффузии калийных солей в пористой структуре цементного камня: отчет о НИР (заключ)/ Лаборатория антикоррозионной защиты БПИ; рук. темы А. А. Барташевич. – Минск, 1967. – 247 с. – № ГР 75058286.

86. Шайтаров, Л. Д. Исследование влияния некоторых технологических факторов на стойкость цементных материалов в условиях калийной агрессии: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.23.05/ Л. Д. Шайтаров; Белорус. политех. институт. – Минск, 1968. – 28 с.

87. Чайка, Н. А. Исследование коррозии бетонов различной структуры под действием растворов хлоридов калия/ Н. А. Чайка – Москва: НИИЖБ, 1973. – 128 с.

88. Гагарин, В. Г. Теория перемещения влаги в материале при капиллярном всасывании воды/ В. Г. Гагарин// Долговечность и защита конструкций от коррозии: материалы международной конференции, Москва, 25 – 27 мая 1999 года/ редкол. А. И. Звездов [и др.]. – Москва: НИИЖБ, 1999. – С. 166 – 175.

89. Яковлев, В. В. О некоторых особенностях механизма коррозии бетона в жидких средах/ В. В. Яковлев// Долговечность и защита конструкций от коррозии: материалы международной конференции, Москва, 25–27 мая 1999 года/редкол. А. И. Звездов [и др.], Москва: НИИЖБ, 1999. – С. 87–91.

90. Бабицкий, В. В. Оценка коррозии бетона при воздействии солей хлоридов // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2005. – № 5. – С. 20–23.

91. Бабицкий, В. В. Оценка сорбционных характеристик цементного камня // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2005. – № 2. – С. 19–22.

92. Иванов, Ф. М. Защита железобетонных транспортных сооружений от коррозии/ Ф. М. Иванов – Москва: изд-во «Транспорт», 1968. – 175 с.

93. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона/ И. Н. Ахвердов – Москва: Стройиздат, 1981. – 464 с.

94. Исследование долговечности железобетонных конструкций и разработка технологических приемов ее повышения на предприятиях минеральных удобрений: отчет о НИР (промежут.)/ Лаборатория антикоррозионной защиты БПИ; рук. темы А. А. Барташевич – Минск, 1972 – 161 с. – № ГР 75058286.

95. Алексеев, С. Н. Долговечность железобетона в агрессивных средах/ С. Н. Алексеев [и др.] – Москва: Стройиздат, 1990. – 320 с.

96. Нигол, Т. К. Исследование автоклавных сланцезольных бетонов в агрессивных средах: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05/ Т. К. Нигол; АН Эстонской ССР Со-вет физико-математических и технических наук – Таллин, 1966. – 22 с.

97. Знакомский, В. Ф. Исследование стойкости керамзитобетона при одновременном воздействии отрицательных температур и агрессивных жидкостей: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05/ В. Ф. Знакомский; Ростовский инж. строит. Институт. – Ростов-на-Дону, 1974. – 17 с.

98. Гуджеджиани, Э. Н. Особенности процессов коррозии и повышение коррозионной стойкости бетона подземных сооружений в сероводородных минерализованных водах: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05/ Э. Н. Гуджеджиани; НИИЖБ - Москва, 1980. – 21 с.

99. Исследование долговечности железобетонных конструкций на предприятиях минеральных удобрений и разработка технологических приемов ее повышения: отчет о НИР (заключ.)/ БПИ, рук. темы А. А. Барташевич - Минск, 1975 – 223 с. – № ГР 75058286.

100. Ларионовой, З. М. Методы исследования цементного камня и бетона/ под ред. З. М. Ларионовой – Москва: изд-во литературы по строительству, 1970. – 108 с.

101. Бабицкий, В. В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05/ В. В. Бабицкий. – Минск, 2006. – 540 с.

102. Бабицкий, В. В. Прогнозирование степени гидратации цемента с химическими добавками // Материалы, технологии, инструменты. – 2005. – № 1. – С. 76–79.

103. Бабицкий, В. В. Прогнозирование степени гидратации цемента // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь: Сб. трудов VII Международного научно-методического семинара/ Под ред. Н. П. Блещика, А. А. Борисевича, Т. М. Пецольда – Брест: БГТУ, 2001. – С. 211– 215.

