

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ  
«ПРИДНЕПРОВСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ  
СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ»

На правах рукописи

ТЫТЮК АНДРЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

УДК 691.3:551.5

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОНА ЗАЩИТНОГО СЛОЯ В  
УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

05.23.05 – строительные материалы и изделия

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
Савицкий Николай Васильевич  
доктор технических наук, профессор

Днепропетровск – 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ.....	6
1	ДОЛГОВЕЧНОСТЬ БЕТОНА ЗАЩИТНОГО СЛОЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ.....	11
1.1	Основные принципы проектирования первичной защиты бетона защитного слоя железобетонных конструкций в условиях агрессивных воздействий .....	11
1.2	Оценка агрессивности атмосферных климатических воздействий.....	16
1.3	Методы прогнозирования кинетики нейтрализации бетона защитного слоя с учетом морозостойкости.....	23
1.4	Проблемы обеспечения морозостойкости бетонов	33
	Выводы по разделу 1 .....	45
2	РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОНА ЗАЩИТНОГО СЛОЯ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ.....	47
2.1	Оценка параметров атмосферных климатических воздействий (на примере г. Днепропетровска).....	47
2.2	Эффективный коэффициент диффузии кислых газов и реакционная емкость бетона.....	51
2.3	Метод расчета и оценка долговечности бетона защитного слоя железобетонных конструкций с учетом температуры и влажности.....	61

	Выводы по разделу 2.....	73
3	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ БЕТОНА ЗАЩИТНОГО СЛОЯ.....	75
3.1.	Результаты лабораторных испытаний бетона различного возраста.....	75
3.1.1	Характеристики бетона .....	75
3.1.2	Определение водонепроницаемости контрольных образцов....	75
3.1.3	Определение прочности бетона на сжатие.....	80
3.1.4	Определение глубины карбонизации бетона.....	87
3.2	Экспериментальное определение глубины и расчет времени карбонизации бетона.....	90
3.3	Экспериментальные исследования кинетики нейтрализации бетона защитного слоя в натуральных условиях атмосферных климатических воздействий г. Днепропетровска.....	98
3.3.1	Общие сведения и характеристика обследуемых железобетонных конструкций.....	98
3.3.2	Определение прочности бетона железобетонных конструкций.	107
3.3.3	Определение водонепроницаемости железобетонных конструкций .....	113
3.3.4.	Определение глубины карбонизации бетона защитного слоя ..	115
3.3.5	Оценка и статистический анализ технического состояния обследуемых железобетонных конструкций.....	119
	Выводы по разделу 3.....	125
4	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОРОЗО- СТОЙКОСТИ БЕТОНОВ НА МЕСТНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ	

	МАТЕРИАЛАХ.....	127
4.1	Требования норм проектирования к морозостойкости бетона железобетонных конструкций.....	127
4.2	Исследование влияния вида и расхода цемента на прочность и морозостойкость бетонов.....	131
4.2.1	Расчет и подбор состава бетона.....	131
4.2.2.	Материалы и составы.....	133
4.2.3	Результаты испытаний на прочность и морозостойкость.....	134
4.3	Исследования влияния добавок на набор прочности бетона при отрицательных температурах и его морозостойкость.....	138
4.3.1	Цель и задачи экспериментальных исследований.....	138
4.3.2	Материалы для опытных образцов.....	139
4.3.3	Расчет составов бетонов с применением добавок.....	141
4.3.4	Результаты испытаний бетонов на прочность и морозостойкость.....	146
	Выводы по разделу 4.....	149
5	МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕРВИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ КАРБОНИЗАЦИИ И МОРОЗНОЙ ДЕСТРУКЦИИ БЕТОНА.....	151
5.1	Обеспечение долговечности бетона защитного слоя согласно требованиям норм проектирования при карбонизации и морозной деструкции.....	151
5.2	Метод расчета долговечности бетона защитного слоя при карбонизации и морозной деструкции.....	163
5.3	Прогнозирование долговечности бетона защитного слоя при карбонизации и морозной деструкции.....	169
	Выводы по разделу 5.....	171

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ .....	173
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	176
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Справки о внедрении. ....	193

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** С момента широкого использования железобетонных конструкций в промышленном и гражданском строительстве остается актуальной проблема обеспечения их долговечности в условиях воздействия агрессивных сред природного, антропогенного или смешанного происхождения.

По результатам многочисленных обследований железобетонных строительных конструкций, эксплуатируемых в условиях атмосферных воздействий установлено, что наиболее характерными дефектами поврежденных конструкций является разрушение бетона защитного слоя, коррозия арматуры.

Бетон защитного слоя железобетонных конструкций подвергается воздействию как агрессивной воздушной среды, вызывающей нейтрализацию бетона, так и попеременному замораживанию и оттаиванию. Зачастую для изготовления бетона конструкций используется мелкий заполнитель с низким модулем крупности, при котором затруднительно получить бетон требуемой морозостойкости без применения химических добавок.

Стандартизированные условия испытаний бетона на морозостойкость и коррозионную стойкость существенно отличаются от реальных эксплуатационных атмосферных климатических воздействий. Поэтому необходим метод прогнозирования долговечности бетона защитного слоя в условиях реальных атмосферных климатических воздействий для проектирования параметров первичной защиты. Результаты исследований направлены на повышение технико-экономической эффективности применения железобетонных конструкций в условиях воздействия агрессивной воздушной среды и отрицательных температур.

В связи с этим, исследования, направленные на обеспечение долговечности бетона на мелких песках защитного слоя железобетонных

конструкций в условиях атмосферных климатических воздействий, вызывающих нейтрализацию бетона и морозную деструкцию, являются актуальными.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.**

Научные исследования, изложенные в диссертации, выполнены в соответствии с научно-исследовательской тематикой кафедры железобетонных и каменных конструкций Государственного высшего учебного заведения “Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры” «Обоснование архитектурно-конструктивно-технологических систем для проектирования жилых зданий и социозэкокомплексов» (№ государственной регистрации 0111U010429, 2011-2015 гг., уровень участия диссертанта - исполнитель).

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является разработка научных положений обеспечения долговечности бетона защитного слоя железобетонных конструкций в условиях атмосферных климатических воздействий.

Сформулированная цель диссертационной работы обусловила необходимость решения следующих задач:

- выполнить анализ исследований, направленных на: а) оценку атмосферных климатических воздействий, вызывающих нейтрализацию бетона с учетом морозной деструкции; б) влияния параметров бетона на его долговечность при воздействии агрессивной воздушной среды и низких отрицательных температур; в) разработку методов прогнозирования долговечности бетона в условиях атмосферных климатических воздействий;
- разработать метод прогнозирования долговечности бетона защитного слоя в условиях атмосферных климатических воздействий;
- выполнить натурные исследования долговечности бетона защитного слоя в условиях атмосферных климатических воздействий;

- выполнить экспериментальные исследования влияния определяющих факторов на морозостойкость бетонов на мелких днепровских песках для обеспечения требуемой долговечности;

- разработать метод проектирования первичной защиты бетона защитного слоя железобетонных конструкций в условиях атмосферных климатических воздействий.

**Объект исследования:** бетон защитного слоя железобетонных конструкций в условиях атмосферных климатических воздействий.

**Предмет исследования:** закономерности процесса изменения характеристик бетона во времени при атмосферных климатических воздействиях.

**Методы исследования:** экспериментальные методы физико-химических и механических испытаний бетона по стандартным методикам; методы теории тепло – массопереноса и развития гетерогенных химических реакций при исследовании долговечности бетона, методы натурных исследований железобетонных конструкций.

**Научная новизна полученных результатов:**

- разработан метод определения кинетики нейтрализации бетона с учетом морозной деструкции (получил дальнейшее развитие);

- получены результаты натурных исследований долговечности бетона защитного слоя железобетонных конструкций в условиях атмосферных климатических воздействий (получены впервые);

- на основе экспериментальных исследований установлены закономерности морозостойкости бетонов на мелких днепровских песках в зависимости от определяющих факторов (получило дальнейшее развитие);

- предложен метод проектирования первичной защиты бетона защитного слоя железобетонных конструкций в условиях атмосферных климатических воздействий (получен впервые).

**Практическое значение полученных результатов.** На основании проведенных исследований разработана методика проектирования состава



бетона и параметров защитного слоя железобетонных конструкций для обеспечения долговечности на заданный срок службы.

Результаты исследований могут использоваться в проектных организациях, строительных лабораториях при проектировании и назначении параметров бетона защитного слоя железобетонных конструкций, работающих в условиях атмосферных климатических воздействий.

Результаты исследований использованы в учебном процессе при подготовке дипломных и магистерских работ.

**Личный вклад соискателя в научных трудах, опубликованных в соавторстве, состоит в:**

- разработке метода определения кинетики нейтрализации бетона с учетом морозной деструкции в условиях атмосферных климатических воздействий [125];

- проведении и обобщении результатов натурных исследований долговечности бетона защитного слоя железобетонных конструкций в условиях атмосферных климатических воздействий [120];

- проведении экспериментальных исследований и установлении закономерностей морозостойкости бетонов на мелких днепровских песках в зависимости от определяющих факторов [123, 124];

- разработке метода проектирования первичной защиты бетона защитного слоя железобетонных конструкций в условиях атмосферных климатических воздействий [121, 122, 132].

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты работы докладывались на Международных научно–практических конференциях «Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения» (г. Ялта, 2011 г., 2013 г.; пгт. Светлогорское, Кобыляцкий район, Полтавская обл., 2014 г.), на XXII польско-украинском научном семинаре «Теоретические основы строительства» (г. Днепрпетровск, 2014 г.); научных семинарах

кафедры железобетонных и каменных конструкций ГВУЗ «ПГАСА» (2011-2015 гг.).

**Публикации.** Основные положения и выводы диссертации отражены в 7 статьях в научных специализированных изданиях Украины, из них 1 входит в наукометрическую базу данных РИНЦ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов, общих выводов, одного приложения, списка использованных источников. Общий объем диссертации – 195 страниц. Диссертация содержит 50 таблиц и 68 рисунков, 1 приложение на 3 страницах. Список использованных источников содержит 145 наименований.

## РАЗДЕЛ 1

### ДОЛГОВЕЧНОСТЬ БЕТОНА ЗАЩИТНОГО СЛОЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

#### **1.1 Основные принципы проектирования первичной защиты бетона защитного слоя железобетонных конструкций в условиях агрессивных воздействий**

В настоящее время и на ближайшую перспективу бетон и железобетон являются основными строительными материалами. Объемы и область их применения продолжают расширяться. Кроме обычных силовых воздействий (нагрузки) конструкции подвергаются всевозможным воздействиям среды в виде веществ (твердых, жидких, газообразных, плазмы), энергии (механической, тепловой, химической, ядерной, электромагнитной) или их комбинации. Согласно статистическим оценкам, от 15 до 75% конструкций зданий и сооружений различного назначения подвергаются воздействию агрессивных сред.

При определенных условиях в материалах конструкций под воздействием среды развивается процесс накопления повреждений. По разным экспертным оценкам, в год, от 5 до 10% таких строительных конструкций выходят из эксплуатации (рис. 1.1...1.3).

Неправильная оценка агрессивных факторов, несоответствие конструктивно-технологических параметров первичной защиты железобетонных конструкций условиям их работы, приводят, нередко, к повреждениям или полному отказу строительных элементов, а, следовательно, к увеличению расходов на ремонт и восстановление конструкций. В то же время переоценка этих факторов ведет к излишним затратам материалов и средств на обеспечение их стойкости. Наиболее

эффективные решения возможно получить при количественном учете вышеперечисленных факторов.



а)



б)

Рис. 1.1. Разрушение бетона защитного слоя с оголением и коррозией арматуры: а) колонны на Никопольском заводе ферросплавов; б) стойки токодержателей на Ривненской АЭС.



а)



б)

Рис. 1.2. Разрушение бетона защитного слоя с оголением и коррозией арматуры: а) опоры под кабельные короба на Ривненской АЭС; б) пролетного строения автодорожного моста.



Рис. 1.3. Разрушение бетона защитного слоя с оголением и коррозией арматуры: а) козырька над входом жилого дома; б) балконной плиты.

Изучению долговечности на железобетона в условиях воздействия агрессивных сред посвящены работы многих известных отечественных и зарубежных учёных: С.Н. Алексеева [4...6], В.И. Бабушкина [9], В.Г. Батракова [13], З.Я. Блихарского, В.М. Бондаренко [25], А. И. Васильева [30, 31], В.А. Вознесенского, Е.А. Гузеева [36...40], Б.В. Гусева [41], Ф.М. Дворкина Л.И. [43], Дворкина А.Л., Ф. М. Иванова [51, 62], В.М. Москвина [70, 80], А.Ф. Полака [89...94], А.Н. Плугина, А.А. Плугина, Н.К. Розенталя [75], Н.В. Савицкого [32, 47, 78, 79, 97, 98, 102, 103], В. Ю. Сеткова [105], А.С. Файвусовича, В.Л. Чернявского [52, 127, 128], а также J. M. Baker [134], J. P. Broomfield [135], M. El-Reedy [137], M. Hamada, K. Kishitany, Sl. Modry, T. Nishi, J. Ryou [136], P. Schiessel, H.G. Smolzyk, H.I. Wiering, в.т.ч. в работах [12, 33, 29, 46, 63, 71, 73, 76, 113, 142]. Повышением ресурса работы железобетонных конструкций занимались Е.В. Клименко, В.С. Дорофеев [65...67]. Исследованием диффузионной проницаемости различной структуры занималась И. Г. Сергеева [104].

Согласно действующих норм [55] и [57] для обеспечения нормативной долговечности железобетона ( $T=50$  лет) при неблагоприятных температурно-влажностных условиях эксплуатации с нормальной или повышенной концентрацией  $CO_2$  или других агрессивных компонентов в воздушной среде

необходимо применять два способа защиты: первичную – за счет увеличения толщины и плотности защитного слоя бетона и вторичную – путем применения защитных покрытий I и II групп. Многочисленные исследования доказывают экономическую целесообразность применения, в первую очередь, первичной защиты для железобетона [2, 5, 11].

Оценить требуемые параметры первичной защиты (необходимую толщину и параметры бетона защитного слоя) для гарантированного обеспечения заданного нормативного срока службы конструкции можно лишь на основе расчетной модели. В действующем ДСТУ Б В 2.6-145:2010, а также в предыдущем СНиП 2.03.11-85 [56] и в других документах по защите железобетона такая формула отсутствует, как отсутствует и нормативный срок службы конструкций. В [57] приводится два параметра: нормативный срок службы конструкций (50 лет) и допускаемая глубина повреждения бетона в среде разной степени агрессивности. Однако зависимости для расчета глубины карбонизации бетона в этом нормативном документе также отсутствуют.

Положения ДСТУ Б В 2.6-145:2010 [55] носят рецептурный характер, в них не содержится количественных зависимостей для расчета кинетики коррозии бетона и арматуры. В [55] приводится классификация агрессивности сред по отношению к бетону и железобетону, оговариваются категории требований к трещиностойкости и предельно допустимой ширине раскрытия трещин, регламентируется класс арматурной стали, толщина защитного слоя арматуры, марка по водонепроницаемости бетона, химико-минералогический состав цемента в зависимости от степени агрессивного воздействия.

В действующем ДБН В.2.6-98-2009 Бетонные и железобетонные конструкции [14] и в предыдущем СНиП 2.03.01-84\* [15] расчет и проектирование конструкций ведется по критерию недопущения изменения прочностных и деформативных свойств бетона и арматуры в агрессивных

средах, т.е. без учета возможности развития процессов коррозии и накопления коррозионных повреждений в материалах конструкций.

Долговечность зданий и сооружений должна обеспечиваться путем выбора параметров первичной защиты в зависимости от условий эксплуатации.

В основу методики выбора параметров первичной защиты, в условиях воздействия агрессивных сред положены следующие предпосылки [103]:

1. Проектирование первичной защиты арматуры железобетонных конструкций выполняется с учетом кинетики развития коррозионных процессов в бетоне, коррозия арматуры не допускается.

2. Фактор времени вводится в расчет в явном виде: определяются конструктивно-технологические параметры конструкции, обеспечивающие заданный срок эксплуатации или межремонтный срок, или определяется долговечность элемента при заданных параметрах.

Следует выделять следующие требования по обеспечению безотказной работы арматуры [103]:

- исключение возможности образования трещин, ограничение ширины их раскрытия;

- назначение определенных технологических параметров бетона или величины защитного слоя для обеспечения пассивности арматуры в условиях агрессивной по отношению к бетону среды.

В концепции расчета железобетонных конструкций минимальные значения толщины защитного слоя установлены из предположения защитного действия на арматуру щелочной среды бетона на протяжении срока службы конструкции [5].

Защитный слой или технологические параметры бетона защитного слоя обеспечивают безотказную работу арматуры при условии [103]:

$$y(\tau) \leq a_p, \quad (1.1)$$

где  $y(\tau)$  - глубина нейтрализации бетона;

$a_p$  - величина защитного слоя бетона.

Условие (1.1) при регламентируемом сроке службы может быть выполнено:

- 1) при заданной толщине защитного слоя путем подбора состава бетона, определяющего кинетику нейтрализации
- 2) для заданного состава бетона за счет назначения величины защитного слоя;

Исходными параметрами при подборе состава бетона, как известно, является прочность бетона и подвижность бетонной смеси. Если прочность бетона конструкций задана в проекте, то она является нижним ограничением, которое необходимо учитывать при подборе состава бетона по критерию долговечности [80].

## **1.2 Оценка агрессивности атмосферных климатических воздействий**

Состав чистого сухого воздуха определяется следующим соотношением газов, % [24]: азот - 78,09; кислород - 20,95; аргон - 0,93; углекислый газ - 0,03; неон -  $1,82 \times 10^{-3}$ ; гелий -  $5,24 \times 10^{-4}$ ; криптон -  $1,14 \times 10^{-4}$ ; водород -  $3,00 \times 10^{-5}$ ; ксенон -  $8,70 \times 10^{-6}$ .

В связи с тем, что объемы промышленного производства удваиваются в среднем каждые 10 лет и, соответственно, растут объемы и масштабы загрязнения воздуха. В настоящее время во многих регионах мира загрязнение воздушного бассейна уже превысило допустимые нормы [81].

На территории Украины можно выделить три экологические зоны (Донецко-Приднепровскую, Южную и Юго-Западную), существенно отличающиеся по антропогенным нагрузкам на воздушный бассейн. Максимальное количество выбросов на единицу площади ( $\sim 35$  т/км<sup>2</sup> в год) характерно для Донецко-Приднепровской (в Донецкой области – 110 т/км<sup>2</sup> в год). Южная и Юго-Западная зоны – соответственно, 7,1 и 7,8 т/км<sup>2</sup> в год. Количество выбросов в атмосферу для Киева и Севастополя составляют, соответственно 139,9 и 11,3 т/км<sup>2</sup> в год.



К началу 21 века стационарными источниками и транспортными средствами Украины в атмосферу выбрасывалось около 6 млн.т вредных загрязняющих веществ, из которых около 75% (4,5 млн.т) попало в воздушный бассейн от стационарных источников загрязнения. Наибольшее влияние на атмосферный воздух в больших городах имели промышленность и коммунально-бытовое хозяйство (табл.1.1). В 17 городах страны выбросы вредных веществ увеличились.

Из общей массы выбросов в атмосферный воздух, составляют порядка 20 млн.т веществ в год, на долю предприятий энергетики Украины приходится до 53%. Усредненный химический состав следующий: сернистый ангидрид – 19% (30%), окись углерода – 42% (37%), окислы азота – 8% (10%), углеводородные соединения – 7% (8%), легкие органические соединения – 4% (4%), другие – 20% (11%). В скобках указан процентный состав выбросов только от стационарных источников.

Химические свойства наиболее распространенных газообразных загрязнителей атмосферного воздуха приведены в [114] (табл. 1.2).

Огромный вклад в загрязнение атмосферного воздуха вносит транспорт, в том числе и наземный, табл. 1.3 [81].

Днепропетровская область является одной из наиболее развитых, промышленных и густонаселенных областей в Украине. Большое количество стационарных предприятий и автотранспорта обуславливают большое количество выбросов вредных веществ в атмосферу. На данный момент Днепропетровская область по количеству выбросов вредных веществ в атмосферу занимает 3-е место после Донецкой и Запорожской областей [7].

Территория Днепропетровской области и города Днепропетровска перенасыщена техногенно опасными объектами. Масштабы загрязнения окружающей среды ряда районов области достигли критического уровня. Главными загрязнителями воздуха, как уже отмечалось, являются предприятия энергетики, металлургии и транспорта.

Таблица 1.1

**Выбросы вредных веществ в атмосферу от стационарных источников  
загрязнения по отраслям (тыс. т)**

	Количество выбросов от стационарных источников загрязнения	Выброшено вредных веществ в атмосферу		Количество уловленных и обезвреженных веществ	
		Всего	В том числе без очищения	Всего	В том числе утилизированных
Украина	19839,1	4533,2	3760,9	15306,0	3548,5
Электроэнергетика	10366,6	1385,33	872,0	8981,3	620,7
Угольная промышленность	1326,7	983,7	950,0	343,1	236,3
Металлургическая промышленность	5657,5	1400,7	1238,9	4256,7	1369,5
Химическая и нефтехимическая промышленность	554,3	123,2	103,1	431,2	226,2
Машиностроение	94,1	39,6	33,7	54,5	6,4
Нефтедобывающая, нефтеперерабатывающая и газовая промышленность	222,3	195,5	194,9	26,9	24,4
Жилищно-коммунальное хозяйство	80,3	57,1	51,0	23,2	9,2
Сельское хозяйство и продуктовая промышленность	306,4	131,0	125,3	175,4	135,8
Транспорт	81,1	45,6	43,2	35,5	20,6
Промышленность строительных материалов	910,0	66,0	49,0	844,0	803,2
Городская промышленность	2,6	2,1	1,9	0,5	0,2
Другие	237,2	103,4	97,9	133,7	95,6

Таблица 1.2

**Компоненты техногенных выбросов**

Отрасль, производство	Основные загрязнители выбросов
Энергетическая промышленность	SO <sub>2</sub> , NO, пыль, CO, углеводороды
Черная металлургия	SO <sub>2</sub> , NO, NH <sub>3</sub> , Cl, H <sub>2</sub> S
Химическая промышленность	CO, NH <sub>3</sub> , сероуглерод, соединения хлора и фтора.
Целлюлозно-бумажная.	SO <sub>2</sub> , Cl, сероуглерод.