104. Бабицкий, В. В. Вакуумная активация гидратации цемента/ В. В. Бабицкий, А. А. Дрозд, Я. Н. Ковалев // Известия Белорусской инженерной академии. – 2003. – № 2 (16). – С. 46–50.

105. Пауэрс, Т. Физические свойства цементного теста и камня/ Т. Пауэрс// в кн.: Четвертый Международный конгресс по химии цемента – Москва: Стройиздат, 1964. – С. 402–438.

106. Десов, А. Е. Некоторые вопросы структуры, прочности и деформаций бетонов/ А. Е. Десов // Структура, прочность и деформации бетонов. – Москва: Стройиздат, 1966. – С. 4–59.

107. Кривенко, П. В. Долговечность шлакощелочного бетона/ П. В. Кривенко, Е. К. Пушкарева – Киев: Будівельник, 1993. – 224 с.

108. Бетоны. Методы определения показателей пористости: ГОСТ 12730.4-78. – Введ. 01.01.80. – Москва: Государственный комитет СССР по делам строительства, 1978. – 8 с.

109. Бетоны. Методы определения водопоглощения: ГОСТ 12730.3-78. – Введ. 01.01.80. – Москва: Государственный комитет СССР по делам строительства, 1978. – 3 с.

110. Бетоны. Методы определения средней плотности: ГОСТ 12730.1-78. – Введ. 01.01.80. – Москва: Государственный комитет СССР по делам строительства, 1978. – 5 с.

111. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180-90. – Введ. 01.01.91 – Москва: Государственный комитет СССР по делам строительства, 1989. – 45 с.

112. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия: ГОСТ 10178-85. – Введ. 01.01.87. – Москва: Государственный комитет СССР по делам строительства, 1985. – 7 с.

113. Песок для строительных работ. Технические условия: ГОСТ 8736-93. – Введ. 01.01.96. – Минск: Министерство архитектуры и строительства РБ, 1995. – 11 с.

114. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия: ГОСТ 8267-93. – Введ. 01.01.95. – Минск: Министерство архитектуры и строительства РБ, 1995. – 15 с.

115. Вода для бетонов и растворов. Технические условия: СТБ 1114-98. – Введ. 01.01.99. – Минск: Министерство архитектуры и строительства РБ, 1998. – 12 с.

116. Добавки для бетонов. Общие технические условия: СТБ 1112-98. – Введ. 01.01.99. – Минск: Министерство архитектуры и строительства РБ, 1998. – 23 с.

117. Применение добавок в бетоне: Пособие П1-99 к СНиП 3.09.01-85. – Введ. 01.07.2000. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 1999. – 36 с.

118. Смеси бетонные. Методы испытаний: СТБ 1545-2005 – Введ. 01.07.2005. – Минск: Министерство архитектуры и строительства РБ, 2005. – 20 с.

119. Сотская, Х. Н. Обработка результатов лабораторных измерений/ Х. Н. Сотская, А. С. Кузнецов// Минск: «Высшая школа», 1971. – 40 с.

120. Гольдштейн, М. Н. Механические свойства грунтов/ М. Н. Гольдштейн. – Москва: Стройиздат, 1973. – 375 с.

121. Большаков, В. И. Основы теории и методологии многопараметрического проектирования составов бетона/ В. И. Большаков, Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – Днепропетровск: ПГАСА, 2006. – 360 с.

122. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля: ГОСТ 22690-88 – Введ. 01.01.1991– Москва: Государственный комитет СССР по делам строительства, 1988. – 26 с.

123. Шейкин, А. Е. Структура и свойства цементных бетонов/ А. Е. Шейкин, Ю. В. Чеховский, М. И. Бруссер. – Москва: Стройиздат, 1979. – 344 с.

124. Шейкин, А. Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня/ А. Е. Шейкин – Москва: Стройиздат, 1974. – 192 с.

125. Бабицкий, В. В. Прогнозирование и повышение коррозионной стойкости железобетона в среде аэрозолей и растворов силиката: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05/ В. В. Бабицкий. – Минск, 1982. – 21 с.

126. Волженский, А. В. Минеральные вяжущие вещества/ А. В. Волженский – Москва: Стройиздат, 1986. – 464 с.

127. Иванов, Ф. М. Влияние тепловлажностной обработки на структуру и свойства цементных растворов/ Ф. М. Иванов [и др.]// Проблемы ускорения твердения бетона при изготовлении сборных железобетонных конструкций: доклады международной конференции, Москва, июль, 1964 г. – Москва: Стройиздат, 1964. – 10 с.

128. Мощанский, Н. А. Плотность и стойкость бетонов/ Н. А. Мощанский. – Москва: Госстройиздат, 1951. – 175 с.

129. Кухлинг, Х. Справочник по физике/ Х. Кухлинг; перевод с немецкого под ред. Е. М. Лейкина. – Москва: издательство «МИР», 1985. – 520 с.

130. Бетон тяжелые и мелкозернистые. Технические условия: ГОСТ 26633-91 – Введ. 01.01.1992. – Москва: Государственный строительный комитет СССР, 1991. – 23 с.

131. Руководство по подбору составов тяжелого бетона/ НИИЖБ Госстроя СССР – Москва, 1979. – 102 с.

132. Рекомендации по проектированию составов тяжелого бетона расчетно-графическим методом. Минск: Белавтодор, 2005. – 50 с.

133. Горчаков, Г. И. О выборе морозостойких цементов и бетонов для гидротехнических сооружений/ Г. И. Горчаков// Труды Государственного Всесоюзного научно-исследовательского института цементной промышленности. – «НИИЦемент». – Выпуск 8. – Москва: Промстройиздат, 1954. – с. 50 – 114.

134. Шестоперов, С. В. Долговечность бетона/ С. В. Шестоперов. – Москва: Научно-техническое издательство автотранспортной литературы, 1955. – 480 с.

135. Каплан, А. С. Направленное регулирование морозостойкости применением комплексных добавок электролитов и ПАВ/ А. С. Каплан, Т. И. Розенберг// Труды ВНИИСТ - «Специальные материалы для строительства объектов нефтяной и газовой промышленности». – Москва, 1978. – с. 97 – 109.

136. Бетон. Часть 1. Технические требования, эксплуатационные характеристики, производство и соответствие требованиям: NF EN 206-1-2004. – Введ. 01.04.2004. – 95 с.

137. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования: СНБ 5.03.01-02 – Введ. 01.07.2003. – Минск: Министерство строительства и архитектуры Республики Беларусь, 2002. – 144 с.

138. Бетоны конструкционные. Технические условия: СТБ 1544-2005. – Введ. 01.07.2005 – Минск: Министерство архитектуры и строительства РБ, 2005. – 20 с.

139. Подвальный, А. М. Об оценке результатов коррозионных испытаний и марках бетона по морозостойкости/ А. М. Подвальный// Бетон и железобетон, 2002. – № 5. – С. 27–29.

140. Подвальный, А. М. О концепции обеспечения морозостойкости бетона в конструкциях зданий и сооружений/ А. М. Подвальный// Строительные материалы, 2004. – №6. – С. 4–6.

141. СНиП 2.03.11-85. Защита строительных конструкций от коррозии: СНиП 2.03.11-85. – Введ. 01.01.86. – Москва: Государственный комитет СССР по делам строительства, 1985. – 47 с.

142. Бабицкий, В. В. Многофакторное проектирование состава бетона/ В. В. Бабицкий, Я. Н. Ковалев // Материалы, технологии, инструменты. – 2005. – № 1. – С. 67–71.

143. Бабицкий, В. В. Подбор составов бетона с учетом прочности, водонепроницаемости и морозостойкости расчетно-графическим методом и на микроЭВМ/ В. В. Бабицкий // Сб. Пути экономии цемента и проблемы применения химических добавок в строительстве: Материалы науч. конф. / Госстрой БССР. Минск, 1991. – С. 64–65.

144. Бабицкий, В. В. Рекомендации по проектированию составов тяжелого бетона расчетно-графическим методом/ В. В. Бабицкий [и др.]// Минск: БПИ, 1987. – 48 с.

145. Бабицкий, В. В. Рекомендации по проектированию составов тяжелого бетона расчетно-графическим методом/ В. В. Бабицкий, Э. И. Батяновский// Мн: Департамент Белавтодор, 2005. – 50 с.