Таблица 1.3

**Состав выхлопных газов**

Компоненты выхлопного газа	Содержание по объему, %		Примечание
	Двигатели		
	бензиновые	дизели	
Азот	74,0 - 77,0	76,0 - 78,0	нетоксичен
Кислород	0,3 - 8,0	2,0 - 18,0	нетоксичен
Пары воды	3,0 - 5,5	0,5 - 4,0	нетоксичны
Диоксид углерода	5,0 - 12,0	1,0 - 10,0	нетоксичен
Оксид углерода	0,1 - 10,0	0,01 - 5,0	токсичен
Углеводороды неканцерогенные	0,2 - 3,0	0,009 - 0,5	токсичны
Альдегиды	0 - 0,2	0,001 - 0,009	токсичны
Оксид серы	0 - 0,002	0 - 0,03	токсичен
Сажа, г/м <sup>3</sup>	0 - 0,04	0,01 - 1,1	токсична
Бензопирен, мг/м <sup>3</sup>	0,01 - 0,02	до 0,01	канцероген

Объем валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных и передвижных источников загрязнения составляет около 1 млн.т, что составляет 17% от общегосударственных [84]. Было обследовано 806 предприятий и организаций, которые осуществляли выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух области и имели 23

тыс. источников загрязнения. Количество выбросов загрязняющих веществ на душу населения области составляет 237 кг, в том числе: твердых веществ - 36,4 кг, сернистого ангидрида - 40,8 кг, оксидов азота - 15,7 кг, окиси углерода - 128,6 кг, углеводородов - 13,7 кг. Доля от суммарного количества выбросов вредных веществ в атмосферный воздух от предприятий металлургии составляет 54,0%, электроэнергетики - 18,8%, угольной отрасли - 4,9%, химической и нефтехимической промышленности - 0,4%, сельского хозяйства - 0,06%.

Данные о динамике выбросов в атмосферу по г. Днепропетровску приведены в таблице 1.4, а сведения об основных загрязнителях атмосферы в таблице 1.5. Согласно приведенным в таблице 1.5 данным на долю этих предприятий приходится почти 90% от общего объема выбросов [59, 84].

Результаты наблюдений Днепропетровского областного центра гидрометеорологии за уровнем загрязнения атмосферного воздуха показывают, что среднегодовые концентрации загрязнителей составляли в Днепропетровске, Кривом Роге, Днепродзержинске: пыли 1,3-2,0 ПДК; оксида азота 1,3-1,8 ПДК; формальдегида 2,0-5,7 ПДК; бенз(а)пирена 0,8-1,9 ПДК.

*Таблица 1.4*

**Динамика выбросов в атмосферу в том числе наиболее распространённые вещества (пыль, диоксид серы, диоксид азота, оксид углерода) по г. Днепропетровск, тыс. тонн**

Всего выбросов	Стационарные источники					Передвижные источники
	вместе	в т.ч.				
		пыль	Диоксид серы	Диоксид азота	Оксид углерода	
2003 год						
168,842	118,856	23,825	52,102	22,202	16,373	50,049

## Продолжение табл. 1.4

2007 год						
158,973	106,494	21,907	45,412	19,502	14,740	52,479
2010 год						
118,691	115,458	25,161	45,435	21,456	12,421	3,233
(+/-) 2010 р. до 2007 г.						
8,869	8,965	3,255	0,022	1,955	-2,32	0,096

Таблица 1.5

## Данные об основных загрязнителях атмосферного воздуха

## г.Днепропетровск

№ п/п	Предприятие загрязнитель	Всего выбросов	Твердых веществ	Газ и жидкость	Ангидрид серы	Окись углерода	Окись азота
1	Приднепровская ТЭС	83887,0	21368,0	62516,0	43616,0	4390,0	4512,0
2	ОАО „ДМЗ им. Петровського”	4962,8	1806,1	3156,7	148,4	2986,4	21,9
3	ООО „Днепрошина”	1766,1	82,2	1683,9	322,6	434,6	282,0
4	ОАО Нижнеднепровский трубопрокатный завод”	6380,0	818,9	5561,0	336,0	4026,0	1172,0
5	АП „Днепротяжмаш”	249,2	156,7	92,5	14,3	12,2	66,0
6	ООО „Днепрококс”	2228,9	99,7	2129,2	1619,2	70,1	63,3
7	ООО „Днепропетровский трубный завод”	185,1	28,3	156,8	0,43	67,7	64,2
8	ООО „Днепропетровский лакокрасочный завод”	182,1	13,1	169,0	-	-	11,9

Продолжение табл. 1.5

9	ООО „Днепропетровс кий завод прокатных валков”	130,9	25,9	105,0	9,8	86,2	9,0
10	ООО „Коминмет”	71,8	2,5	69,3	3,9	2,7	48,7

Территории Украины, несмотря на преобладающий умеренно-континентальный климат, свойственны довольно значительные отличия во влажности климата, температурном режиме, скорости ветра, количестве осадков др.

Согласно действующему в настоящее время ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Строительная климатология», Днепропетровская область относится ко 2-му климатическому району (рис. 1.4...1.5) [117].

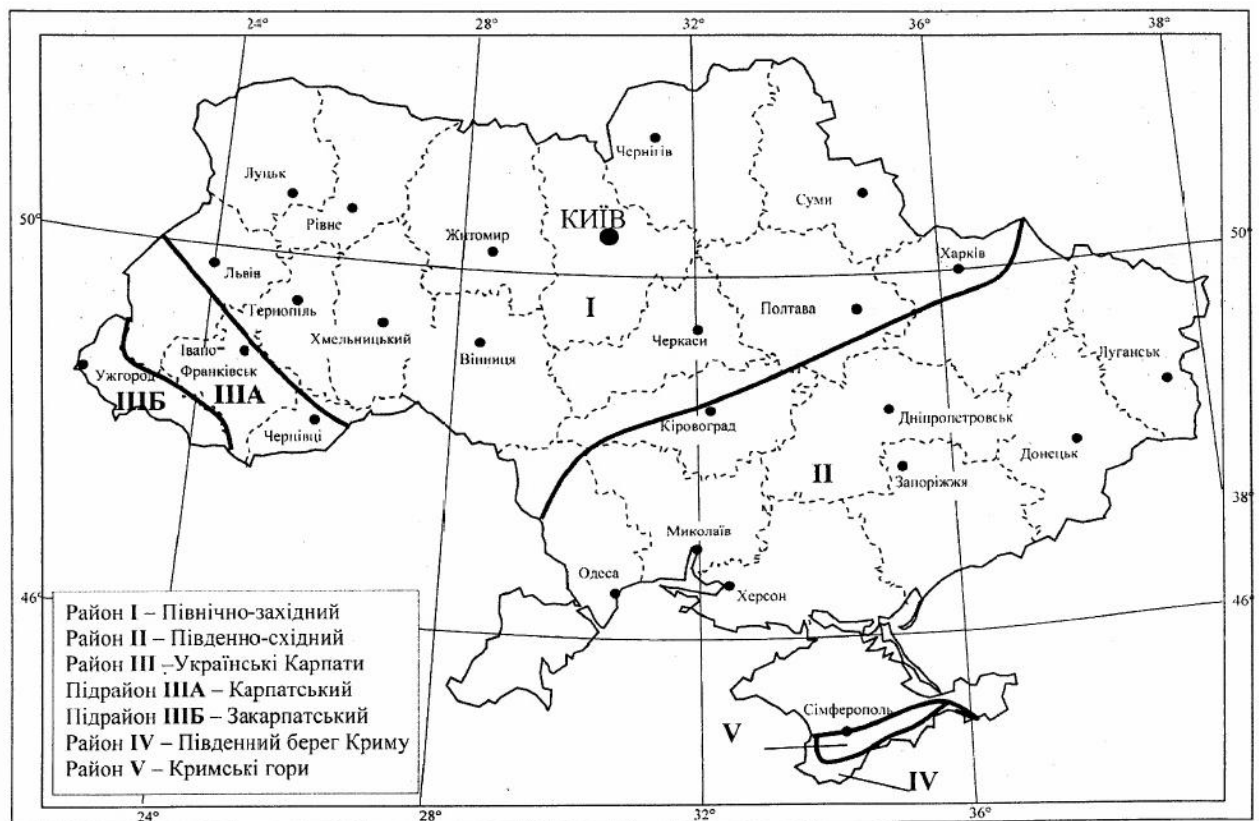


Рис. 1.4. Архитектурно-строительное районирование территории Украины.

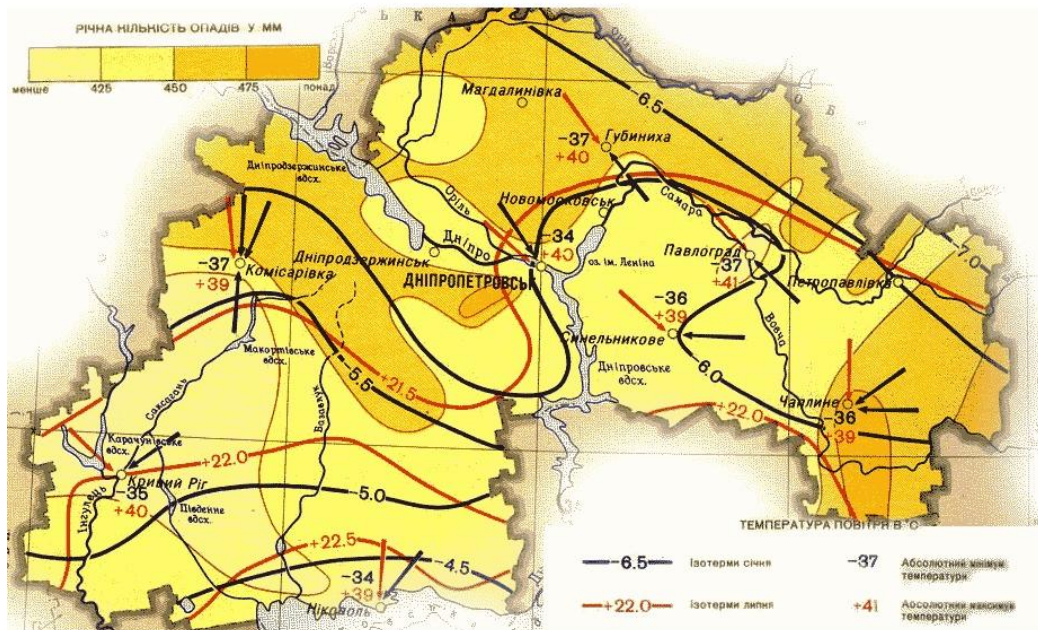


Рис. 1.5. Распределение температурных изотерм и показатель количества осадков по Днепропетровской области.

Днепропетровская область расположена в пределах Приднепровской низменности на севере и Приднепровской возвышенности на западе в бассейне среднего и нижнего течения Днепра.

Климат области умеренно континентальный, с мягкой малоснежной и с частыми оттепелями зимой (средняя температура января - 5 °С) и жарким, сухим с частыми ливнями и сильными южными ветрами летом (средняя температура июля +22 °С). Продолжительность периода с температурой выше +10 °С составляет 178 дней, а безморозного периода — 187-228 дней. Осадков, большая часть которых приходится на тёплый период, в год выпадает 400-490 мм.

### 1.3 Методы прогнозирования кинетики нейтрализации бетона защитного слоя с учетом морозостойкости

Детальному изучению особенностей процесса нейтрализации бетона в разных по составу газо-воздушных средах с учётом частичного заполнения пор и капилляров поровой влагой, посвящены работы С.Н. Алексева,

Ф.М. Иванова, В.И. Бабушкина, Н.К. Розенталя, В.В. Яковлева, З.Я. Блихарского, Л.А. Вандаловской, О.Ю. Чернякевича, П. Р. Schiessel, К. Maekawa, Т. Ishida. По данным этих исследователей скорость карбонизации бетона зависит от состава бетона (в особенности, от расхода и вида цемента), проницаемости бетона, технологии изготовления бетона (в том числе условий твердения), температурно-влажностных условий эксплуатации, концентрации агрессивных газов в воздушной среде, а также ряда других факторов.

Согласно представлениям [80] процесс карбонизации протекает в три этапа: сначала углекислый газ, имеющийся в воздухе в естественных условиях, диффундирует в поры бетона, где превращается частично в угольную кислоту. Последним шагом являются реакции угольной кислоты с щелочными компонентами цементного камня, растворенными в поровой воде. При реакциях карбонизации щелочные компоненты бетона превращаются в карбонаты, значение рН бетона понижается до 9 и менее, так что защитное действие щелочей бетона для стальной арматуры в карбонизированном бетоне прекращается рис. 1.6. [51].

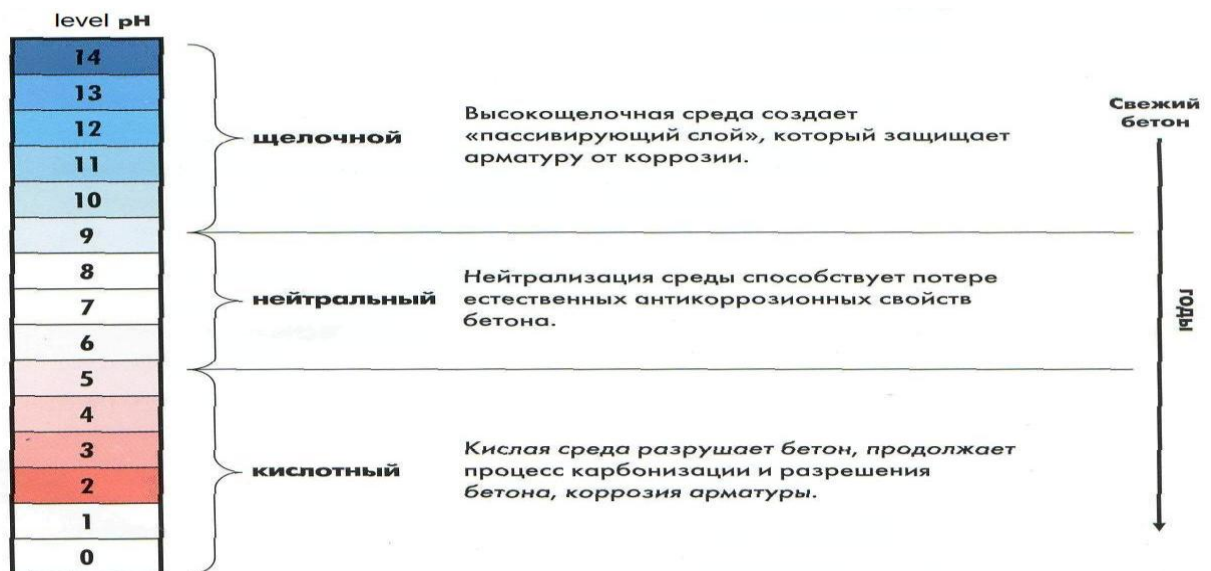


Рис 1.6. Изменение щелочности бетона при воздействии агрессивной газовой среды



Чтобы оценить, в какой момент времени фронт карбонизации достигнет арматуры, необходимо знать развитие глубины карбонизации бетона во времени. После того как гидроксид кальция, имеющийся во внешнем слое у поверхности бетона, карбонируется,  $\text{CO}_2$  диффундирует через уже карбонизированный слой. Движущей силой при этом является разность концентрации  $\text{CO}_2$  в наружном воздухе и у фронта карбонизации.

Поскольку диффузия  $\text{CO}_2$  в воздухе происходит примерно в 104 раз быстрее, чем в воде - влажность бетонных образцов имеет решающее значение для скорости карбонизации бетона [9].

Скорость коррозии стали, начавшейся после депассивации стальной поверхности, зависит в основном от условий среды (влажность, температура) и качества (плотности) бетона (рис. 1.7). При постоянно водонасыщенном и сухом состоянии строительных конструкций, вследствие отсутствия кислорода или отсутствия влаги, коррозия не наступает. При относительной влажности 80...95% и особенно при переменных влажностных условиях коррозия имеет наибольшую скорость.

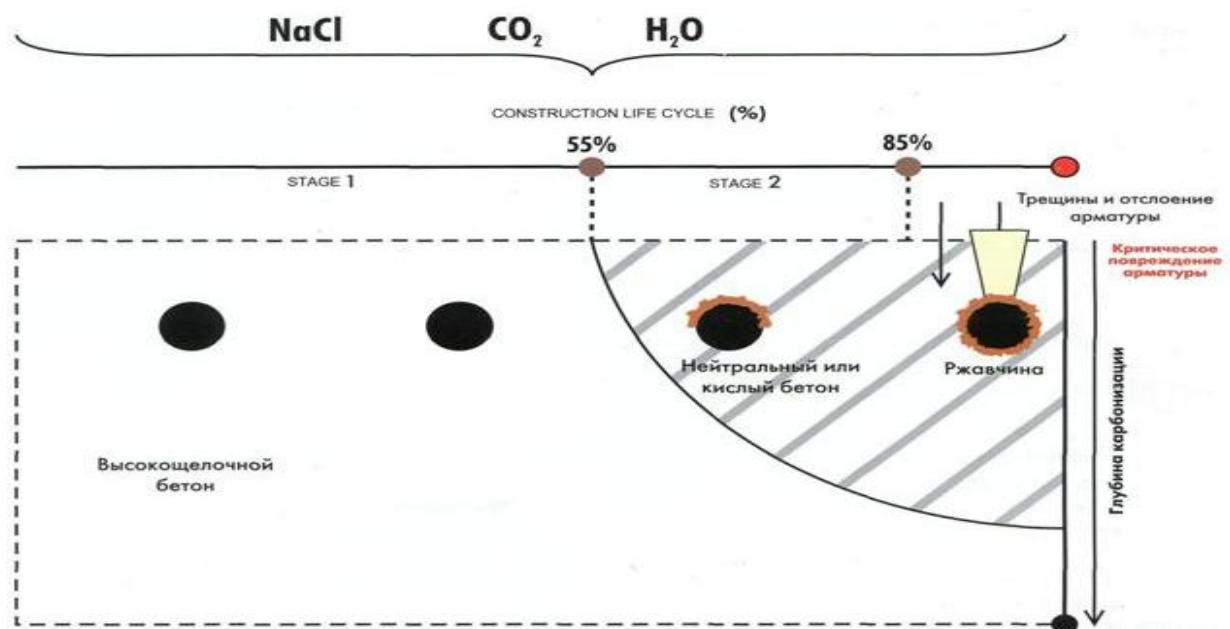


Рис 1.7. Постепенное разрушение арматуры под воздействием агрессивной среды

Скорость процесса карбонизации характеризуется агрессивностью газовой среды. Некоторые техногенные загрязнители, присутствующие в атмосферном воздухе, способны многократно ускорять данный процесс.

Это, в первую очередь относится к диоксиду серы, оксидам азота и гидрохлориду. Они способны образовывать с атмосферной влагой соответствующие кислоты, ускоряющие как химическую, так и электрохимическую коррозию стальных и других металлических конструкций и сооружений [103]. Аналогичным образом оксиды азота повышают коррозионную активность атмосферного воздуха, поскольку в сочетании с влагой дают азотную кислоту.

Для определения срока службы конструкций, выполненных из бетона или раствора на цементном вяжущем возможно использовать уравнение, описывающее кинетику нейтрализации бетона кислыми газами предложенным в 1955г А. Фика [51].

Методика расчета времени карбонизации бетона рассматривается в [103]. Расчетные формулы для определения сроков карбонизации бетона основаны на следующих допущениях:

- падение концентрации  $\text{CO}_2$  в порах бетона принимается линейным;
- у поверхности бетона концентрация  $\text{CO}_2$  соответствует концентрации его в окружающем воздухе, а в зоне химической реакции равна нулю;
- градиент концентрации  $\text{CO}_2$  для небольших отрезков времени является постоянной величиной.

Сделанные допущения позволяют использовать для расчетов уравнение первого закона А. Фика.

$$d_m = \frac{DA(C_o - C)}{x} dt, \quad (1.2)$$

где:  $d_m$  – количество углекислого газа, диффундировавшего через поверхность образца за время  $dt$ ;

$D$  – эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в карбонизированном бетоне;

$A$  – площадь поверхности бетона, через которую диффундирует углекислый газ;

$C_0, C$  – концентрация углекислого газа соответственно у поверхности бетона и в зоне поглощения;

$X$  - толщина карбонизированного слоя бетона.

За бесконечно малый промежуток времени  $d_t$  элементарное количество углекислого газа, поглощенного бетоном (раствором):

$$dm = m_0 \cdot A dx, \quad (1.3)$$

где  $dm$  – количество углекислого газа, поглощенного единицей объема бетона, или объемная концентрация связанного  $CO_2$ . Объединяя (1.2) и (1.3), получаем:

$$m_0 A dx = \frac{DA(C_0 - C)}{x} dt. \quad (1.4)$$

После разделения переменных и интегрирования уравнения (1.4) находим:

$$\frac{x^2}{2} = \frac{D(C_0 - C)}{m_0} t, \quad (1.5)$$

При  $C = 0$  получаем зависимость для определения глубины карбонизации бетона:

$$X = \sqrt{\frac{2DC_0 t}{m_0}}. \quad (1.6)$$

где:  $t$  - возраст образца (конструкции).

Величину  $m_0$  называют реакционной емкостью (способностью) бетона:

$$m_0 = V_{CO_2} / V_{CC}, \quad (1.7)$$

где  $V_{CO_2}$  – объем газообразной углекислоты при нормальных температуре и давлении, поглощенной единицей объема карбонизированного бетона  $V_{CC}$ .

$$m_0 = f p C_{em} V / M_{CaO} \quad (1.8)$$

где:  $f$  - степень нейтрализации бетона, равная отношению количества основных оксидов, прореагировавших с газом, к общему их количеству в цементе;

$p$  - содержание основных оксидов в цементе в пересчете на  $CaO$  в относительных величинах по массе;

$C_{em}$  - расход цемента;

$V$  - объем 1 г газа:

$$V = V_m / M_g \quad (1.9)$$

где  $V$  - объем 1 моля газа;

$M_g$  - молекулярная масса газа;

$M_{CaO}$  - молекулярная масса  $CaO$ .

Для определения реакционной способности бетона  $m_0$  вычислим объем 1 г  $CO_2$ . Из соотношения объема 1 моль углекислого газа ( $22,4 \text{ дм}^3/\text{моль}$ ) и его массы – 44 моль ( $12 + 16 \cdot 2$ ) находим объем 1 г  $CO_2$ :  $22,4 / 44 = 0,51 \text{ дм}^3$ .

При карбонизации бетона единицей его объема поглощается  $k$  объемов  $CO_2$ .

$$m_0 = C_{em} k \cdot 0,51, \quad (1.10)$$

где:  $C_{em}$  – расход цемента,  $\text{кг}/\text{м}^3$  или  $\text{г}/\text{дм}^3$  бетона;

$k$  – массовая доля связанной  $\text{CO}_2$  в цементе.

При известном содержании основных оксидов в цементе в пересчете на  $\text{CaO}$  в относительных величинах по массе (по данным химического анализа цемента) –  $p$  и степени нейтрализации бетона  $f$ , равной отношению количества основных оксидов, прореагировавших с газом, к общему их количеству в цементе, с учетом эквивалентного отношения  $\text{CO}_2/\text{CaO} = 44/56$ , выражение (1.8) запишется в виде ( $k = fp\text{CO}_2/\text{CaO}$ ):

$$m_0 = fp \text{ Cem} \cdot 0,51(44/56) = 0,4 \cdot fp \text{ Cem} \quad (1.11)$$

Для приближенных расчетов величины  $p$  и  $f$  можно принять равными 0,6 каждая. Тогда реакционная емкость бетона оказывается пропорциональной лишь расходу цемента в бетоне:

$$m_0 = 0,4 \cdot 0,6 \cdot 0,6 \text{ Cem} = 0,144 \text{ Cem} \quad (1.12)$$

Исследователи Т. Isida и К. Маекава приводят экспериментальные данные по глубине нейтрализации бетона с различным водоцементным отношением при высокой (10%-ной) концентрации углекислого газа, из которых следует, что значение  $n$  в выражении (1.6) изменяется в пределах  $n=1,94\dots 2,65$ . В целом анализ этих немногочисленных экспериментальных данных показал, что возможные значения показателя степени  $n$  в выражении (1.6) могут изменяться от 1,48 до 3,05 [8]. Аналогичный вывод следует также из работ проф. Ш.М. Рахимбаева и Н.М. Авершиной (1995г.) [1] – рис. 1.8.

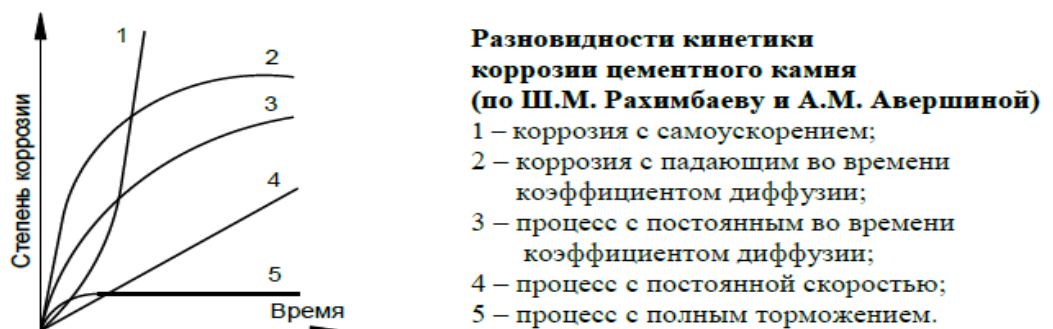


Рис.1.8. Разновидности кинетики коррозии.

Другой характеристикой, определяющей карбонизацию бетона и его проницаемость, является эффективный коэффициент диффузии. Его значение зависит от структуры бетона - размера и количества пор, их формы и извилистости. Эти параметры определяются видом цемента, водоцементным отношением, составом бетона и другими технологическими факторами.

Существенно влияют на коэффициент диффузии температура и влажность среды [103]. При отсутствии влаги в порах бетона проницаемость его максимальная, но при этом практически не происходит взаимодействие  $\text{CO}_2$  и  $\text{CaO}$  цементного камня. При полном водонасыщении практически прекращается доступ  $\text{CO}_2$  в бетон. Поэтому наибольшая скорость карбонизации наблюдается при влажности окружающего воздуха  $\varphi = 50...75\%$ .

В [5] приведены эмпирические зависимости для вычисления коэффициента диффузии углекислого газа в зависимости от водоцементного отношения и относительной влажности,  $\text{см}^2/\text{с}$ :

$$\text{при } \varphi = 60\% \quad D_o = 10^{-4} \cdot 10^{(\text{WC} - 0.4) / 0.27}; \quad (1.13)$$

$$\text{при } \varphi = 90\% \quad D_o = 10^{-4} \cdot 10^{(\text{WC} - 0.7) / 0.2}; \quad (1.14)$$

$$\text{при } \varphi < 50\% \quad D_o = 10^{-4} \cdot 10^{(\text{WC} - 0.61) / 0.25}. \quad (1.15)$$

Влияние температуры возможно учесть коэффициентом  $\xi_T$  [114]:

$$D = D_o \cdot \xi_T; \quad (1.16)$$

$$\xi_T = \left( \frac{273 + t}{273} \right)^{1.75}; \quad (1.17)$$

где  $D_o$  - коэффициент диффузии газа в бетоне при  $t = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;

$\text{WC}$  - водоцементное отношение;

$t$  - температура окружающей среды,  $\text{C}$ .

При отрицательной температуре практически прекращается взаимодействие  $\text{CO}_2$  с жидкостью в порах бетона. Это связано с тем, что мельчайшие поры, где сохраняется незамерзшая капиллярная влага, недоступны для диффузии  $\text{CO}_2$  газовой среде, а известь из раствора переходит в кристаллогидрат уже при  $-0.15^{\circ}\text{C}$ . Поэтому во всех расчетах карбонизации бетона в естественных климатических условиях необходимо из общего срока службы вычитать продолжительность воздействия отрицательной температуры.

На величину эффективного коэффициента диффузии сернистого ангидрида в бетоне оказывает влияние и концентрация этого газа [94]. Сернистый ангидрид относится к группе газов, которые при взаимодействии с цементным камнем образуют слаборастворимые кальциевые соли, присоединяющие значительное количество воды при кристаллизации, что приводит к большому увеличению объема продуктов коррозии. Диффузионная проницаемость бетона уменьшается вследствие уплотнения бетона продуктами коррозии. Чем выше концентрация агрессивного газа, прореагировавшего с цементным камнем, тем больший нейтрализованный слой препятствует проникновению этого газа во внутренние слои бетона. Эффективный коэффициент диффузии при этом уменьшается, а процесс нейтрализации замедляется.

В работе [94] приводятся данные обследований производственных зданий Норильского горно-металлургического комбината, воздушная среда которых содержит сернистый ангидрид. С целью установления долговечности конструкций обследовались балки и плиты железобетонных конструкций зданий и сооружений обогатительной и агломерационной фабрик, медного, никелевого и металлургического заводов со сроком эксплуатации  $\tau$  от 5 до 40 лет. Установлены эмпирические зависимости глубины нейтрализации бетона  $Y_{\text{SO}_2}$  от времени воздействия газа  $\tau$ , его концентрации  $C_m$  в пределах 0.5 – 500 мг/м и относительной влажности воздуха  $W_{\%}$  при  $t = 5 - 40^{\circ}\text{C}$ .

$$Y_{SO_2} = 120 e^{-\beta\tau} \quad (1.18)$$

где:  $\beta = 68 - 0.45W_{\%} - 4.85 \cdot \ln C_m$  (1.18)

Имеющиеся экспериментальные данные и данные натуральных обследований свидетельствуют о достаточно точном совпадении расчета по формуле (1.6) с натурными данными и данными экспериментов. Следовательно, уравнение (1.6) может быть принято в качестве основы для расчета кинетики нейтрализации бетона защитного слоя.

В реальных условиях эксплуатации бетон защитного слоя подвергается попеременному замораживанию и оттаиванию. В [30] А.И. Васильев, А.С. Бейвель, А.М. Подвальный указывают, что физические последствия такого воздействия заключаются в постепенном, по мере увеличения циклов замораживания и оттаивания, насыщении структуры материала микротрещинами, которые приводят к прогрессирующему снижению прочности и модуля упругости, увеличению необратимых деформаций расширения бетона. Такое изменение структуры материала неизбежно приводит к увеличению его проницаемости.

Исходя из этого, авторами статьи было предложено ввести в выражение (1.6) коэффициент пропорциональности А. Так как, циклическое замораживание, разуплотняя бетон, вызывает обратный эффект, то поскольку структура бетона при этом меняется, коэффициент пропорциональности в формуле оказывается переменной величиной и, таким образом, выражение (1.6) может быть представлена в виде:

$$X = A * \sqrt[2]{\frac{D_1 C \tau}{m_0}} \quad (1.19)$$

где:  $A=f(\text{Цк})$ - коэффициент пропорциональности (коэффициент учитывающий влияние количества циклов попеременного замораживания и оттаивания на проницаемость бетона).



В [30] приводится определение функции  $A=f(\text{Цк})$  на основе модельного представления о морозном воздействии на бетон. Было принято, что элементарной ячейкой, из пространственного, трехмерного повторения которой складывается структура затвердевшего бетона, является структурный элемент, состоящий из шарового ядра — заполнителя (песка или щебня) и сферической оболочки— слоя вяжущего (цементно-песчаного раствора или цементного камня). В каждом цикле замораживания — оттаивания происходит разрушение некоторого числа таких элементов, в оболочке которых образуется трещина. Относительную долю таких разрушившихся в цикле элементов можно считать величиной постоянной и пропорциональной относительной доле потери прочности бетона в одном цикле воздействия.

Таким образом для функции  $A=f(\text{Цк})$  было получено значение:

$$A = \frac{1}{(1-P)^{\text{Цк}}} \quad (1.20)$$

где:  $P$  –вероятность разрушения бетона в цикле замораживания и оттаивания;

$\text{Цк}$  - количество циклов попеременного замораживания и оттаивания.

#### **1.4 Проблемы обеспечения морозостойкости бетонов**

Под морозостойкостью бетона понимают его способность в насыщенном водой состоянии выдерживать многократное попеременное замораживание и оттаивание. При замерзании вода в порах превращается в лед и увеличивается в объеме более чем на 9%. Расширению воды препятствует твердый скелет бетона, в котором возникают растягивающие напряжения. Повторяемость замерзания и оттаивания приводит к постепенному разупрочнению структуры бетона и к его разрушению.

Влияние отрицательных температур на долговечность бетонных и железобетонных конструкций было изучено в работах С.Н. Алексева,

С.В. Александровского, В.Г. Батракова, О.Е. Власова, Е.А. Гузеева, Г.Е. Горчакова, Ф.М. Иванова [61], В.М. Москвина [116], С.А. Миронова, А.М. Подвального [87, 88], С.В. Шестоперова, М.И. Субботкина, В.О. Алмазова, В.В. Кажарского, М.М. Капкина, В.М. Мазура, Н.А. Сторожука, С.А. Щербака, С.Н. Леоновича, а также M. L. Gambir [138], J. C. McCormac [139], F. S. Merrit [140], M. J. Setzer [143].

В настоящее время не существует единого мнения о том, каким образом передаются напряжения на элементы структуры бетона. Согласно одним представлениям, происходит непосредственное воздействие кристаллизующегося льда на стенки пор и возникновение в них напряжений, способных вызвать разрушение бетона в наиболее его слабых местах. Внутренние растягивающие напряжения в бетоне могут возникнуть вследствие различия коэффициентов линейного расширения льда и скелета матрицы.

Согласно другим воззрениям [35] главной причиной разрушения бетона при замораживании является гидростатическое давление, возникающее во влажном материале под влиянием замерзающей воды.

Несмотря на различные представления о механизме морозного разрушения, можно констатировать, что главным фактором, определяющим морозостойкость бетона, является структура его порового пространства, от которой зависит степень насыщения материала водой и кинетика образования льда в его порах [129].

Баженов Ю.М. считает, что морозостойкость зависит от объема макропор в бетоне и от их строения, а микропоры не оказывают заметного влияния на морозостойкость бетона, так как в микропорах размером 10-5 см содержащаяся связанная вода переходит в лед при очень низких температурах (до  $-70^{\circ}\text{C}$ ) [10, 11].

Большое влияние на морозостойкость бетонов оказывает вид и активность цемента. Изучая морозостойкость бетонов на шлакопортландцементе, С.В. Шестоперов [130], Ф.М. Иванов [60] ,

М.И. Субботкин [119] и др. пришли к выводу, что эти бетоны обладают меньшей морозостойкостью, чем бетоны на портландцементях, но более высокой, чем бетоны на пуццолановых портландцементях.

С.В. Шестоперов [130] считает, что морозостойкость бетона в значительной степени зависит от минералогического состава цемента. В частности он считает, что для бетонов высокой морозостойкости следует применять алитовые цементы, с содержанием  $C_3S$  свыше 55% и низкоалюминатные с содержанием  $Al_2O_3$  от 4 до 6%.

Обширные результаты по изучению свойств цемента на морозостойкость бетонов представлены Добшиц Л.М. и Соломатовым В.И. в [50]. Основные выводы на основании полученных результатов заключаются в том, что для приготовления высокоморозостойких бетонов необходимо применять низко- и среднеалюминатные цементы ( $C_3A$  до 7%), портландцементы, имеющие тонкость помола в пределах 2500...4000  $см_2/г$  при их расходе 250...400  $кг/м^3$ . Хотя В.П. Сизов в [107, 108] отмечает ошибочность вывода предыдущих авторов о том, что оптимальным для получения наибольшей морозостойкости является расход цемента 250  $кг/м^3$ . По его мнению необходимо было при анализе результатов учитывать такой фактор как пластичность и жесткость бетонных смесей.

На морозостойкость бетонов существенное влияние оказывает вид и качество заполнителей. Ю.М. Баженов отмечает, что замена крупного песка мелким песком понижает прочность бетона на 5-10% [10]. В работах А.В. Саталкина указывается, что применение мелких песков может снизить прочность мелкозернистого бетона при одинаковой подвижности бетонной смеси в 2-3 раза. Отрицательное влияние мелких песков на прочность возрастает по мере увеличения содержания песка в бетоне, а также при переходе от жестких смесей к пластичным. Такое значительное снижение прочности мелкозернистых бетонов на песке с небольшими величинами модуля крупности вызвано повышенной их пустотностью и развитой

удельной поверхностью, что приводит к необходимости увеличения расхода воды с целью сохранения заданной подвижности.

Исследования морозостойкости мелкозернистых бетонов на очень мелких песках проводились В.Е. Крекшиным [60, 72]. Отмечается, что наиболее эффективным технологическим приемом максимального сокращения расхода воды затворения и цемента является применение суперпластификаторов. Эффект разжижения бетонной смеси добавкой С-1 позволил сократить расход вяжущего и воды затворения на 11%, повысить прочность на сжатие без изменения расхода цемента на 15-23%. При применении совмещенной добавки С-1+СНВ удалось получить бетоны высокой морозостойкости (400-450 циклов).

Таким образом, можно сделать вывод, что существуют два различных способа повышения морозостойкости бетона: 1) повышение плотности бетона, уменьшение объема макропор и их проницаемости для воды, например, за счет снижения В/Ц, применения добавок; 2) создание в бетоне с помощью специальных воздухововлекающих добавок резервного объема воздушных пор, не заполняемых при обычном водонасыщении бетона, но доступных для проникновения воды под давлением, возникающем при ее замерзании.

Как указывалось, размер мелкого заполнителя оказывает существенное влияние на морозостойкость бетона. Заполнители занимают в бетоне до 80% объема и оказывают влияние на свойства бетона, его долговечность и стоимость. Стоимость заполнителя составляет 30...50% (а иногда и более) от стоимости бетонных и железобетонных конструкций, поэтому применение более доступных и дешевых местных заполнителей в ряде случаев позволяет снизить стоимость строительства, уменьшает объем транспортных перевозок, обеспечивает сокращение сроков строительства.

В бетоне применяют крупный и мелкий заполнитель. Крупный заполнитель (более 5 мм) подразделяют на гравий и щебень. Мелким заполнителем в бетоне является естественный или искусственный песок. На

свойства бетона наибольшее влияние оказывают зерновой состав, прочность и чистота заполнителя.

На строительных объектах или заводах сборного железобетона зерновой состав заполнителя подбирают, используя реальные песок и щебень. Правильный выбор зернового состава заполнителя или соотношения между песком и щебнем может быть сделан только с учетом состава бетона, в частности с учетом содержания цемента и воды.

С зерновым составом непосредственно связана пустотность заполнителя, определяемая возможностью его плотной укладки. Пустотность заполнителя является важной характеристикой, так как в известной мере определяет расход цемента (чем больше пустот, тем больше требуется цемента для их заполнения) и другие свойства бетона.

Важной характеристикой заполнителя, связанной с его зерновым составом и определяющей его влияние на свойства бетона и бетонной смеси, является удельная поверхность зерен заполнителя. Удельные поверхности природных среднезернистых песков колеблются от 50 до 100 см<sup>2</sup>/г.

Для получения монолитного бетона необходимо, чтобы цементное тесто не только заполнило пустоты между зернами песка, но и раздвинуло зерна с целью создания между ними цементной прослойки. Расход цемента на получение подобной оболочки зависит от удельной поверхности заполнителя, возрастая с уменьшением размера зерен.

Добавление к крупному заполнителю мелкого уменьшает его пористость, но одновременно увеличивает удельную поверхность, поэтому окончательное влияние заполнителя на бетон лучше всего определять непосредственным испытанием заполнителя в бетоне.

Большое влияние на прочность бетона оказывает чистота заполнителя. Пылевидные и особенно глинистые примеси создают на поверхности зерен заполнителя пленку, препятствующую сцеплению их с цементным камнем. Поэтому компенсировать отрицательное влияние грязного или некачественного заполнителя на свойства бетона путем повышения расхода

цемента недопустимо. От глинистых примесей песок и щебень очищают тщательной промывкой.

Песок для производства обычного бетона, должен соответствовать требованиям ДСТУ Б В.2.7-32-95 [85] Песок плотный природный для строительных материалов, изделий, конструкций и работ (ГОСТ 8736-93 [86]). Содержание в песке зерен, проходящих через сито 0,14 мм, не должно превышать 10%, а содержание глинистых, илистых и пылевидных примесей, определяемых отмучиванием, - 35% по массе. Крупность зерен определяют просеиванием песка через стандартный набор сит. Наличие в песке зерен крупнее 10 мм не допускается, зерен размером 5...10 мм должно быть не более 5% (по массе).

Для условного выражения крупности песка пользуются модулем крупности, обозначающим сумму полных остатков (%) на ситах стандартного набора, деленную на 100. Результаты просеивания песка можно представить графически. Модуль крупности позволяет оценивать влияние заполнителя на свойства бетонной смеси и бетона лишь приблизительно.

По крупности пески разделяют на крупные, средние, мелкие и очень мелкие. Если песок крупный, то это еще не значит, что он вполне пригоден для бетона. Для полной характеристики песка важна величина его пустотности. Для бетона наиболее пригоден крупный песок, содержащий достаточное количество средних и мелких зерен. При таком соотношении зерен объем пустот будет малым, а площадь поверхности зерен небольшая.

Плотность песка зависит от его истинной плотности, пустотности и влажности и определяется в сухом рыхлом состоянии. Песок, предназначенный для бетона С 12/15 и выше или для бетона в конструкциях, подвергающихся замерзанию в насыщенном водой состоянии, должен иметь плотность не ниже 1550 кг/м<sup>3</sup>; в остальных более простых случаях не ниже 1400 кг/м<sup>3</sup>. При встряхивании песок уплотняется, и плотность его увеличивается. Самый большой объем песок занимает при влажности около 5...7%; с повышением или понижением влажности объем песка уменьшается.

Это свойство следует учитывать при его приемке и дозировке (по объему) для приготовления бетона.