146. Суходоева, Н. В. Методика проектирования состава бетона / Н. В. Суходоева, В. В. Бабицкий // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 2. – с. 167–176.

147. Френкель, И. М. О расчете прочности бетона по формулам / И. М. Френкель // Бетон и железобетон. – 1974. – № 9. – С. 8–9.

148. Бабицкий, В. В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона / В. В. Бабицкий // Строительная наука и техника. – 2005. – № 2. – С. 33–38.

149. Бабицкий, В. В. Коррозионное состояние стальной арматуры в центрифугированном полимербетоне/ В. В. Бабицкий, А. К. Далевский, П. И. Юхневский, В. Л. Марцинкевич, Н. Л. Полейко, А. П. Пашков, В. И. Соломатов // Строительство и архитектура Белоруссии. – 1980. – № 4. – С. 24–25.

150. Леонович, С. Н. Вероятностная оценка коррозии арматуры в существующих железобетонных конструкциях при хлоридной агрессии / С. Н. Леонович // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь: сб трудов VII Международного научно-методического семинара / под ред. Н. П. Блещика, А. А. Борисевича, Т. М. Пецольда – Брест: БГТУ, 2001. – С. 435–439.

151. Полейко, Н. Л. Исследование коррозионного воздействия ПВК на арматуру в бетоне. / Н. Л. Полейко, Н. С. Протько // Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительства зданий и сооружений: сб статей I научно-методического межвузовского семинара / под ред. Н. П. Блещика, Э. И. Батяновского. – Брест: БПИ, 1998. – С. 141–144.

152. Алексеев, С. Н. Изучение коррозии стали в бетоне, погруженном в раствор электролита / С. Н. Алексеев, Н. К. Розенталь, И. Г. Катаев // В кн.: Защита от коррозии строительных конструкций и повышение их долговечности. – М.: Стройиздат, 1969. – С. 10–19.

153. Москвин, В. М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В. М. Москвин [и др.] // под общ.ред. В. М. Москвина. – М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.

154. СТБ 1168-99. Бетоны. Метод контроля коррозионного состояния стальной арматуры в бетоне и защитных свойств бетона. – Мн.: Минстройархитектуры Республики Беларусь, 1999. – 20 с.

155. Бабицкий, В. В. Оценка степени коррозии стальной арматуры железобетонных конструкций/В. В. Бабицкий // Строительство и эксплуатация автомобильных дорог и мостов. Сб. научных трудов. Вып. 16 / Мн.: РУП «Бел-дорНИИ», 2004. – С. 168–172.

156. Бабицкий, В. В. Контроль коррозионного состояния стальной арматуры железобетонных конструкций/ В. В. Бабицкий // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2005. – № 2 – С. 69–72.

157. Батыновский, Э. И. Технологические особенности применения способа сухого формования в монолитном строительстве / Э. И. Батыновский [и др.] //Технология моно-литного домостроения: Тез.докл.научн. конф. /ТИСИ. – Томск, 1989. – С. 56–57.

158. Батыновский, Э. И. Особо плотный бетон с умеренным содержанием цемента/ Э. И. Батыновский, В. В. Бабицкий,

А. А. Дрозд // Ресурсосберегающие технологии в производстве сборного железобетона: Сб. тез. докл. науч. конф. /Урало-Сибирский Дом экономической и научно-технической пропаганды /НИИЖБ Госстроя СССР. – Челябинск, 1990. – С. 21–22.

159. Батыновский, Э. И. О технологии и свойствах цементного бетона с низким водосодержанием / Э. И. Батыновский, В. В. Бабицкий, А. А. Дрозд // IV Люблинская проблемная конференция. – Люблин: Люблинская политехника, 1989. – С. 229–234.

160. Ахвердов, И. Н. Высокоплотный бетон из сухих смесей/ И. Н. Ахвердов [и др.] // Военно-строительный бюллетень. – 1981. – № 1. – С. 21–23.

161. Бабицкий, В. В. Диффузионные характеристики особо плотного цементного камня / В. В. Бабицкий, А. А. Дрозд // Вестник Бе-

лорусского государственного университета транспорта. Наука и транспорт. – 2004. – №2. – С. 17–21.