Решение задачи проектирования составов бетонов с заданной прочностью, морозостойкостью и удобоукладываемостью является сложной проблемой. Развитие бетоноведения позволило создать теоретическую базу прогнозирования ряда свойств бетона. Однако используемая на практике методология пока ограничивается проектированием составов бетона лишь с заданной прочностью и удобоукладываемостью. Для обеспечения необходимой морозостойкости рекомендуется выполнять соответствующие требования, включая ограничение минимальной прочности [16]. Для обеспечения долговечности железобетонных и бетонных конструкций морозостойкость иногда является более важным параметром, чем прочность. Многие работы посвящены решению проблемы проектирования составов бетона с заданной морозостойкостью, где получены зависимости и уравнения для расчета проектной марки по морозостойкости. Так В.П. Сизов предлагает морозостойкость теоретически определять по формуле:

$$F=A R_{ц} (Ц/В-0,5) \quad (1.21)$$

где: А- коэффициент;

$R_{ц}$  - активность цемента.

Авторы статьи [26] предлагают уравнение

$$F = F_1 R_b^{A_2} \exp^{A_3 V_{вх}} \quad (1.22)$$

где  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  – эмпирические коэффициенты, обусловленные особенностями исходных и материалов водосодержанием бетонных смесей;

$R_b$  - 28-суточная прочность;

$V_{вх}$  -объем вовлеченного воздуха.

На основании обширного анализа методов определения и прогнозирования морозостойкости А.Е. Шейкин и Л.М. Добшиц [129] предложили прогнозировать морозостойкость по критерию  $K_{мрз}$ , который зависит от общей и открытой пористости бетона. Расчетный критерий по их мнению в окончательном виде можно выразить формулой

$$K_{мрз} = 0,456\alpha / (В/Ц - 0,271\alpha) \quad (1.23)$$

где:  $\alpha$  – степень гидратации цемента;

В/Ц- водоцементное отношение.

Из анализа вышеприведенных зависимостей, можно сделать вывод, что морозостойкость также, как и прочность, в первую очередь зависит от водоцементного отношения. Следующими важными факторами с точки зрения обеспечения прочности и морозостойкости являются расход цемента и добавки в бетон. Они же оказывают большое влияние и на удобоукладываемость бетонных смесей. Особенно важную роль эти факторы приобретают при применении мелких и очень мелких песков. В любом случае возникает необходимость экспериментальной проверки и корректировки расчетных составов с необходимыми многопараметрическими свойствами.

Применение химических добавок является одним из наиболее перспективных направлений технического прогресса в технологии бетона. В развитых странах объем изготовления бетона и строительных растворов с добавками превышает 90% [111]. Можно утверждать, что уровень применения химических добавок определяет уровень строительства и строительной индустрии.

Вводимые в небольших количествах добавки являются весьма эффективными регуляторами формирования структуры, позволяющими коренным образом улучшить технические свойства бетонных смесей и бетона.



Широкое распространение добавок обусловлено тем, что при сравнительно небольшом удорожании бетона за счет стоимости добавки и затрат связанных с ее подготовкой к применению (растворение, дозирование), можно существенно улучшить технологические свойства бетонной смеси (подвижность, удобоукладываемость) или технические свойства бетона (скорость твердения, прочность, морозостойкость, водонепроницаемость и др.). Можно также придать бетонам совершенно новое свойство – способность твердеть при отрицательной температуре. Целью применения добавки может быть и экономия цемента, достигаемая благодаря снижению его расхода при неизменных технических свойствах смесей или бетона.

Одна из первых классификаций поверхностно-активных веществ (ПАВ) предложена академиком П.А. Ребиндером, который делил их на 2 основные системы: гидролизующего и гидрофобизирующего типа [100]. Гидрофобизирующие ПАВ были подразделены на воздухововлекающие и микропорообразующие и не вызывающие порообразования

Учитывая многообразие изменения свойств бетонных смесей и бетонов, достигаемых путем их модификации различными органическими и неорганическими соединениями, В.Б. Ратиновым и Т.И. Розенберг продолжена классификация различных добавок по механизму их действия на процессы схватывания и твердения вяжущих с учетом возможности их взаимодействия с продуктами гидролиза и гидратации цементного клинкера. Подобная классификация весьма удобна при отборе исходных наиболее эффективных модификаторов [99].

Другая классификация добавок по основному эффекту действия, в соответствии с [49], выделяет основные классы добавок, позволяющих экономить цемент, регулировать процессы схватывания и твердения вяжущих, кинетику их тепловыделения, создать бетоны повышенной морозостойкости, водонепроницаемости.

В практике строительства СССР широко применялись пластифицирующие, воздухововлекающие и противоморозные добавки.

Был накоплен большой опыт применения в качестве пластифицирующей добавки отходов целлюлозно-бумажного производства – сульфитно-спиртовой барды (ССБ), а также продукта ее переработки – сульфитно-дрожжевой бражки (СДБ). Гидрофилизующие добавки на основе лигносульфонатов действуют как диспергаторы цементно-коллоидной массы и поэтому являются хорошими пластификаторами бетонов.

Применение лигносульфонатов в качестве добавок к бетонам, подвергаемым в процессе твердения гидротермальной обработке, приводит к снижению прочности этих бетонов.

Гидрофильные добавки отличаются сильным пластифицирующим действием при относительно небольшом воздухововлечении.

В настоящее время многими целлюлозно-бумажными комбинатами производятся добавки лигносульфонаты технические (ЛСТ), представляющие собой вязкую темно-коричневую жидкость или темно-коричневую твердую массу, хорошо растворимую в воде.

На основе лигносульфонатов технических фирмой «Релаксол» (г. Запорожье) производится целый ряд комплексных добавок [111].

Среди воздухововлекающих добавок, которые относятся к ПАВ гидрофобизирующего действия, известны следующие: СНВ – добавка на основе натриевых солей абиетиновой кислоты; СДО- смола омыленная древесная.

При использовании добавки СНВ повышается подвижность и удобоукладываемость бетонной смеси, а также морозостойкость бетона. Все это является следствием эффекта воздухововлечения и образования системы воздушных пузырьков.

Основным недостатком воздухововлекающих добавок является трудность управления процессом воздухововлечения бетонной смесью и заметное снижение прочности.

Особую группу гидрофобизирующих ПАВ составляют кремнийорганические соединения, из которых в качестве добавок к бетону известны жидкости полигидросилоксанового типа (кремнийорганические полимеры ГКЖ-94, ГКЖ-13, ГКЖ-94М), и типа силиконатов натрия (кремнийорганические жидкости ГКЖ-10, ГКЖ-11). Выделение газа, в частности, водорода в результате реакции кремнийорганических соединений с гидратом окиси кальция сопровождается образованием замкнутых пор и вовлечением воздуха. При правильном управлении этим процессом это должно способствовать благоприятной с точки зрения долговечности структуры бетона.

Исследования показали [13, 118], что применение кремнийорганических жидкостей полигидросилоксанового типа и типа силиконатов натрия удастся значительно повысить морозостойкость бетонов нормального твердения вне зависимости от их состава и вида вяжущего.

В отдельную группу можно выделить пластификаторы повышенной эффективности или суперпластификаторы (разжижители) бетонных смесей. Наиболее известен суперпластификатор С-3, разработанный НИИЖБ. Он представляет собой синтетический продукт сульфированной нафталинформальдегидной смолы.

Механизм действия СП заключается в его адсорбции на поверхности гидратирующихся цементных частиц и пылевидных фракций песка с образованием молекулярного слоя, снижающего внутренне трение в системе цемент – заполнитель – вода», а также в пептизации флокул цементных частиц. Вызванное пептизацией увеличение поверхности гидратирующихся цементных частиц интенсифицирует процессы гидратации и обуславливает более интенсивное нарастание прочности.

По мнению Ф.М. Иванова, В.М. Москвина, В.Г. Батракова [48] при введении в состав бетонной смеси добавки С-3 в количестве 0,2-1% от массы цемента можно получить литые, самоуплотняющиеся, практически не требующие вибрации бетонные смеси, а при снижении водоцементного

отношения бетонные смеси повышенной прочности при неизменной подвижности смеси. При снижении В/Ц на 25-30% удается получить бетоны, которые при нормально-влажностном твердении в суточном возрасте обладают прочностью на 50-75% большей, чем обычный бетон. Возможно при необходимости снижение расхода цемента на 15-20% [95]. Некоторые авторы считают, что СП не могут быть добавками, предназначенными для повышения морозостойкости бетонов. Для этой цели их рекомендуется совмещать с воздухововлекающими добавками [96].

Наиболее эффективными добавками являются комплексы, включающие поверхностно-активные вещества и электролиты. При правильно подобранных дозировках добавок электролитов и ПАВ, удается использовать пластифицирующие свойства последних и одновременно высокую скорость твердения. Вследствие введения электролитов улучшаются структурно-механические свойства бетона, в том числе повышается его прочность и морозостойкость.

Например, весьма эффективными являются добавки, содержащие СДБ и сульфат натрия или же СДБ и хлорид кальция [133], позволяющие экономить до 10% цемента. Хорошо себя зарекомендовали добавки, состоящие из кремнийорганических соединений и электролитов, обеспечивающие достаточно высокую скорость твердения бетонов и последующую их высокую морозостойкость и коррозионную стойкость.

Дальнейшее повышение эффективности добавок для бетонов достигается созданием комплексов, содержащих три и более компонентов. Однако при применении таких добавок строительная индустрия сталкивается со значительными трудностями, связанными с их транспортированием, хранением, приготовлением и дозированием. Естественный путь преодоления этих трудностей – создание комплексных добавок в виде единого продукта заводского изготовления, готового к прямому введению в бетонные смеси, не изменяющие свое агрегатное состояние, в интервале

температур, при которых производится транспортирование, хранение и применение добавок.

Фирмой «Будиндустрия ЛТД» (г. Запорожье) разработан и применяется способ получения комплексных модификаторов в виде единого совмещенного продукта (порошкообразного, пастообразного или в виде растворов), получившие название «Релаксол» [111].

Основой добавок системы «Релаксол» являются проверенные промышленностью пластификаторы (ЛСТ, С-3) и техногенные продукты коксохимического производства в виде водорастворимых солей – тиосульфатов и радонитов натрия. Их можно отнести к группе добавок, вызывающих сильное тепловыделение с сильным ускорением процессов твердения и слабым антифризным действием. При введении в бетонные смеси они придают им следующие свойства: повышают подвижность бетонных смесей, ускоряют твердение бетона, увеличивают конечную прочность и морозостойкость.

### **Выводы по разделу 1**

1. Проблема обеспечения долговечности бетона защитного слоя железобетонных конструкций в условиях атмосферных климатических воздействий является актуальной, учитывая значительное количество повреждений и деструкции до достижения нормируемого срока службы конструкций.

2. Долговечность бетона защитного слоя в условиях атмосферных климатических воздействий лимитируется кинетикой нейтрализации бетона при воздействии кислых газов осложненной морозной деструкцией при воздействии попеременного замораживания и оттаивания. Современные нормативные документы не содержат количественных зависимостей для расчета долговечности бетона защитного слоя и назначения параметров первичной защиты в условиях комплексного воздействия агрессивной воздушной среды и климатических факторов.

3. Существующие методы оценки и прогноза долговечности бетона защитного слоя по критерию нейтрализации не учитывают реальных температурно-влажностных климатических условий среды. Поэтому необходимо совершенствование методики расчета долговечности бетона защитного слоя с учетом изменений климатических характеристик (температуры и влажности) на протяжении срока эксплуатации.

4. Установлены определяющие факторы, влияющие на морозостойкость бетона, однако объемы повреждений бетона защитного слоя железобетонных до достижения нормируемого срока службы свидетельствуют о необходимости проведения дальнейших исследований, направленных на обеспечение требуемой морозостойкости бетона, особенно на мелкозернистых песках. Эффективным средством модификации бетонов для повышения их морозостойкости могут быть химические добавки, изменяющие структуру бетона.

5. Неправильная оценка агрессивных факторов, несоответствие конструктивно-технологических параметров первичной защиты железобетонных конструкций условиям их работы, приводят, нередко, к повреждениям или полному отказу строительных элементов, а, следовательно, к увеличению расходов на ремонт и восстановление конструкций. В то же время переоценка этих факторов ведет к излишним затратам материалов и средств на обеспечение их стойкости. Наиболее эффективные решения возможно получить при количественном учете вышеперечисленных факторов на стадии проектирования состава бетона с учетом факторов, определяющих долговечность бетона.

С учетом состояния вопроса сформулирована цель и задачи исследований, изложенные во введении.

## РАЗДЕЛ 2

### РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОНА ЗАЩИТНОГО СЛОЯ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

#### 2.1 Оценка параметров атмосферных климатических воздействий (на примере г. Днепропетровска)

В работе [54] приведены карты-схема загрязнения атмосферы оксидом углерода, диоксидом серы, диоксидом азота на территории г. Днепропетровска (рис 2.1, 2.2). Расчеты выполнены на ЭВМ с использованием программы "Пленэр", с выделением зон загрязнения по степени превышения ПДК.

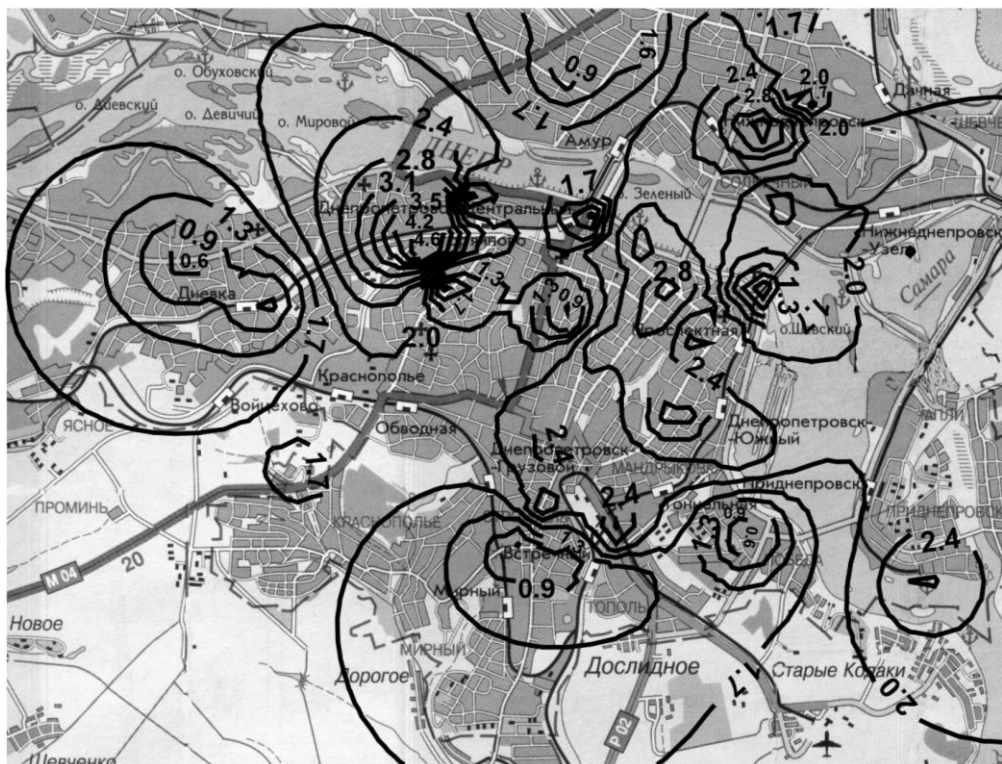


Рис. 2.1. Изолинии концентрации диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ) в атмосфере города Днепропетровска ( в долях среднесуточной ПДК).

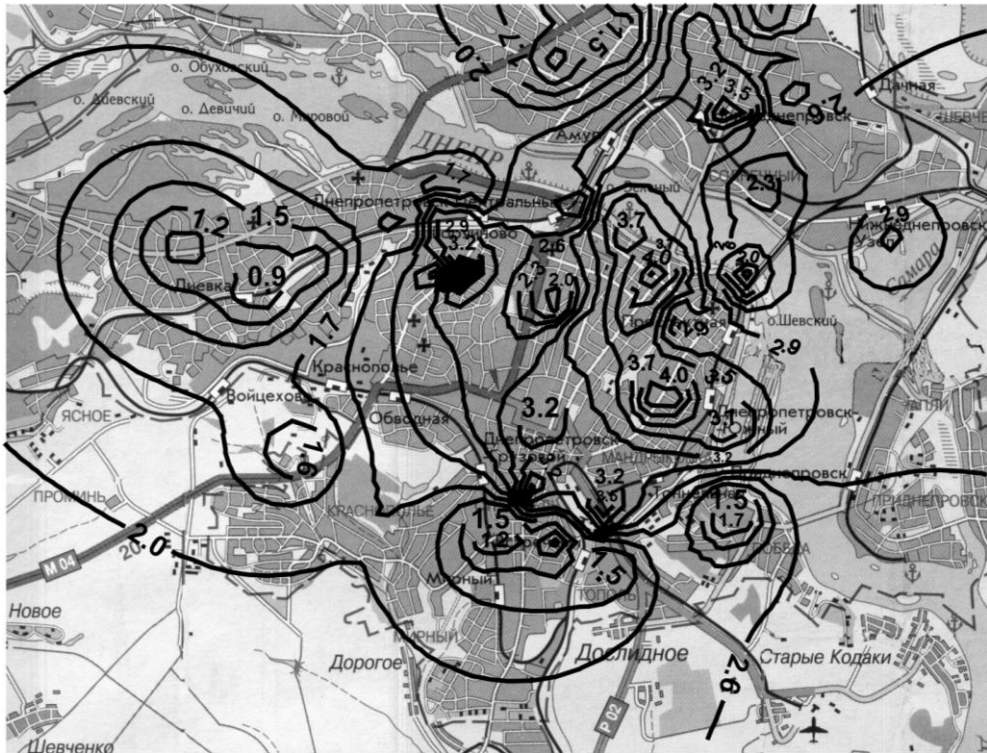


Рис. 2.2. Изолинии концентрации диоксида азота ( $\text{NO}_x$ ) в атмосфере города Днепропетровска ( в долях среднесуточной ПДК).

Нормы среднесуточных предельно допустимых концентраций согласно [45] в  $\text{мг}/\text{м}^3$  составляют, соответственно, для  $\text{SO}_2$  – 0,5;  $\text{NO}_x$  – 0,04. С учетом этого максимальные значения концентрации агрессивных кислых газов в атмосфере города Днепропетровска составляют в  $\text{мг}/\text{м}^3$  -  $\text{SO}_2$  –  $0,5 \times 4,6 = 2,3$ ;  $\text{NO}_x$  -  $0,04 \times 4 = 0,16$ .

Среднемесячные значения температуры воздуха в г. Днепропетровске согласно [117] приведены в табл. 2.1 и на рис. 2.3.

Для уточнения температурных среднемесячных показателей в г. Днепропетровске, указанных в [117], был выполнен статистический анализ фактической среднесуточной температуры г. Днепропетровска с 2001 года. Для сравнения использовался климатический мониторинг погоды г. Днепропетровска.



Таблица 2.1

**Среднемесячные показатели температуры воздуха (С°)**  
**в г. Днепропетровске [117]**

Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
-4,7	-3,8	1,1	9,6	16,0	19,6	21,6	20,7	15,4	8,6	2,2	-2,5

Таблица 2.2

**Сравнение температурных показателей воздуха г.**  
**Днепропетровска**

Год	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
2001	-0,1	-2,8	4,0	11,5	14,1	17,8	26,0	22,8	16,2	9,1	2,9	-6,9
2002	-3,8	2,5	5,7	10,2	16,9	20,0	25,7	21,0	16,6	8,1	3,8	-8,2
2003	-4,3	-7,2	-1,1	7,1	20,2	18,7	20,7	20,4	15,1	8,4	3,3	-0,5
2004	-1,5	-2,5	4,3	9,5	14,3	17,2	20,3	20,3	15,6	8,7	3,1	-0,1
2005	0,1	-4,4	-1,3	10,9	18,5	18,5	21,5	22,7	17,9	9,9	3,1	-0,5
2006	-8,7	-6,7	1,2	9,8	15,1	20,7	21,1	23,5	16,8	10,3	2,8	1,2
2007	1,5	-2,6	4,8	9,1	19,0	21,8	23,9	24,5	16,5	10,9	1,1	-1,1
2008	-5,7	-1,3	5,7	11,3	14,7	20,1	22,2	23,7	15,3	10,9	4,1	-2,0
2009	-4,7	-0,2	2,9	9,8	15,0	22,5	23,9	20,5	17,0	10,8	5,1	-2,0
2010	-7,0	-2,5	1,9	10,4	17,4	22,6	24,8	25,8	16,9	6,5	8,8	-0,5
2011	-5,7	-7,3	0,4	9,2	17,8	21,3	23,9	21,6	16,7	8,5	0,8	1,6
2012	-3,7	-9,3	0,5	13,5	20,5	22,9	25,5	22,6	17,2	12,4	4,5	-3,3
2013	-1,5	0,4	1,0	11,7	20,2	22,6	22,0	22,6	13,4	8,0	5,4	-1,5
2014	-4,4	-1,5	6,2	10,1	18,4	19,1	22,9	23,2	16,6	7,8	1,7	-2,2
Среднее значение	-3,3	-3,8	3,0	10,3	17,3	20,4	23,2	22,5	16,3	9,3	3,6	-2,2
Значение по ДСТУ [117]	-4,7	-3,8	1,1	9,6	16,0	19,6	21,6	20,7	15,4	8,6	2,2	-2,5

Как следует из данных, представленных в табл. 2.2 температурные показатели в действующем ДСТУ и на основе полученных статистических данных практически совпадают.