162. Бабицкий, В. В. Количественная оценка двухфазной системы «цемент-воздух» / В. В. Бабицкий, А. А. Дрозд, Я. Н. Ковалев // Известия Белорусской инженерной академии. – 2003. – № 2 (16). – С. 51–55.

163. Бабицкий, В. В. Прочностные характеристики особо плотного цементного камня / В. В. Бабицкий, А. А. Дрозд, Я. Н. Ковалев // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – № 1 (17). – С. 4–8.

164. Батяновский, Э. И. Цементный бетон повышенной долговечности/ Э. И. Батяновский [и др.] // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: Материалы международного семинара / Брестский политех. институт. – Брест, 1997. – С. 5–9.

165. Особо плотный бетон сухого формирования с повышенными эксплуатационными характеристиками: Обзорная информация / Э. И. Батяновский [и др.]; под ред. Э. И. Батяновского. – Минск: БелНИИНТИ, 1990. – 52 с.

166. Алексеев, С. Н. Коррозионная стойкость и защитные свойства бетона сухого формирования/ С. Н. Алексеев [и др.] // Бетон и железобетон. – 1987. – № 1. – С. 43–45.

167. Бабицкий, В. В. Коррозионностойкие особо плотные бетоны / В. В. Бабицкий // Вестник Белорусского государственного университета транспорта. Наука и транспорт. – 2004. – № 1. – С. 18–21.

168. Ратинов, В. Б. Добавки в бетон / В. Б. Ратинов, Т. И. Розенберг. – М.: Стройиздат, 1973. – 208 с.

169. Стрижевский, И. В. Коррозия и защита арматуры железобетонных трубопроводов / И. В. Стрижевский, Б. Л. Рейзин, Э. И. Иоффе. – М.: Стройиздат, 1972. – 97 с.

170. Алексеев, С. Н. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев [и др.]. – М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.

171. Васильев, А. И. Прогноз коррозии арматуры железобетонных конструкций автодорожных мостов в условиях хлоридной агрессии и карбонизации / А. И. Васильев, А. М. Подвальный // Бетон и железобетон. – 2002. – № 6. – С. 27–32.

172. Рухадзе, М. А. Совместное влияние тепловлажностной обработки и химических добавок на коррозионную стойкость арматуры и долговечность железобетона: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.23.05 / М.А. Рухадзе; Харьк. автомоб.-дор. ин-т им. комсомола Украины. – Харьков, 1989. – 22 с.

173. Алексеев, С. Н. Ингибиторы коррозии стали в железобетонных конструкциях / С. Н. Алексеев, [и др.]. – М.: Стройиздат, 1985. – 272 с.

174. Кашурников, Н. М. Повышение способности бетона защищать арматуру железобетонных конструкций с помощью добавок-ингибиторов: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.23.05 / Н. М. Кашурников; Всесоюз. заоч. инж.-строит. ин-т. – М., 1978. – 23 с.

175. Мишутин, Н. В. Судостроительные бетоны повышенной прочности и долговечности: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.23.05 / Н. В. Мишутин; Одес. инж.-строит. ин-т. – Одесса, 1993. – 15 с.

176. Грушко, И. М. Обеспечение сохранности арматуры в бетоне на морской воде / И. М. Грушко, Э. В. Дегтярева, В. В. Масов // Бетон и железобетон. – 1989. – № 6. – С. 36–38.

177. Яковлева, Л. А. Замедление коррозии арматуры железобетонных конструкций ингибиторами на основе фосфатов: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.23.05 / НИИ бетона и железобетона. – М., 1984. – 22 с.

178. Островский, А. Б. Исследование влияния ингибиторов на коррозию стальной арматуры в трещинах бетона: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.23.05 / А. Б. Островский; Моск. автомоб. дор. ин-т. – М., 1974. – 28 с.

179. Беженар, В. П. Повышение стойкости железобетонных конструкций предприятий калийных удобрений / В. П. Беженар, С. Н. Алексеев // Бетон и железобетон. – 1983. – № 2. – С. 23–25.

180. Алимов, Ш. С. Диффузионная проницаемость бетонов по отношению к растворам хлористых солей / Ш. С. Алимов, Е. Г. Савич // Защита металлических и железобетонных строительных конструкций от коррозии: тезисы докладов VII Всесоюзной научно-технической конференции. – М., 1983. Ч.-II: Коррозия и первичная защита бетона. – С. 3–4.