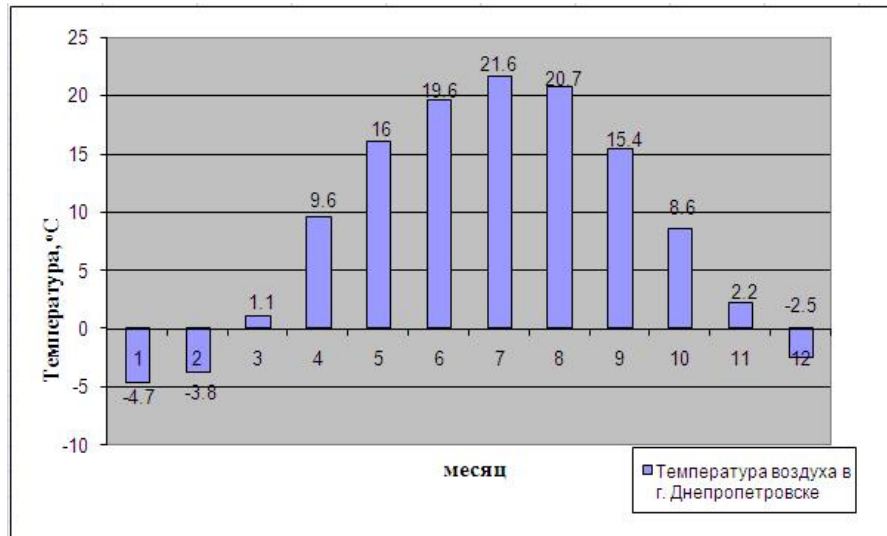


Рис. 2.3. График годового изменения средней температуры наружного воздуха для г. Днепропетровска.

Выполнена аппроксимация гистограмм изменения среднемесячных температур наружного воздуха зависимостью вида:

$$T(m)=a \cdot \sin(bm-c)+d, \quad (2.1)$$

где:  $T(m)$  – температура, °С;

$m$  – месяц (1,2,3,4,...);

$a, b, c, d$  – коэффициенты.

Для условий г. Днепропетровска (рис. 2.4) зависимость (2.1) принимает вид:

$$T(m)=14,213 \sin(0,52m-2,095)+8,44 \quad (2.2)$$

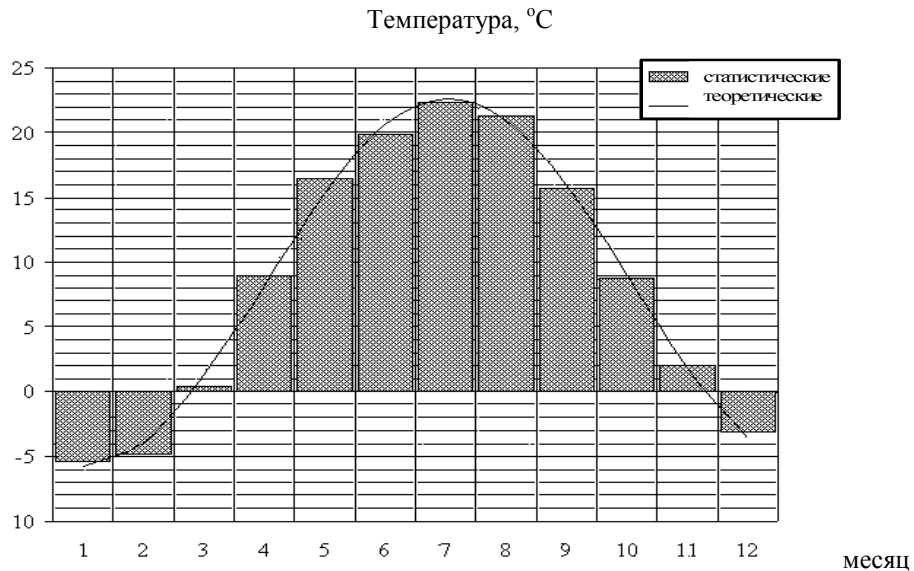


Рис. 2.4. Аппроксимация изменения температуры наружного воздуха для г. Днепропетровска.

Среднемесячные показатели влажности воздуха в г. Днепропетровске согласно [117] приведены в табл. 2.3 и на рис. 2.5.

Таблица 2.3

**Среднемесячные показатели влажности воздуха (%) в г. Днепропетровске [117]**

Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
86	84	81	68	62	65	64	62	68	76	87	89

## 2.2 Эффективный коэффициент диффузии кислых газов и реакционная емкость бетона

Как было показано в разделе 1 при воздействии агрессивных газовых сред на бетон защитного слоя железобетонных конструкций возможна его нейтрализация и коррозия стальной арматуры. Защита от коррозии арматурной стали, расположенной в бетоне, обеспечивается нерастворимой оксидной пленкой на поверхности арматуры, которая образуется и существует в щелочной среде бетона при  $pH > 11.5$  и обуславливает пассивное состояние стали.

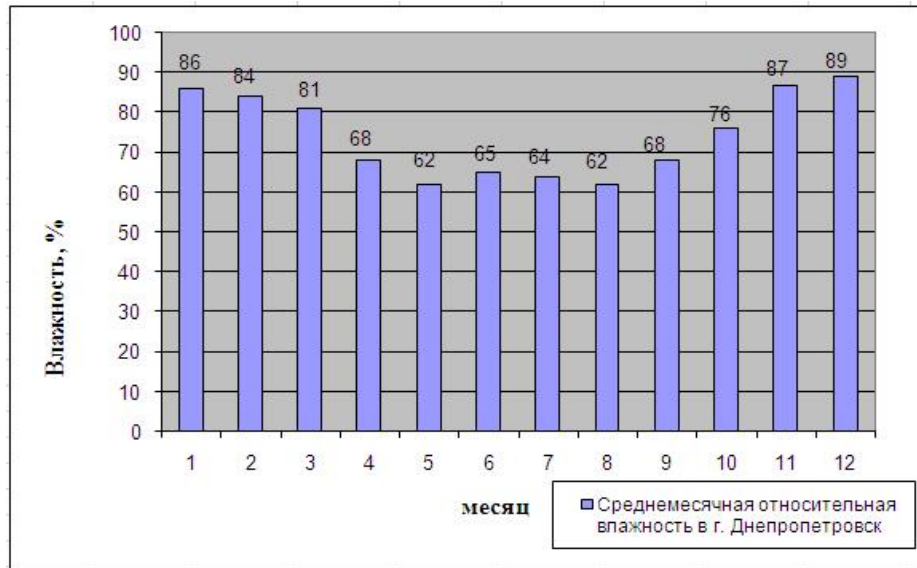


Рис. 2.5. График изменения среднемесячной относительной влажности воздуха для г. Днепропетровска.

Механизм действия на бетон кислых газов заключается в том, что, проникая в поры бетона, эти газы растворяются в жидкой фазе, образуют кислоты и, в первую очередь, нейтрализуют гидроксид кальция ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), понижая тем самым щелочность бетона защитного слоя (характеризуемую водородным показателем pH) [64]. При этом утрачивается способность бетона поддерживать стальную арматуру в пассивном состоянии. В присутствии влаги и кислорода возможно развитие процессов коррозии арматуры как электрохимического процесса. Слой образующихся продуктов коррозии стали создает давление на бетон и откалывает защитный слой, что приводит конструкцию в состояние, непригодное для эксплуатации.

В зависимости от свойств образующихся в бетоне солей кальция, газы разделяются на три группы [103]. Наиболее существенными свойствами кальциевых солей с точки зрения их влияния на свойства нейтрализованного бетона являются: изменение объема твердых фаз при химическом взаимодействии газа с жидкой фазой и минералами цементного камня; растворимость

и гигроскопичность кальциевой соли; агрессивность соли по отношению к стальной арматуре [5].

К первой относят газы, образующие нерастворимые или малорастворимые соли кальция (двуокись углерода, фтористый водород, фосфатный ангидрид и др.). Железобетонные конструкции повреждаются при действии этих газов вследствие коррозии арматуры после нейтрализации бетона защитного слоя.

Вторую группу составляют газы, образующие слаборастворимые соли (сернистый и серный ангидриды, сероводород, сероуглерод). Железобетонные конструкции, в этом случае, повреждаются как вследствие коррозии арматуры после нейтрализации бетона защитного слоя, так и из-за уменьшения прочности и послойного разрушения бетона, вызванного внутренними напряжениями в нем при росте кристаллогидратов.

В третью группу входят газы, образующие хорошо растворимые гигроскопические соли. При повышенной влажности воздуха эти соли, поглощая водяной пар, образуют растворы, которые за счет капиллярного всасывания и диффузии их в жидкой фазе способны проникать вглубь бетона. Соли могут быть агрессивными, способными при повышенной влажности уже в малой концентрации вызвать коррозию стали еще до нейтрализации защитного слоя бетона (хлористый водород, хлор, двуокись хлора, пары брома, иода и др.) или нейтральными по отношению к арматуре и образующие хорошо растворимые кальциевые соли, не вызывающие коррозии стали в щелочной среде бетона (оксиды азота, пары азотной кислоты и др.).

В агрессивной воздушной среде количественно преобладает  $\text{CO}_2$ , его концентрация в 100-1000 раз превышает концентрацию других кислых газов, поэтому взаимодействие бетона с углекислым газом (карбонизация) является ведущим процессом его нейтрализации. Все другие газы, чаще всего, действуют на бетон совместно с  $\text{CO}_2$ . Присутствующие в воздухе в меньшем количестве кислые газы взаимодействуют с уже карбонизированным

наружным слоем бетона. Газы, образующие более сильные кислоты, чем угольная, способны разлагать карбонат кальция с образованием соответствующих солей. Выделяющийся углекислый газ частично выходит в атмосферу, а часть его проникает в более глубокие слои бетона, ускоряя карбонизацию. Исследования, выполненные в Харьковском Промстройниипроекте [74], показали, что при совместном действии  $\text{CO}_2$  и  $\text{SO}_2$ , опережающая диффузия  $\text{CO}_2$  четко выражена, что определяется существенно меньшими размерами его молекулы. При совместном воздействии углекислого газа и других кислых газов (фтористого и хлористого водорода, хлора) ведущая роль в нейтрализации бетона также принадлежит  $\text{CO}_2$ , как более концентрированному. Сопутствующие газы лишь несколько ускоряют или замедляют этот процесс.

Процесс карбонизации ограничивается диффузией  $\text{CO}_2$  в газовой среде бетона с полным поглощением газа в тонком реакционно-способном слое, образующим фронт, который перемещается от поверхности вглубь бетона. Карбонизированный слой по мере увеличения его толщины оказывает всевозрастающее сопротивление диффузии  $\text{CO}_2$  и тем самым, обеспечивает постепенное замедление продвижения фронта нейтрализации.

Эффективный коэффициент диффузии для сернистого ангидрида может быть определен с использованием данных, полученных в работе [106] (см. зависимость (1.6)) и уравнения (1.16), (1.17)):

$$D_{\text{SO}_2} = \frac{\left(120 \cdot e^{-(68-0,45 \cdot W\% - 4,85 \cdot \ln C_m)\tau}\right)^2 \cdot m_0}{2 \cdot C_0 \cdot \tau}; \quad (2.3)$$

где:  $W$  %- относительная влажность воздуха, %;

$C_m$  - массовая концентрация газа,  $\text{мг/м}^3$ ;

$C_0$  - объемная концентрация газа, %;

$\tau$  - время взаимодействия;

$m_0$  - реакционная способность бетона.

В формуле (2.3) необходимо осуществить переход к какой-либо одной концентрации газа - объемной или массовой. Переход от массовой концентрации газов  $C_m$  (весовой концентрации), выраженной в  $г/м^3$  к объемной концентрации  $C_o$  осуществляется по формуле [34]:

$$C_o = \frac{22,4 \cdot C_m \cdot V_t \cdot P_o}{10 \cdot M \cdot P} \quad (2.4)$$

где:  $M$  - молярная масса газа, г/моль;

$P$  - давление газа, Па (мм рт.ст.);

$P_o$  - нормальное давление газа, равное 101325 Па (760 мм рт.ст.);

$V_t$  - объем газа при температуре  $t$  °C:

$$V_t = \frac{8,31 \cdot m_g \cdot (273,2 + t)}{M \cdot T}; \quad (2.5)$$

где:  $m_g$  - масса газа, г.

Из формул (2.4) и (2.5) при нормальном давлении газа и, учитывая, что  $M = 22.4$  мг, имеем:

$$C_o = \frac{8,31 \cdot (273,2 + t) \cdot C_m}{10 \cdot M \cdot p_0}; \quad (2.6)$$

Обследованные в [106] конструкции были изготовлены из бетона классов С12/15 – С20/25, марок по водонепроницаемости W4 на портландцементе с относительным содержанием  $C_3A=0.09...0.11$ ,  $CaO - 0.64$  при расходе цемента  $300$  кг/м<sup>3</sup>.

В качестве эталонного состава бетона принимаем бетон с  $W/C = 0.6$ . Подставляя в (2.3) значения характеристик бетона эталонного состава, значения концентраций сернистого ангидрида и время экспозиции бетона были получены расчетные данные для статистической обработки результатов (табл. 2.4). При регрессионном анализе методом наименьших квадратов

установлена зависимость эффективного коэффициента диффузии сернистого ангидрида от концентрации:

$$\left. \begin{aligned} D_{SO_2} &= 0.07 + 0.65/C_{m,SO_2}, \text{ при } 0.5 \leq C_{m,SO_2} < 50; \\ D_{SO_2} &= 0.0062 + 1.7/C_{m,SO_2}, \text{ при } 50 \leq C_{m,SO_2} \leq 500; \end{aligned} \right\} (2.7)$$

где:  $C_{m,SO_2}$  - весовая концентрация сернистого ангидрида ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ).

Для учета влияния других факторов предлагается мультипликативная модель.

Влияние водоцементного отношения на  $D_{SO_2}$  возможно учесть коэффициентом  $k_w$ , который определялся следующим образом. По формуле (2.1) вычислялось значение эффективного коэффициента диффузии  $D_o$  при  $W/C$  в пределах от 0.3 до 0.75 и формировалась выборка из десяти значений. Затем вычислялось отношение коэффициентов диффузии при различных  $W/C$  к коэффициенту диффузии при  $W/C = 0.6$ , считая это значение соответствующим эталонному составу бетона. При аппроксимации полиномом 5-й степени с точностью  $1 \cdot 10^{-5}$  получена аналитическая зависимость:

$$\begin{aligned} k_w = & 48.443 \cdot (W/C)^5 - 20.784 \cdot (W/C)^4 - 19.871 \cdot (W/C)^3 + 15.377 \cdot (W/C)^2 - \\ & - 1.816 \cdot (W/C) - 0.238 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Окончательно формула (2.1) для эффективного коэффициента диффузии сернистого ангидрида принимает вид:

$$\left. \begin{aligned} D_{SO_2} &= k_w \cdot (0.07 + 0.65/C_{m,SO_2}), \text{ при } 0.5 \leq C_{m,SO_2} < 50; \\ D_{SO_2} &= k_w \cdot (0.0062 + 1.7/C_{m,SO_2}), \text{ при } 50 \leq C_{m,SO_2} \leq 500; \end{aligned} \right\} (2.9)$$



Таблица 2.4

**Коэффициенты диффузии сернистого ангидрида**

Концентрация		Время $\tau$ , год	Глубина нейтрализации $y(\tau)$ , мм	Коэффициент диффузии $D_0$ , см/с
$C_m$ мгм <sup>3</sup>	$C_0$ %			
0.5	$1.75 \cdot 10^{-5}$	30.0	27.35	1.04
		35.0	33.78	1.36
		40.0	39.58	1.63
1.0	$3.50 \cdot 10^{-5}$	30.0	30.59	0.650
		35.0	37.19	0.842
		40.0	43.06	0.966
2.0	$7.00 \cdot 10^{-5}$	30.0	34.22	0.407
		35.0	40.94	0.499
		40.0	46.83	0.571
5.0	$1.75 \cdot 10^{-4}$	30.0	39.69	0.219
		35.0	46.48	0.257
		40.0	52.33	0.285
10.0	$3.50 \cdot 10^{-4}$	25.0	36.39	0.110
		30.0	44.39	0.137
		35.0	51.17	0.156
		40.0	56.92	0.169
20.0	$7.00 \cdot 10^{-4}$	25.0	41.62	$7.22 \cdot 10^{-2}$
		30.0	49.66	$8.57 \cdot 10^{-2}$
		35.0	56.33	$9.45 \cdot 10^{-2}$
		40.0	61.91	$9.99 \cdot 10^{-2}$
50.0	$1.75 \cdot 10^{-3}$	25.0	49.72	$4.12 \cdot 10^{-2}$
		30.0	57.59	$4.61 \cdot 10^{-2}$
		35.0	63.95	$4.87 \cdot 10^{-2}$
		40.0	69.19	$4.99 \cdot 10^{-2}$
100	$3.50 \cdot 10^{-3}$	20.0	47.19	$2.32 \cdot 10^{-2}$
		25.0	56.88	$2.70 \cdot 10^{-2}$
		30.0	64.41	$2.88 \cdot 10^{-2}$
		35.0	70.40	$2.95 \cdot 10^{-2}$
		40.0	75.25	$2.95 \cdot 10^{-2}$
200	$7.00 \cdot 10^{-3}$	15.0	43.26	$1.30 \cdot 10^{-2}$
		20.0	55.83	$1.62 \cdot 10^{-2}$
		25.0	65.06	$1.76 \cdot 10^{-2}$
		30.0	72.05	$1.80 \cdot 10^{-2}$
		35.0	77.05	$1.79 \cdot 10^{-2}$
		40.0	81.85	$1.75 \cdot 10^{-2}$
500	$1.75 \cdot 10^{-2}$	15.0	58.18	$0.49 \cdot 10^{-2}$
		20.0	69.72	$1.01 \cdot 10^{-2}$
		25.0	77.72	$1.01 \cdot 10^{-2}$
		30.0	83.56	$9.70 \cdot 10^{-2}$
		35.0	87.99	$9.22 \cdot 10^{-2}$
		40.0	91.47	$8.72 \cdot 10^{-2}$

Так как экспериментальные данные о значениях эффективных коэффициентов диффузии других газов крайне ограничены, то возникает необходимость расчетного определения эффективных коэффициентов диффузии для всех агрессивных газов, приведенных в ДСТУ Б В 2.6-145:2010 [55].

В ДСТУ Б В 2.6-145:2010 [55], приведена классификация газов по степени агрессивности (слабая, средняя и сильная), которые соответствуют группам А,В,С и D, зависящих от вида и концентрации газов.

Задача определения эффективных коэффициентов диффузии была решена исходя из предположения, что газы различных видов и концентраций, объединенные в одну группу по агрессивности, вызывают одинаковое воздействие на конструкцию, т.е. бетон защитного слоя нейтрализуется на одинаковую глубину для конструкций, эксплуатирующихся в среде любого из газов, находящихся в данной группе. На основании этого предполагалось, что глубина нейтрализации бетона при воздействии  $\text{CO}_2$   $Y_{\text{CO}_2}$  равна глубине нейтрализации бетона при воздействии любого газа  $Y_{\text{gaz}}$  :

$$Y_{\text{CO}_2} = Y_{\text{gaz}}, \quad (2.10)$$

За основу расчетов была принята слабоагрессивная степень воздействия газовой среды, где известны верхние пределы концентраций всех газов.

После преобразований получена формула для определения коэффициентов диффузии других газов при известном коэффициенте диффузии углекислого газа:

$$D_{\text{gaz}} = \frac{D_{0,\text{CO}_2} \cdot C_{0,\text{CO}_2}}{C_{0,\text{gaz}}} \quad (2.11)$$

где:  $D_{0,\text{CO}_2}$ ,  $C_{0,\text{CO}_2}$  - коэффициент диффузии и концентрация  $\text{CO}_2$ ;

$D_{0,\text{gaz}}$ ,  $C_{0,\text{gaz}}$  - то же для любого газа.

Коэффициенты диффузии углекислого газа в бетоне с водоцементным отношением 0.6, 0.55 и 0.45, вычисленные согласно зависимости (1.13-1.15), соответственно равны  $5.505 \cdot 10^{-4}$ ,  $3.594 \cdot 10^{-4}$  и  $1.532 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup>/с. Весовая концентрация CO<sub>2</sub> 2000 мг/м<sup>3</sup> соответствует объемной концентрации, равной 0.1%.

Результаты вычислений коэффициентов диффузии других газов по формуле (2.9) приведены в табл.2.5.

При водоцементном отношении, отличном от указанных в таблице, D<sub>o</sub> определяется с учетом поправочного коэффициента k<sub>w</sub>:

$$D_o = k_w D_{o,W/C=0.6}; \quad (2.12)$$

где: D<sub>o,W/C=0.6</sub> - коэффициент диффузии газа в бетоне при W/C=0.6.

Изменение эффективного коэффициента диффузии в зависимости от температуры возможно учитывать по формуле (1.16):

$$D = D_o \cdot \xi_T;$$

$$\xi_T = \left( \frac{273+t}{273} \right)^{1.75};$$

где: D<sub>o</sub> - коэффициент диффузии газа в бетоне при t = 0 °С;

t - температура окружающей среды, С.

В разделе 1 приведены экспериментальные зависимости для коэффициента диффузии углекислого газа в зависимости от водоцементного отношения и относительной влажности.

Таблица 2.5

**Коэффициенты диффузии кислых газов**

Газ	Концентрация		Коэффициент диффузии		
	мг/м <sup>3</sup>	%	0.6	0.55	0.45
CO <sub>2</sub>	2000	0.1	$5.505 \cdot 10^{-4}$	$3.594 \cdot 10^{-4}$	$1.532 \cdot 10^{-4}$
SO <sub>2</sub>	10	$3.5 \cdot 10^{-4}$	0.157	0.103	0.0438
H <sub>2</sub> S	5	$3.3 \cdot 10^{-4}$	0.167	0.109	0.0466
NH <sub>3</sub>	20	$2.6 \cdot 10^{-3}$	0.021	0.0136	0.0058
HF	5	$5.6 \cdot 10^{-4}$	0.0983	0.0642	0.0274
NO <sub>2</sub>	5	$2.4 \cdot 10^{-4}$	0.227	0.148	0.063
Cl <sub>2</sub>	1	$3.2 \cdot 10^{-5}$	1.742	1.137	0.485
HCl	5	$3.1 \cdot 10^{-4}$	0.178	0.116	0.0494

Принимая линейную интерполяцию для влияния влажности наружного воздуха и водоцементного отношения бетона на значение эффективного коэффициента диффузии для эффективного коэффициента диффузии углекислого газа в диапазоне относительной влажности (60-90)% получено выражение:

$$D_{\varphi}(60-90) = 1 \cdot 10^{-5} + 0,333 \cdot 10^{-5} (90 - \varphi); \quad (2.13)$$

где:  $D_{\varphi}(60-90)$  - эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в бетоне при относительной влажности воздуха в диапазоне 60 – 90%;

$\varphi$  – относительная влажность наружного воздуха, %.

Что касается реакционной способности бетона, то в соответствии с зависимостью (1.8) она зависит от расхода цемента и относительного содержания оксида кальция в цементе.

Учитывая наличие в цементе активных добавок (минеральных или шлака) зависимость для расчета реакционной способности бетона (1.8) принимает вид:

$$m_0 = f p_c (1 - p_a) C_{em} V Mg/M_{CaO}; \quad (2.14)$$

где:  $p_c$  - содержание основных оксидов в цементном клинкере в пересчете на CaO в относительных величинах по массе;

$p_a$  - содержание активных добавок в цементе.

$f$  - степень нейтрализации бетона, равная отношению количества основных оксидов, прореагировавших с газом, к общему их количеству в цементе;

$C_{em}$  - расход цемента;

$V$  - объем 1 г газа:  $V = V_m/Mg$ ;

$V_m$  - объем 1 моля газа;

$Mg$  - молекулярная масса газа;

$M_{CaO}$  - молекулярная масса CaO.

### **2.3 Метод расчета и оценка долговечности бетона защитного слоя железобетонных конструкций с учетом температуры и влажности**

В разделе 1 отмечалось, что общепринятая методика расчета карбонизации бетона не учитывает температуру и влажность окружающей среды, а также рассчитана на стационарные условия. В реальных условиях температура и влажность среды изменяются в зависимости от времени года.

Особенностью процесса карбонизации является то, что при отрицательной температуре практически прекращается взаимодействие  $CO_2$  с активными компонентами, растворенными в поровой жидкости бетона. Это связано с тем, что мельчайшие поры, где сохраняется незамерзшая капиллярная влага, недоступны для диффузии  $CO_2$  газовой среде, а известь из раствора переходит в кристаллогидрат уже при  $-0.15\text{ C}^\circ$ .

В расчете времени карбонизации бетона в естественных климатических условиях принимается только период с положительной температурой, временной промежуток времени с отрицательной температурой не учитывается.

Из уравнения аппроксимации температуры для г. Днепропетровска (2.2) и равенства  $T(m)=0^{\circ}\text{C}$  могут быть определены корни уравнения, характеризующие начало и конец периода, когда протекает процесс карбонизации бетона, где  $0^{\circ}\text{C}$  – температура наружного воздуха начала и конца периода, когда протекает процесс карбонизации бетона.

Для условий г. Днепропетровска  $m_1=2,3$  – начало периода;  $m_2 = 11,7$  – конец периода карбонизации. Таким образом, длительность периода карбонизации бетона 9,4 мес. в календарном году или  $365 \cdot 9,4/12=286$  сут.

В исследовании времени карбонизации бетона защитного слоя в условиях атмосферных климатических воздействий температура и относительная влажность наружного воздуха принималась для условий г. Днепропетровска. В соответствии с графиком изменения температуры при расчете глубины карбонизации бетона защитного слоя железобетонных конструкций в условиях атмосферной коррозии г. Днепропетровска необходимо учитывать помесичные положительные температуры с 3 по 11 месяц. На этом годовом промежутке времени относительная влажность наружного воздуха изменяется в пределах от 62 до 87% ( см. рис. 2.6).

Так как эффективный коэффициент диффузии является функцией температуры и влажности, то его значение будет изменяться в течении года. Для расчетов принято среднемесячное значение температуры и влажности воздуха, а также соответствующие значения эффективного коэффициента диффузии бетона (рис 2.6).

Как следует из рис. 2.6 значение эффективного коэффициента диффузии значительно изменяется в течении календарного года и эти изменения необходимо учитывать при расчете глубины карбонизации.

Зависимость для расчета времени (год) карбонизации бетона защитного слоя арматуры железобетонных конструкций имеет вид:

$$\tau_{carb} = \frac{a}{\sum_{i=1}^n y_i}; \quad (2.15)$$

где:  $a$  – величина защитного слоя бетона;

$\sum_{i=1}^n y_i$  – глубина карбонизации бетона защитного слоя арматуры за

один календарный год;

$y_i$  – глубина карбонизации бетона защитного слоя для  $i$ -го месяца с положительной температурой:

$$y_i = \sqrt{\frac{2D_i(T, \varphi)C_0\tau_i}{m_0}}; \quad (2.16)$$

где:  $D_i(T, \varphi)$  – эффективный коэффициент диффузии CO<sub>2</sub> в бетоне в

$i$  – том месяце в зависимости от температуры  $T$  и влажности  $\varphi$  наружного воздуха;

$C_0$  – объемная концентрация газа, %;

$\tau_i$  – время взаимодействия на протяжении рассматриваемого месяца;

$m_0$  – реакционная способность бетона.

С использованием полученных зависимостей выполнена оценка времени карбонизации бетона защитного слоя железобетонных конструкций для атмосферных климатических условий г. Днепропетровска. При этом концентрация углекислого газа в городских условиях принималась равной

2000 мг/м<sup>3</sup> (соответствует группе А по ДСТУ Б В 2.6-145:2010). Прогноз времени карбонизации выполнялся для величины защитного слоя при значениях 20, 30, 40 мм; для расхода цемента в бетоне принимались значения 250 и 300 кг/м<sup>3</sup>.

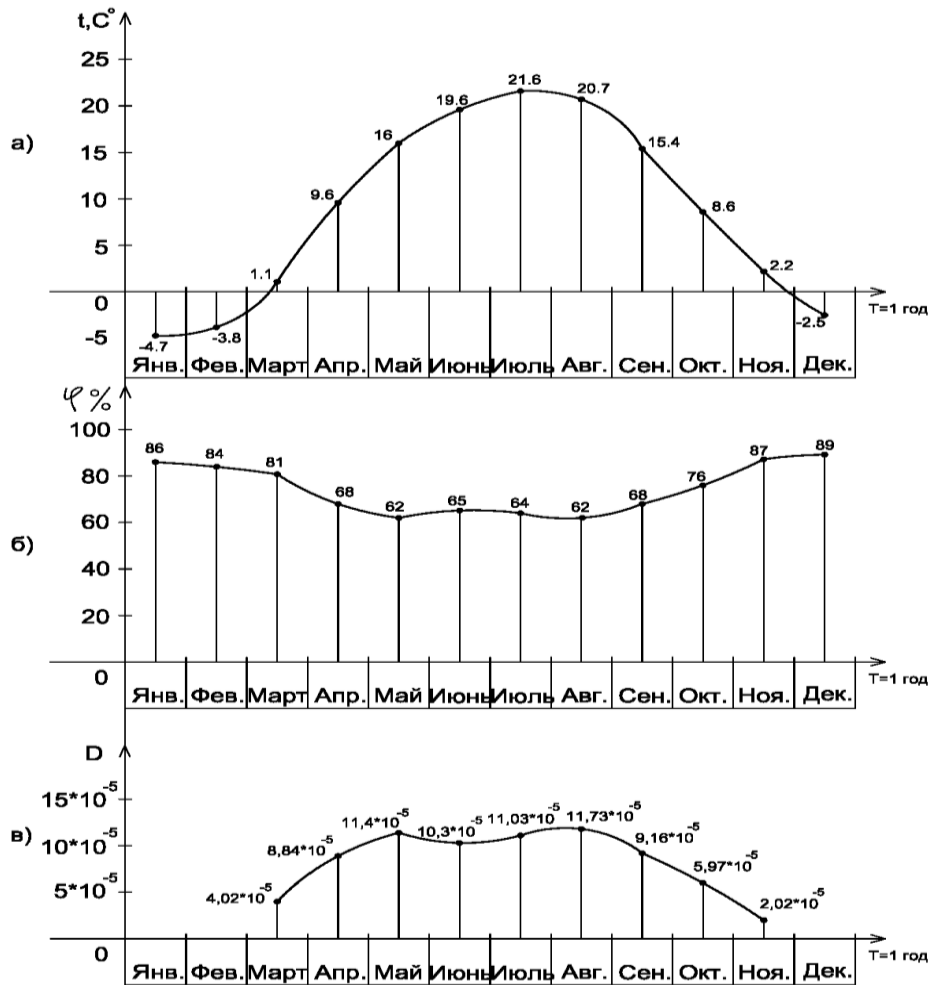


Рис. 2.6. Влияние температуры наружного воздуха и влажности на эффективный коэффициент диффузии для условий г.Днепропетровска:  
а) средняя температура наружного воздуха; б) средняя влажность;  
в) эффективный коэффициент диффузии.

Графики времени карбонизации бетона защитного слоя железобетонных конструкций для климатических условий г. Днепропетровска при расходе портландцемента в бетоне 250 и 300 кг/м<sup>3</sup> и водоцементном отношении В/Ц =0,5 приведены на рис. 2.7.



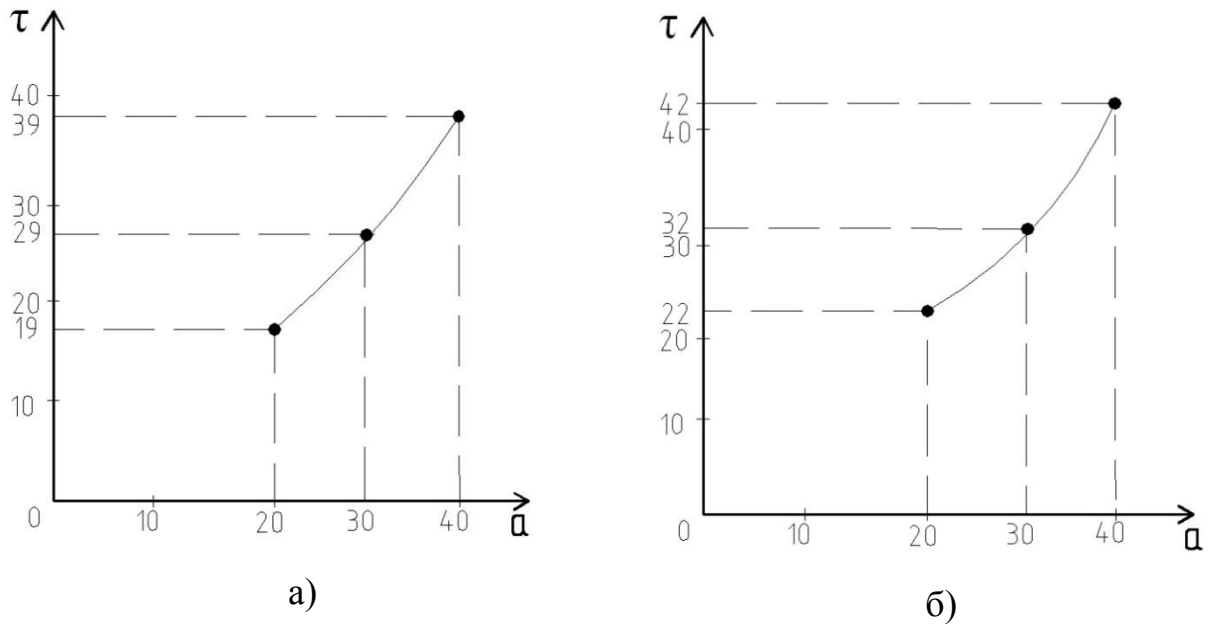


Рис. 2.7. Время карбонизации защитного слоя бетона при расходе портландцемента: а) -  $250 \text{ kg/m}^3$ , б) -  $300 \text{ kg/m}^3$ .

Как уже отмечалось при отрицательных температурах прекращается физико-химическое взаимодействие между агрессивными компонентами газовой среды с цементным камнем. Однако при этом протекает процесс расшатывания структуры бетона вследствие попеременного замораживания и оттаивания. Физические последствия такого воздействия заключаются в постепенном, по мере увеличения циклов замораживания и оттаивания насыщении структуры материала микротрещинами, которые приводят к увеличению его проницаемости.

В условиях реальной эксплуатации количество циклов попеременного замораживания и оттаивания разное в каждом году. В программном комплексе Elcat Pro.5.1 был выполнен расчет температурного воздействия на примере балконной плиты. Расчетная модель представлена в виде типовой балконной плиты ПБК-12-5а, с величиной защитного слоя 15 мм, заземленной в кирпичную стену (рис. 2.8).

Начальные данные для расчета: температура наружного воздуха  $-1^\circ\text{C}$ ; температура внутренняя в помещении  $+20^\circ\text{C}$ .

Из анализа результатов расчета на температурное воздействие установлено, что балконная плита незастекленного балкона промерзает на всю глубину уже при температуре  $-1^{\circ}\text{C}$ .

На основании результатов расчета, используя климатический мониторинг города Днепропетровска был выполнен расчет реального количества циклов замораживания и оттаивания.

Согласно информации с сайта климатического мониторинга замер температурных показателей выполнялся в 2-х метрах над грунтовым основанием.

На основе анализа статистических данных с 2001 по 2014 год по количеству циклов попеременного замораживания и оттаивания для города Днепропетровска установлено, что среднее количество циклов замораживания и оттаивания, за указанный период составляет 55 циклов в год.

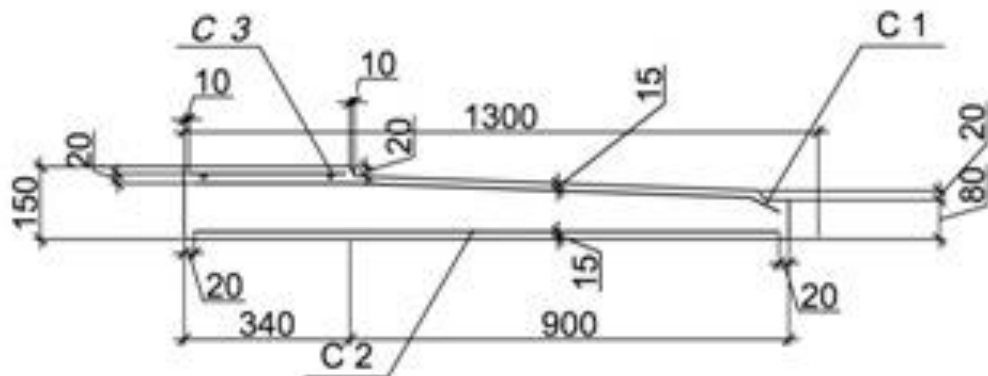
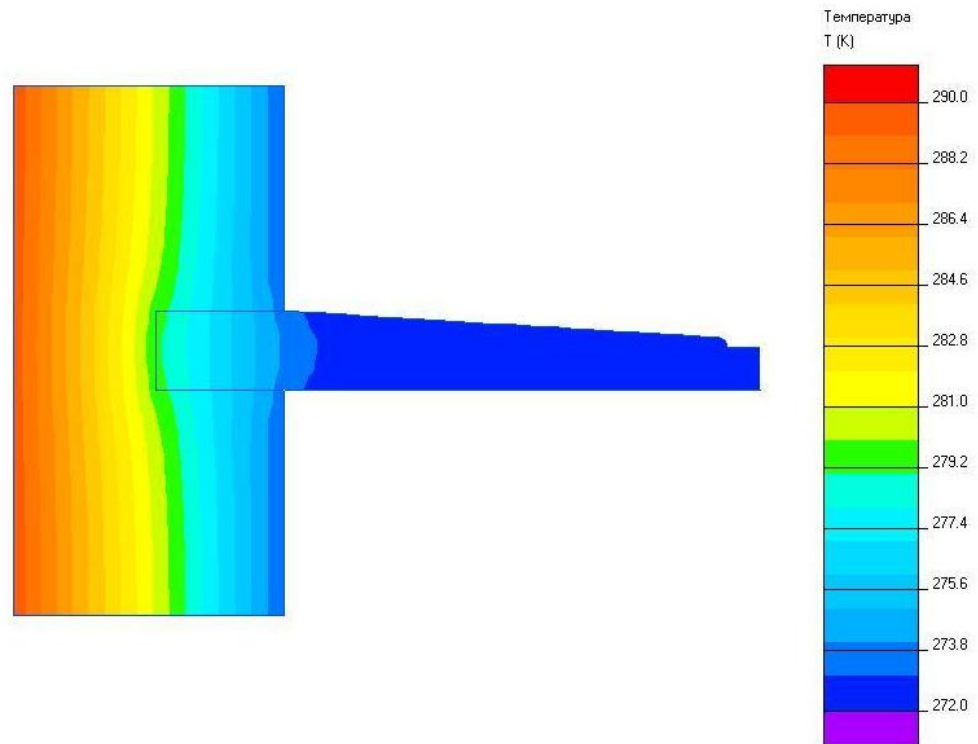


Рис. 2.8. Плита ПБК-12-5а с армированием.



\*-температура на рис. указана в градусах Кельвина

Рис. 2.9. Результаты температурного расчета плиты

В разделе 1 указано, что учитывать влияние количества циклов попеременного замораживания и оттаивания на проницаемость бетона, возможно с использованием коэффициента  $A$  (1.11), зависящего от количества циклов .

$$A = \frac{1}{(1-P)^{цк}}$$

С учетом того, что проницаемость бетона увеличивается при многократном замораживании и оттаивании то (1.11) принимает вид:

$$A_{j-1}(F) = \frac{1}{(1-P)^{Fj-1}} \quad (2.17)$$

где:  $P$  –вероятность разрушения бетона в цикле замораживания и оттаивания;

$F_{j-1}$  - количество циклов попеременного замораживания и оттаивания за время, предыдущее к рассматриваемому году.

Коэффициент  $A$  оказывает влияние на эффективный коэффициент диффузии, учитывая проницаемость бетона. Исходя из этого, выражение для расчета глубины карбонизации можно представить в виде:

$$y_{ij} = \sqrt{\frac{2A_{j-1}(F) D_{ij}(T, \varphi) C \tau_i}{m_0}} \quad (2.18)$$

где:  $A_{j-1}(F)$  – коэффициент, учитывающий влияние циклов замораживания и оттаивания за время, предыдущее к рассматриваемому году;

$D_{ij}(T, \varphi)$  – эффективный коэффициент диффузии  $\text{CO}_2$  в бетоне в  $i$  – том месяце в  $j$  –м году в зависимости от температуры и влажности наружного воздуха;

С использованием зависимости (2.18) для условий города Днепропетровска был выполнен расчет глубины карбонизации бетона с учетом морозной деструкции на примере балконной плиты с величиной защитного слоя 15мм. При этом концентрация углекислого газа в городских условиях принималась равной  $2000 \text{ мг/м}^3$ . Расчет выполнялся для бетонов с разным расходом цемента ( $\text{кг/м}^3$ ): 240, 280, 310, 340, 380 при водоцементном отношении  $V/C=0.5$ .

Графики зависимости значения коэффициента проницаемости ( $A$ ) для условий города Днепропетровска для бетонов с разным расходом цемента приведены на рис. 2.10.

На рис. 2.11-2.15 представлены результаты расчета глубины карбонизации бетона с разным расходом цемента после первого года эксплуатации, с учетом реального количества циклов попеременного замораживания и оттаивания (55 циклов).

Результаты расчета глубины карбонизации бетона до граничного цикла по морозостойкости для бетонов с различным расходом цемента представлены на рис. 2.16.

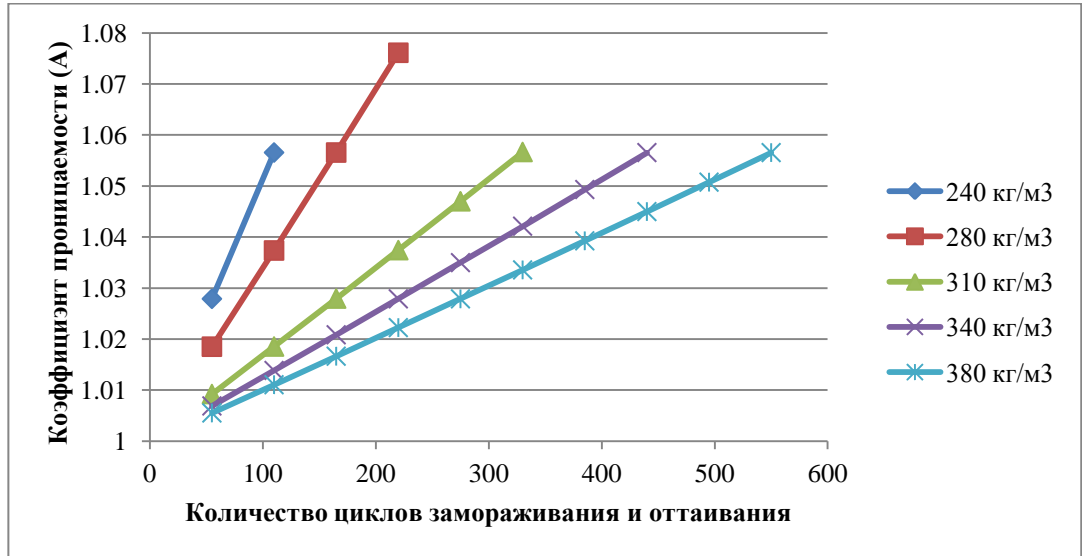


Рис. 2.10. Значение коэффициента проницаемости (A) для бетонов с разным расходом цемента.