181. Розенталь, Н. К. Бетоны с повышенными защитными свойствами для железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в хлоридных средах / Н. К. Розенталь // Защита металлических и же-

лезобетонных строительных конструкций от коррозии: тезисы докладов VII Всесоюзной научно-технической конференции. – М.; 1983. Ч.-III: Коррозия и защита стальной арматуры и закладных деталей железобетонных конструкций. – С. 13–14.

182. Розенфельд, И. Л. Ингибиторы коррозии / И. Л. Розенфельд. – М.: Химия. – 1977. – 350 с.

183. Бабицкий, В. В. Прогнозирование глубины карбонизации бетона // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров в Республике Беларусь: Материалы VI Международного научно-технического семинара / Под ред. Н. П. Блещика, А. А. Борисевича, Т. М. Пецольда. – Мн.: УП «Технопринт», 2000. – С. 3–6.

184. Бабицкий, В. В. Основы прогнозирования коррозии стальной арматуры железобетонных конструкций / В. В. Бабицкий // Вестник Полоцкого государственного университета. Прикладные науки. – 2004. – № 12. – С. 111–116.

185. Бабицкий, В. В. Прогнозирование коррозии стальной арматуры железобетонных конструкций / В. В. Бабицкий // Строительство и эксплуатация автомобильных дорог и мостов: Сб. научных трудов. Вып. 16 / Мн.: РУП «Бел-дорНИИ», 2004. – С. 163 – 167.

186. Бабицкий, В. В. Модель прогнозирования коррозионного состояния стальной арматуры железобетонных конструкций / В. В. Бабицкий // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура (Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: Материалы XI Международного научно-методического семинара). Часть 1. – 2004. – С. 207–211.

187. Бабицкий, В. В. Прогнозирование кинетики твердения бетона дорожных и мостовых конструкций / В. В. Бабицкий, Я. Н. Ковалев // Материалы, технологии, инструменты. – 2005. – № 1. – С. 80–84.

188. Бабицкий, В. В. Прогнозирование кинетики твердения бетона при термосном выдерживании конструкций/ В. В. Бабицкий // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2005. – № 4. – С. 66–67.

189. Восстановление эксплуатационной пригодности сгустителя № 20 2 РУ: проектная документация шифр х/д 1608-2002 ПО «Беларускалий». – Минск: БНТУ, 2002. – 18 л.

190. Разработка теории физико-химической коррозии бетона и строительных материалов, проблемы повышения долговечности конструкций зданий и сооружений на предприятиях по производству минеральных удобрений: отчет о НИР (заключ.)/ БНТУ; рук. темы Н. Л. Полейко. – Минск, 2002. – 103 с. - № ГР 20001479.

191. Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкции: ГОСТ 28570-90 – Введ. 01.01.91. – Москва: Государственный комитет СССР по делам строительства, 1990. – 13 с.

192. Ковшар, С. Н. Комплексные добавки для бетонных смесей на основе пластификатора С-3/ Н. Л. Полейко, С. Н. Ковшар [и др.]// Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: материалы XIV Международного научно-практического семинара; Минск 22–23 июня 2006г./ БНТУ; редкол.: Т.М. Пецольд [и др.] – Минск, 2006. – Т. 1. – С. 121–125.

193. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний: ГОСТ 8269.0-97. – Введ. 01.01.99. – Минск: Министерство архитектуры и строительства РБ, 1997. – 60 с.

194. Ковшар, С. Н. Оценка и прогнозирование морозостойкости и солестойкости тяжелого бетона с учетом конструктивных и деструктивных факторов: дис. ...канд. техн. наук: 05.23.05 / С. Н.Ковшар. – Минск, 2010. – 217 с.

195. Ковшар, С. Н. К возможности оценки морозостойкости бетона по его солестойкости/С. Н. Ковшар, В. В. Бабицкий [и др.]// Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: материалы XVII Международного научно-практического семинара; Гродно, 22–23 июня 2010 г./ ГрГУ; редкол.: Т. М. Пецольд [и др.] – Гродно, 2010. – С. 319–322.