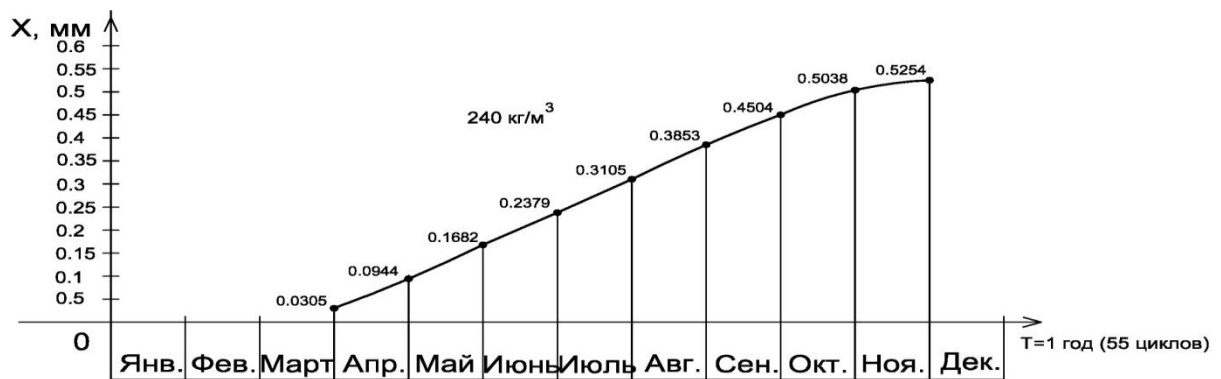


Рис. 2.11. Глубина карбонизации бетона, после первого года эксплуатации, с расходом цемента  $240 \text{ кг/м}^3$ .

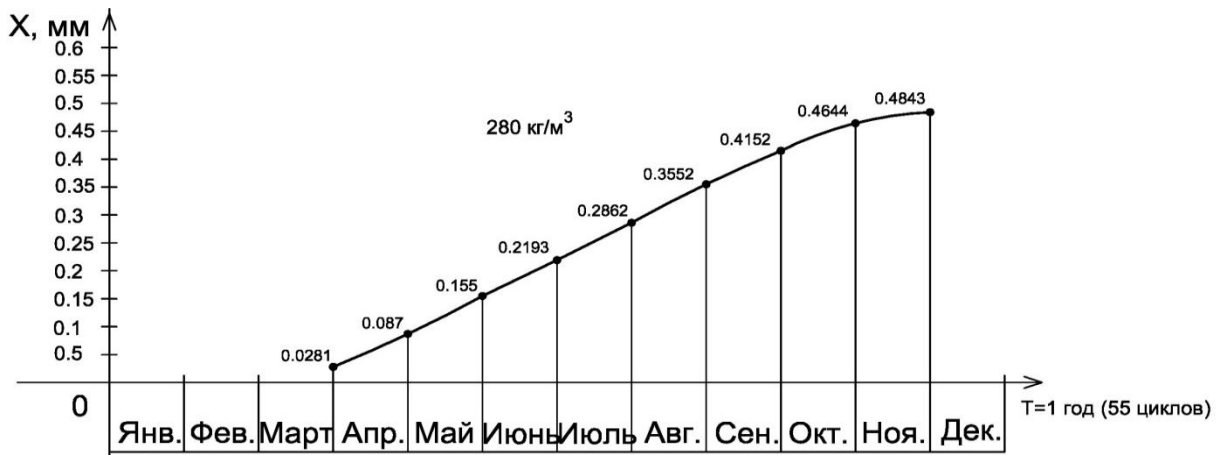


Рис. 2.12. Глубина карбонизации бетона, после первого года эксплуатации, с расходом цемента  $280 \text{ кг/м}^3$ .

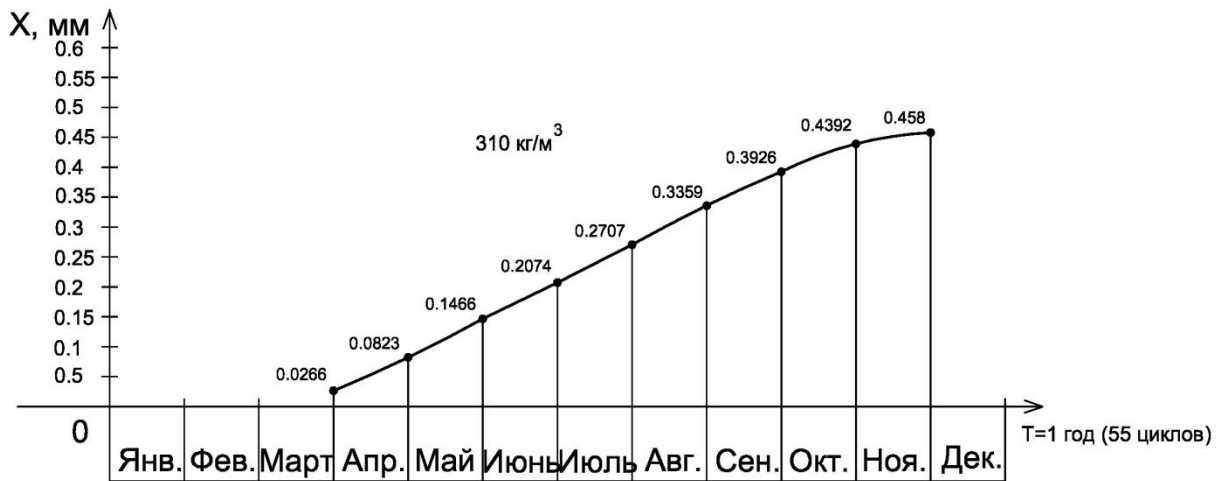


Рис. 2.13. Глубина карбонизации бетона, после первого года эксплуатации, с расходом цемента  $310 \text{ кг/м}^3$ .

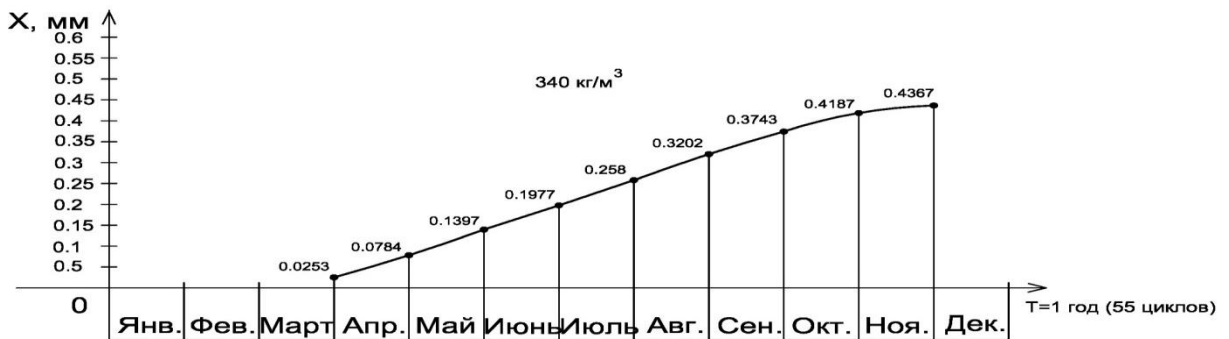


Рис. 2.14. Глубина карбонизации бетона, после первого года эксплуатации, с расходом цемента  $340 \text{ кг/м}^3$ .

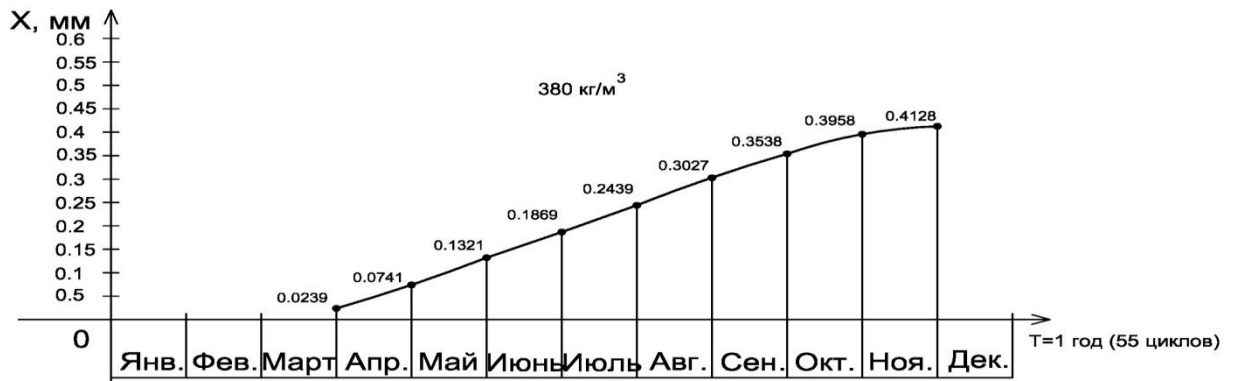


Рис. 2.15. Глубина карбонизации бетона, после первого года эксплуатации, с расходом цемента  $380 \text{ кг/м}^3$ .

По результатам расчета глубины карбонизации бетона в условиях города Днепропетровска, на примере балконной плиты ПБК12-5а выполненной по типовой серии 1.137.1-9 с защитным слоем 15 мм, был выполнен прогноз долговечности защитного слоя бетона для указанных исходных данных.

Прогноз долговечности защитного слоя бетона для балконной плиты ПБК12-5а с маркой по морозостойкости F150, маркой по водонепроницаемости W2, с расходом цемента  $280 \text{ кг/м}^3$ , в условиях города Днепропетровска составил 30,5 года см. рис. 3.30.

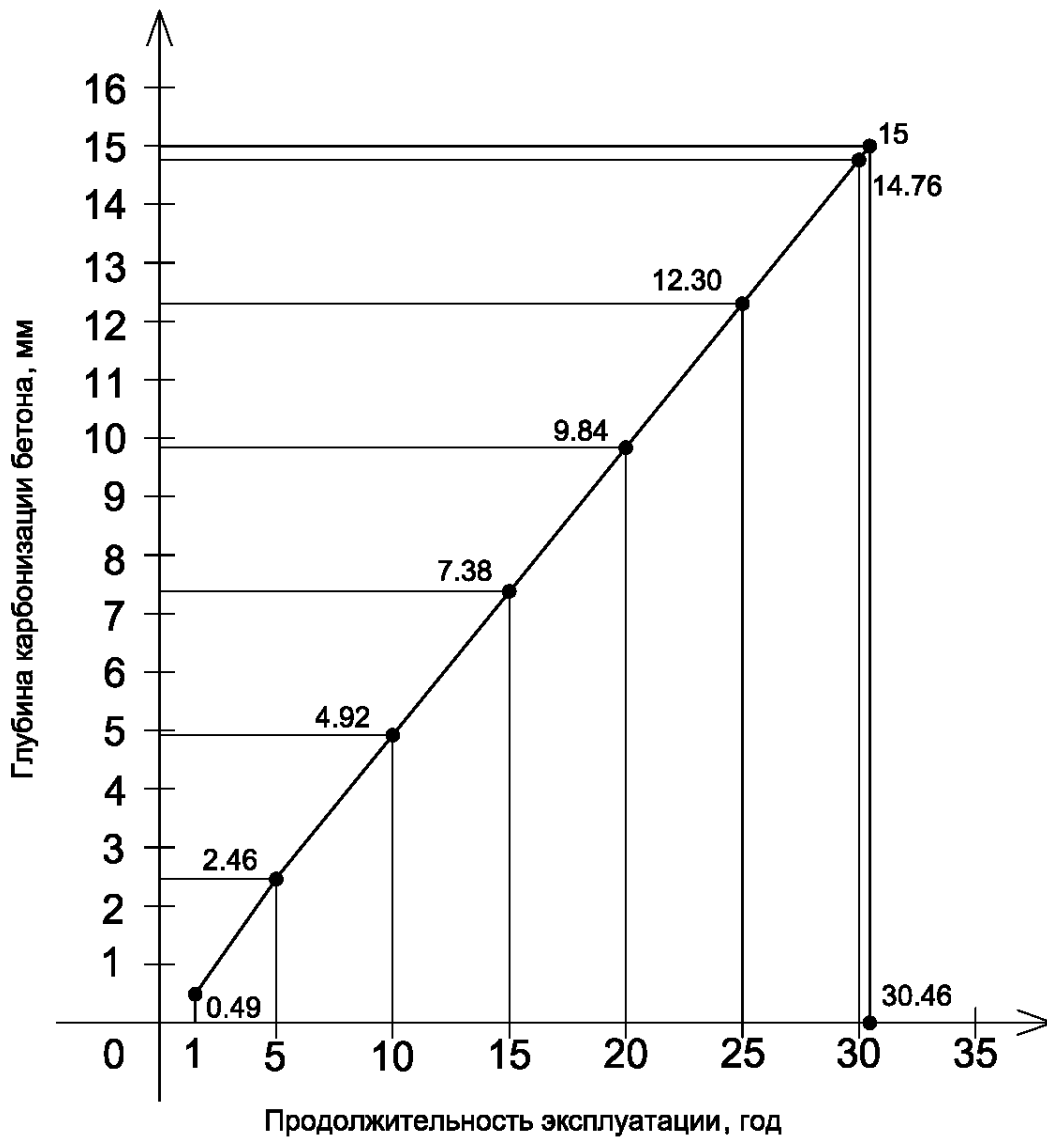


Рис. 2.17. Прогноз долговечности защитного слоя бетона для балконной плиты ПКБ12-5а.

Учитывая, что массовое строительство жилых зданий первых массовых серий осуществлялось в 60-х годах прошлого века, то за срок их эксплуатации (50 лет), согласно результатов расчета, возможно ожидать полной карбонизации бетона защитного слоя железобетонных конструкций. Поэтому существует реальная опасность начала процесса депассивации арматуры и возникновения процесса коррозии арматуры. Для подтверждения достоверности полученных зависимостей, выявления фактического состояния бетона защитного слоя и арматуры железобетонных конструкций необходимо проведение натуральных обследований.



## Выводы по разделу 2

1. Для оценки атмосферных климатических воздействий на бетон защитного слоя железобетонных конструкций проведены статистические исследования концентрации агрессивных кислых газов в воздушной среде, температуры и влажности, а также количества циклов замораживания и оттаивания бетона для условий города Днепропетровска.

2. Исходя из гипотезы о равенстве глубины нейтрализации бетона для одинаковой степени агрессивности газовой среды и имеющихся экспериментальных данных предложены зависимости для расчета эффективных коэффициентов диффузии кислых газов, вызывающих нейтрализацию бетона.

Получена зависимость для расчета реакционной емкости бетона при его карбонизации, учитывающая содержание активных добавок в цементе.

3. На основе обработки экспериментальных данных, а также обобщения теоретических представлений о процессе нейтрализации бетона и определяющих факторов внешней среды (концентрации агрессивного газа в воздушной среде, влажности, температуры, количества циклов попеременного замораживания и оттаивания) и внутренних параметров бетона (содержания цемента, относительного содержания окиси кальция в цементе, количества активных добавок, водоцементного отношения, морозостойкости бетона) получены зависимости для расчета кинетики нейтрализации бетона защитного слоя в реальных условиях атмосферных климатических воздействий.

4. Получены теоретические оценки долговечности бетона защитного слоя железобетонных конструкций различной толщины, с различным содержанием цемента и водоцементным отношением. Данные свидетельствуют о возможной нейтрализации бетона защитного слоя и депассивации арматуры до окончания нормативного срока службы железобетонных конструкций 50 лет. Для подтверждения достоверности

полученных зависимостей, выявления фактического состояния бетона защитного слоя и арматуры железобетонных конструкций в условиях атмосферных климатических воздействий необходимо проведение натурных обследований железобетонных конструкций.

## РАЗДЕЛ 3

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ БЕТОНА ЗАЩИТНОГО СЛОЯ

#### 3.1 Результаты лабораторных испытаний бетона различного возраста

##### 3.1.1 Характеристики бетона

Для проверки адекватности расчетных зависимостей процесса карбонизации бетона были проведены лабораторные испытания на специально отобранных образцах, возраст которых составлял 7 и 23 года. Образцы представляют собой цилиндры с высотой и диаметром 150мм.

В процессе испытаний определялись такие параметры как:

- показатели проницаемости бетона ускоренным методом;
- прочность образцов неразрушающим методом;
- прочность образцов разрушающим методом.
- глубина карбонизации бетона.

Образцы в возрасте 7-ми лет были отобраны в количестве 14 цилиндров, которые изготавливались в 2004 году и хранились в лаборатории железобетонных конструкций при относительной влажности воздуха  $65\pm 10\%$  (рис. 3.1).

Образцы в возрасте 23 года были отобраны в количестве 8 шт, которые изготавливались в 1988 году и хранились в лаборатории железобетонных конструкций при относительной влажности воздуха  $85\pm 10\%$  (рис. 3.2). В отличие от бетона с возрастом 7-ми лет, на бетон в возрасте 23 лет имелись сведения о составе бетонной смеси, водоцементном отношении, а также прочности бетона через 28, 90, 180 суток (табл. 3.1).



Рис. 3.1 Контрольные образцы бетона в возрасте 7-ми лет



Рис. 3.2. Контрольные образцы бетона в возрасте 23-лет.

Таблица 3.1

**Исходные данные по цилиндрам 23-х летнего возраста**

№ обр	№ сер	Дата Изг.	Ц, кг/м <sup>3</sup>	В/Ц	R <sub>28</sub> МПа	R <sub>90</sub> МПа	R <sub>180</sub> МПа
1	384	10.06.86	285	0,595	-	-	-
2	383	09.06.86	283	0,57	28,8	34,5	36,4
3	384	10.06.86	285	0,595	-	-	-
4	379	-	-	-	30,7	35,6	-
5	377	29.05.86	275	0,62	30,7	36,7	-
6	387	-	-	-	-	-	-
7	386	10.07.86	277	0,55	-	-	35,8
8	386	10.07.86	277	0,55	-	-	35,8

**3.1.2 Определение водонепроницаемости контрольных образцов**

Для определения водонепроницаемости бетона контрольных образцов использовался прибор «Агама» [21] (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Прибор «Агама».

*Методика проведения испытания.*

1) Нижняя поверхность цилиндра защищается от пленки цементного теста металлической щеткой или другим инструментом.

2) Герметизирующая мастика очищается от инородных включений, (кусочков бетона), и из неё раскатывается жгут диаметром 6-8 мм и длиной, равной периметру фланца камеры, взятому по средней линии.

3) Жгут мастики укладывается на фланец камеры, и концы его соединяются. Камера фланцем устанавливается на середину нижней поверхности образца и прижимается к ней таким образом, чтобы мастика распределилась по всей площади фланца.

4) Ручной насос устанавливают на штуцер клапана камеры вакуумметра, открывают кран клапана против часовой стрелки, затем выкачивают воздух из камеры до достижения разряжения в камере 0,8-0,9 кг/см<sup>2</sup>. После чего закрывают кран клапана и снимают насос со штуцера клапана устройства. Когда разряжение в камере упадет до 0,7 кг/см<sup>2</sup>, включить секундомер и определить время, за которое разряжение упадет до 0,65 кг/см<sup>2</sup>.

5) Полученные значения времени сверяют в соответствии с табл.3.2.

*Результаты испытаний.*

В соответствии с ГОСТ 12730.5-84 на каждом из образцов было проведено по три контрольных замера, после чего определялось среднее арифметическое. Полученные результаты испытаний водонепроницаемости бетона приведены представлены в табл. 3.3 и табл. 3.4.

Таблица 3.2

Время падения разряжения от $P_0=0,7$ до $P_t=0,66$ кг/м <sup>2</sup> тс, с	Скорость фильтрации воздуха, «а», см <sup>3</sup> /с	Марка бетона по водонепроницаемости, W.
26-28	0,325-0,224	2
38-55	0,223-0,154	4
56-81	0,153-0,106	6
81-117	0,105-0,0728	8
117-167	0,0727-0,051	10
168-248	0,0509-0,0345	12
248-359	0,0344-0,0238	14
360-521	0,0237-0,0164	16
524-756	0,0163-0,0113	18
763-1109	0,0112-0,0077	20

Таблица 3.3

**Сводная таблица полученных результатов испытаний  
водонепроницаемости бетона возрастом 7 лет**

№обр.	№сер.	Контрольные замеры (сек).			Марка бетона по водонепроницаемости	Скорость фильтрации воздуха, см <sup>3</sup> /с
		1-й	2-й	3-й		
1	10.04	63	67	60	W6	0,153-0,106
2	10.04	67	72	69	W6	0,153-0,106
3	10.04	21	21	24	W2	0,325-0,224
4	10.04	42	38	44	W4	0,223-0,154
5	10.05	12	10	10	W0	>0,325-0,224
6	10.05	14	16	16	W0	>0,325-0,224
7	10.05	14	16	16	W0	>0,325-0,224
8	10.05	8	7	5	W0	>0,325-0,224
9	10.05	11	11	12	W0	>0,325-0,224
10	06.03	142	148	146	W10	0,0727-0,051
11	06.03	140	138	144	W10	0,0727-0,051
12	06.03	64	62	69	W6	0,153-0,106
13	10.10	8	10	11	W0	>0,325-0,224
14	10.10	15	17	19	W0	>0,325-0,224

Таблица 3.4

**Сводная таблица полученных результатов испытаний  
водонепроницаемости бетона возрастом 23 года**

№обр.	№сер.	Контрольные замеры (сек).			Марка бетона по водонепро- ницаемости	Скорость фильтрации воздуха, см <sup>3</sup> /с
		1-й	2-й	3-й		
1	384	46	45	42	W4	0,223-0,154
2	383	44	42	46	W4	0,223-0,154
3	383	22	20	24	W2	0,325-0,224
4	379	8	9	8	W0	>0,325-0,224
5	377	11	9	10	W0	>0,325-0,224
6	387	68	71	70	W6	0,153-0,106
7	386	28	29	26	W2	0,325-0,224
8	386	113	111	114	W8	0,105-0,0728

Для дальнейших испытаний было отобрано по одному образцу разной марки по водонепроницаемости (образцы под номерами 2, 3, 4, 6, 8, всего 5 цилиндров). В дальнейшем принимаем, что образец 2 – 4, 3 – 2, 6 – 1, 8 – 5, 4 – 3.