196. 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; Минск, 2010 г. – Т. 2. – С. 225.

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

198. Гольшани, М. Прогнозирование глубины карбонизации бетона железобетонных мостовых конструкций/ М. Гольшани, В. В. Бабицкий [и др.] // Строительная наука и техника – 2011. – № 3 (36). – с. 13–16.

199. Гольшани, М. Влияние структурных особенностей бетона на глубину его карбонизации/ М. Гольшани, В. В. Бабицкий [и др.] // Строительная наука и техника – 2011. – № 4 (37). – с. 14–16.

200. Ковшар, С. Н. Метод прогнозирования коррозионного состояния стальной арматуры/ С. Н.Ковшар, М. Гольшани, В. В. Бабицкий //Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F – Строительство. Прикладные науки. – 2016. – № 8. – с. 33–37.

201. Гольшани, М. Структура бетона с добавками ингибиторов коррозии стали и его защитные свойства по отношению к стальной арматуре: дис. ...канд. техн. наук: 05.23.05 /М. Гольшани – Минск, 2012. – 97 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Методы прогнозирования морозостойкости и коррозионной стойкости бетона при циклических воздействиях внешней среды	5
1.1. Методы оценки и прогнозирования морозостойкости бетона	5
1.2. Методы оценки и прогнозирования коррозионной стойкости бетона при воздействии растворов солей	25
2. Влияние циклических воздействий на кинетику изменения структурно-механических характеристик цементного камня	35
2.1. Материалы, образцы и методика проведения исследований	35
2.2. Влияние вида вяжущего, водоцементного отношения и условий твердения на структурно-механические характеристики цементного камня	46
2.3. Влияние замораживания и оттаивания на кинетику изменения структурно-механических характеристик цементного камня	52
2.4. Влияние циклического насыщения и высушивания на кинетику изменения структурно-механических характеристик цементного камня	61
3. Теоретические основы влияния степени гидратации и структурных характеристик на морозостойкость и коррозионную стойкость бетона	70
3.1. Общие положения	70
3.2. Теоретическое обоснование	71
3.3. Расчетная модель для оценки морозостойкости и коррозионной стойкости цементного камня	73
3.4. Расчетная модель для оценки морозостойкости конструкционного бетона	81
3.5. Расчетная модель для оценки коррозионной стойкости конструкционного бетона	97
4. Достоверность предлагаемых расчетных моделей в сравнении с существующими методами оценки и прогнозирования морозостойкости и коррозионной стойкости бетона	101
4.1. Методика и критерии оценки достоверности	101

4.2. Достоверность различных моделей для оценки и прогнозирования морозостойкости и коррозионной стойкости бетона	102
5. Практическое использование расчетной модели для оценки морозостойкости и коррозионной стойкости конструкционного бетона	111
5.1. Использование расчетной модели на стадии проектирования и изготовления конструкций	111
5.2. Методика проектирования состава тяжелого (конструкционного) бетона с учетом требований по морозостойкости	116
5.3. Пример проектирования состава конструкционного бетона с учетом требований по морозостойкости	120
6. Структурные особенности бетона и коррозионное состояние стальной арматуры	124
6.1. Депассивация стальной арматуры железобетонных конструкций	124
6.2. Коррозионная стойкость стальной арматуры при введении добавок, содержащих хлор-ионы	128
6.3. Связь структурных особенностей бетона с коррозионным состоянием стальной арматуры	148
6.4. Влияние ингибиторов коррозии стали на коррозионное состояние стальной арматуры	166
7. Использование расчетной модели для проектирования составов коррозионностойких бетонов	174
7.1. Апробация модели на объектах ПО «Беларускалий»	174
7.2. Ускоренный метод контроля морозостойкости конструкционного бетона	181
Библиографический список	188

Научное издание

КОВШАР Сергей Николаевич
ГОЛЬШАНИ Массуд
БАБИЦКИЙ Вячеслав Вацлавович

**ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОРОЗОСТОЙКОСТИ
И КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ
В БЕТОНЕ ПРИ ДЕЙСТВИИ АГРЕССИВНЫХ СРЕД**

В авторской редакции

Подписано в печать 29.10.2021. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 12,21. Уч.-изд. л. 9,55. Тираж 100. Заказ 592.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.