Так как образцы № 2, 3, 5 на испытаниях по определению водонепроницаемости показали одинаковую марку с другими образцами, то в дальнейшем они использоваться не будут. В дальнейшем принимаем, что образец 1-4, 2-7, 3-1, 4-6, 5-8. Всего 5 цилиндров.

### 3.1.3 Определение прочности бетона на сжатие

Для определения прочности бетона неразрушающим методом использовался прибор Оникс 2.4 [18].

#### *Методика проведения испытания*

- 1) Перед началом испытаний контрольные образцы в местах предположительных ударов тщательно зачищают.
- 2) Образец устанавливают на плоскую поверхность, после чего наносят запрограммированное количество ударов от 1 до 10. После



последнего запрограммированного удара прибор автоматически показывает среднее значение.

### *Результаты испытаний*

Полученные результаты испытаний прочности бетона представлены в табл. 3.5 и табл. 3.6.

*Таблица 3.5*

### **Сводная таблица полученных результатов испытаний прочности бетона образцов возрастом 7 лет**

№	№сер.	Прочность неразрушающим методом (мПа)	Марка бетона по водонепроницаемо сти	Скорость фильтрации воздуха, см <sup>3</sup> /с
1	6	18.3	W0	>0,325-0,224
2	3	20.2	W2	0,325-0,224
3	4	34.6	W4	0,223-0,154
4	2	47.3	W6	0,153-0,106
5	8	59.7	W10	0,0727-0,051

*Таблица 3.6*

### **Сводная таблица полученных результатов испытаний прочности бетона образцов возрастом 23 года**

№	№сер	Прочность неразрушающим методом(мПа)	Марка бетона по водонепроницаемости	Скорость фильтрации воздуха, см <sup>3</sup> /с
1	4	27.8	W0	>0,325-0,224
2	7	33.4	W2	0,325-0,224
3	1	35.1	W4	0,223-0,154
4	6	38.8	W6	0,153-0,106
5	8	40.6	W8	0,105-0,0728

Определение прочности бетона разрушающим методом проводилось с использованием гидравлического пресса.

*Методика проведения испытания*

1) Образцы тщательно зачищают наждачным камнем по двум плоским сторонам. Излишек раствора срезают вровень с краями и заглаживают поверхность.

2) Перед испытанием на сжатие измеряют линейные размеры образцов штангенциркулем с погрешностью до 0,1мм и определяют площадь рабочего сечения образца.

$$S = \frac{\pi d^2}{4}, \text{ см}^2 \quad (3.1)$$

3) Образец устанавливают на нижнюю плиту прессы центрально относительно его оси.

4) Нагрузка должна возрастать непрерывно с постоянной скоростью в пределах 0,6–0,4 МПа/с до его разрушения.

5) Величину прочности на сжатие R определяют по формуле:

$$R = \frac{P}{S}, \text{ Н / см}^2 \quad (3.2)$$

где: P – разрушающая нагрузка, Н;

S – площадь рабочего сечения образца, см<sup>2</sup>.

Результаты испытаний прочности бетона в сопоставлении с другими характеристиками представлены в табл. 3.7 и 3.8.

*Таблица 3.7*

**Сводная таблица результатов испытаний образцов бетона возрастом 7 лет**

№	№сер	Прочность неразрушающим методом(МПа)	Прочность разрушающим методом(МПа)	Марка бетона по водонепроницаемос ти	Скорость фильтрации воздуха, см <sup>3</sup> /с
1	6	18.3	21.68	W0	>0,325-0,224
2	3	20.2	25.64	W2	0,325-0,224
3	4	29.6	26.27	W4	0,223-0,154
4	2	34.3	27.06	W6	0,153-0,106
5	8	39.7	29.15	W10	0,0727-0,051

Таблица 3.8

**Сводная таблица полученных результатов испытаний образцов бетона  
возрастом 23 года**

№	№сер	Прочность неразрушающ им методом (мПа)	Прочность разрушающим методом(мПа)	Марка бетона по водонепроницаемост и	Скорость фильтрации воздуха, см <sup>3</sup> /с
1	4	27.8	25.87	W0	>0,325-0,224
2	7	33.4	29.44	W2	0,325-0,224
3	1	35.1	32.60	W4	0,223-0,154
4	6	38.8	34.30	W6	0,153-0,106
5	8	40.6	39.37	W8	0,105-0,0728

На основании полученных результатов по определению прочности контрольных образцов построены графики зависимости водонепроницаемости бетона от прочности (рис 3.4, 3.5).

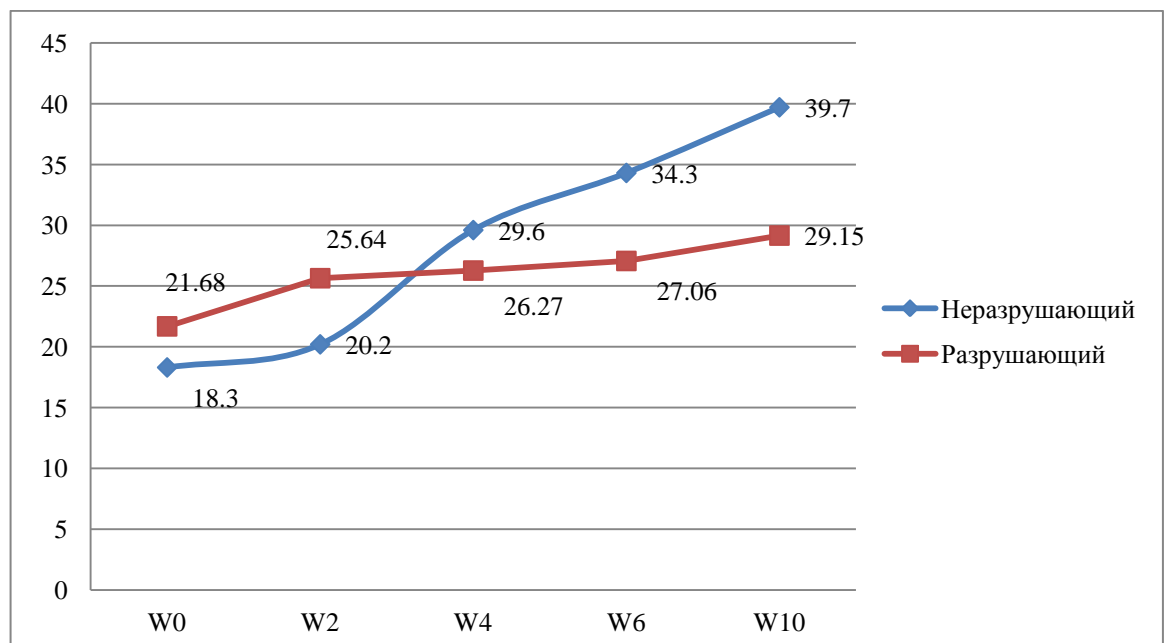


Рис. 3.4. График зависимости водонепроницаемости бетона в возрасте 7-ми лет от прочности на сжатие.

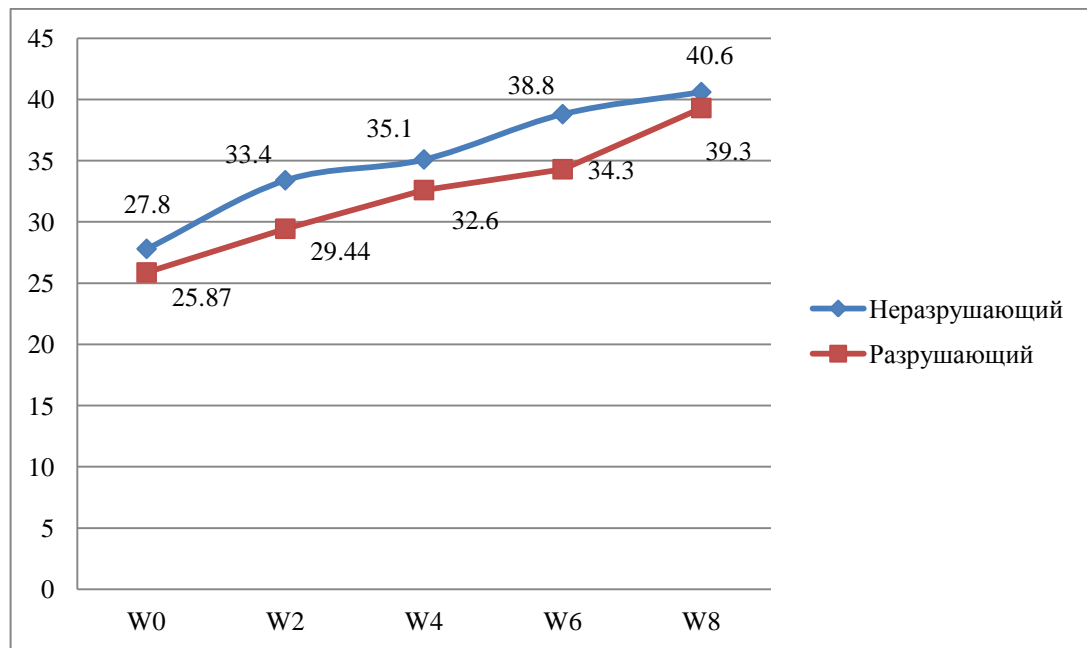


Рис. 3.5. График зависимости водонепроницаемости бетона в возрасте 23-х лет от прочности на сжатие.

Для определения глубины карбонизации бетона использовались следующие приборы и оборудование:

Раствор фенолфталеина спиртовой 1% [58]; пипетка; молоток; зубило; штангенциркуль.

*Методика проведения испытания.*

- 1) На контрольном образце с помощью молотка и зубила производится скол по всей длине.
- 2) Оценка производится путем обработки свежего скола бетона индикаторами рН. 1-% спиртовой раствор фенолфталеина изменяет цвет от бесцветного (рН=9,3) до малинового (рН=10,5).
- 3) Через минуту после нанесения фенолфталеина измеряют штангенциркулем с точностью до 0,5 мм расстояние от поверхности образца до грани ярко окрашенной зоны, в направлении перпендикулярном к поверхности образца.

4) Измеренная величина является глубиной карбонизации бетона. Подобная технология применялась при определении глубины карбонизации на плитах и балках балконов.

*Результаты испытаний.*

Так как водонепроницаемость, которая измерялась исключительно по нижней поверхности обследуемого цилиндра, является одним из основных параметров бетона влияющих на глубину карбонизации, то за основу были приняты результаты полученные при замере глубины карбонизации от нижней поверхности цилиндра до грани ярко окрашенной зоны (рис 3.8).



Рис. 3.6. Определение глубины карбонизации путем нанесения 1% раствора фенолфталеина.

Полученные результаты испытаний глубины карбонизации бетона представлены в табл. 3.9 и табл. 3.10.

Таблица 3.9

**Результаты определения глубины карбонизации бетона на образцах  
возрастом 7 лет**

№	№ сер	Прочность неразрушающим методом (МПа)	Прочность разрушающим методом (МПа)	Марка бетона по водонепроницаемости	Скорость фильтрации воздуха, см <sup>3</sup> /с	Глубина карбонизации, мм
1	6	18.3	21.68	W0	>0,325-0,224	40
2	3	20.2	25.64	W2	0,325-0,224	31
3	4	34.6	26.27	W4	0,223-0,154	21
4	2	47.3	27.06	W6	0,153-0,106	16
5	8	59.7	29.15	W10	0,0727-0,051	7

Таблица 3.10

**Результаты определения глубины карбонизации бетона на образцах  
возрастом 23 года**

№	№ сер	Прочность неразрушающим методом (МПа)	Прочность разрушающим методом (МПа)	Марка бетона по водонепроницаемости	Скорость фильтрации и воздуха, см <sup>3</sup> /с	Глубина карбонизации, мм
1	4	27.8	25.87	W0	>0,325-0,224	23
2	7	33.4	29.44	W2	0,325-0,224	17
3	1	35.1	32.60	W4	0,223-0,154	15
4	6	38.8	34.30	W6	0,153-0,106	13
5	8	40.6	39.37	W8	0,105-0,0728	6

По данным полученным в ходе испытаний построены графики зависимости между водонепроницаемостью и глубиной карбонизации бетона (рис 3.7).

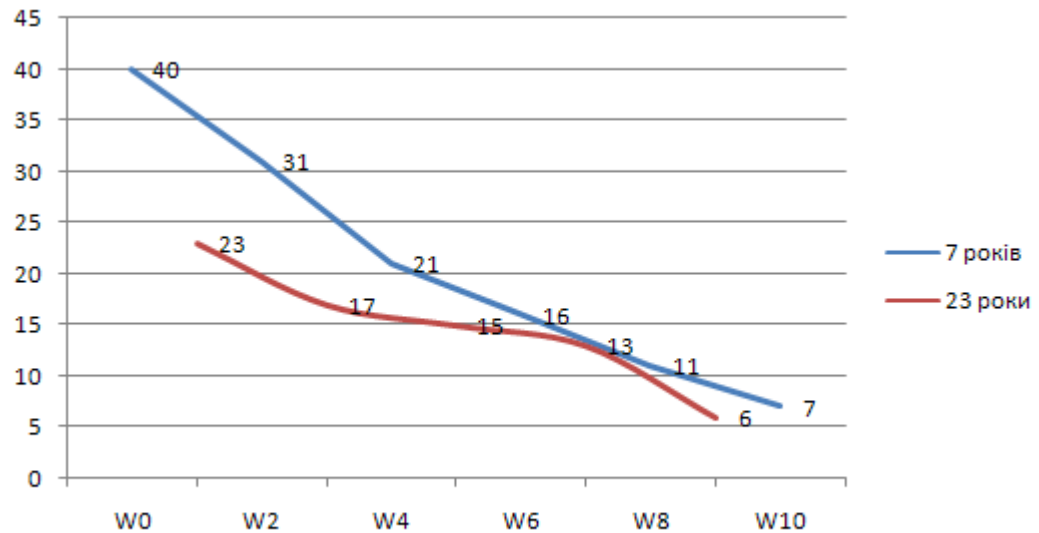


Рис. 3.7. Графики зависимости глубины карбонизации бетона от водонепроницаемости.

Данные свидетельствуют, что глубина карбонизации бетона в возрасте 7-ми лет больше, чем у бетона в возрасте 23-х лет. Это может быть объяснено несколькими факторами:

- 1) Отсутствием данных о составе бетонной смеси.
- 2) Условия хранения образцов 7-ми и 23-х лет были разными, если образцы 23-х лет хранились в помещении с относительной влажностью 90-100%, то образцы 7-ми лет хранились в помещении с относительной влажностью  $65 \pm 10\%$ . Из раздела 1.1 известно, что карбонизация в сухой среде проходит в интенсивнее, чем во влажной среде.

### 3.1.4 Определение глубины карбонизации бетона

Далее была проведена проверка адекватности зависимости для определения глубины нейтрализации бетона в возрасте 23 года, так как для

этих образцов имеются все исходные данные о составе бетона. Данные по расходу цемента и водоцементному отношению представлены в табл. 3.11. Расчет выполнен для 5 разных образцов. Так как единого мнения по показателю степени  $n$  нет (см. раздел 1.3), то вычисления выполнялись для двух случаев  $n=2$ ,  $n=3$  (нумерация образцов остается такой же как и при лабораторных испытаниях).

Для данного случая интегральный параметр  $K$  не являлся константой, так как свойства бетона для всех образцов были разными. Поэтому расчет осуществлялся по формуле 1. 6 (нумерация образцов остается такой же, как и при лабораторных испытаниях).

Таблица 3.11

**Расчетные данные для образцов 23-х лет**

№ обр.	W	Ц	В/Ц
1	0	275	0,62
2	2	277	0,55
3	4	285	0,595
4	6	277	0,55
5	8	277	0,55

Реакционная способность бетона рассчитывается по формуле (2.14).

Эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в карбонизированном бетоне определялся по (1.13).

Из раздела 2.1 известно, что период карбонизации для г. Днепропетровска составляет 9,4 мес./год.

Полученные результаты представлены в табл. 3.12.



Таблица 3.12

## Сводная таблица полученных результатов

№ обр.	W	Ц	В/Ц	X нат. исп.	X <sub>n=2</sub>	X <sub>n=3</sub>
1	0	275	0,62	23	24	18
2	2	277	0,55	17	17	14
3	4	285	0,595	15	20	16
4	6	277	0,55	13	17	14
5	8	277	0,55	6	17	14

Для сравнения полученных результатов по определению глубины карбонизации, был построен график (рис 3.7).

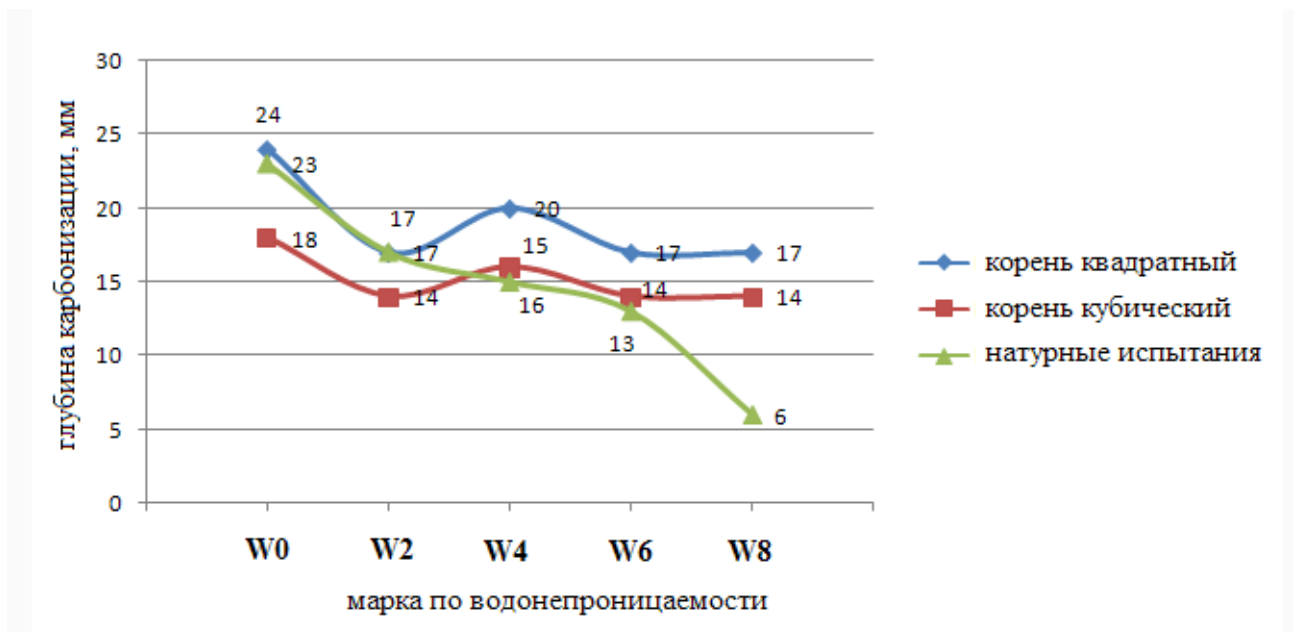


Рис 3.7. Расчетные и экспериментальные данные по определению глубины карбонизации бетона в возрасте 23 лет.

Полученные данные табл. 3.12 подтверждают применимость функции (1.6) с показателем степени  $n=2$  для бетонов высокой проницаемости. Определение долговечности бетона защитного слоя из бетонов марок по водонепроницаемости W6 и выше, целесообразно осуществлять с применением функции вида (1.6) с показателем степени  $n=3$ .

### **3.2 Экспериментальное определение глубины и расчет времени карбонизации бетона**

По обращению Днепропетровского областного объединения профсоюзов была выполнена работа по определению срока службы строительных конструкций здания, расположенного по адресу г. Днепропетровск, пр. К. Маркса, 93.

Здание «Дома Союзов» представляет собой пятиэтажное здание с подвалом. Общий вид представлен на рис. 3.11. Стены здания выполнены из керамического кирпича на цементно-песчаном растворе. Стены подвала выполнены из фундаментных блоков и кирпича (рис. 3.12, 3.13, 3.14). Перекрытия выполнены из сборных железобетонных плит.



Рис. 3.8 Общий вид здания



Рис. 3.9 Общий вид средней продольной стены подвала и плит перекрытия

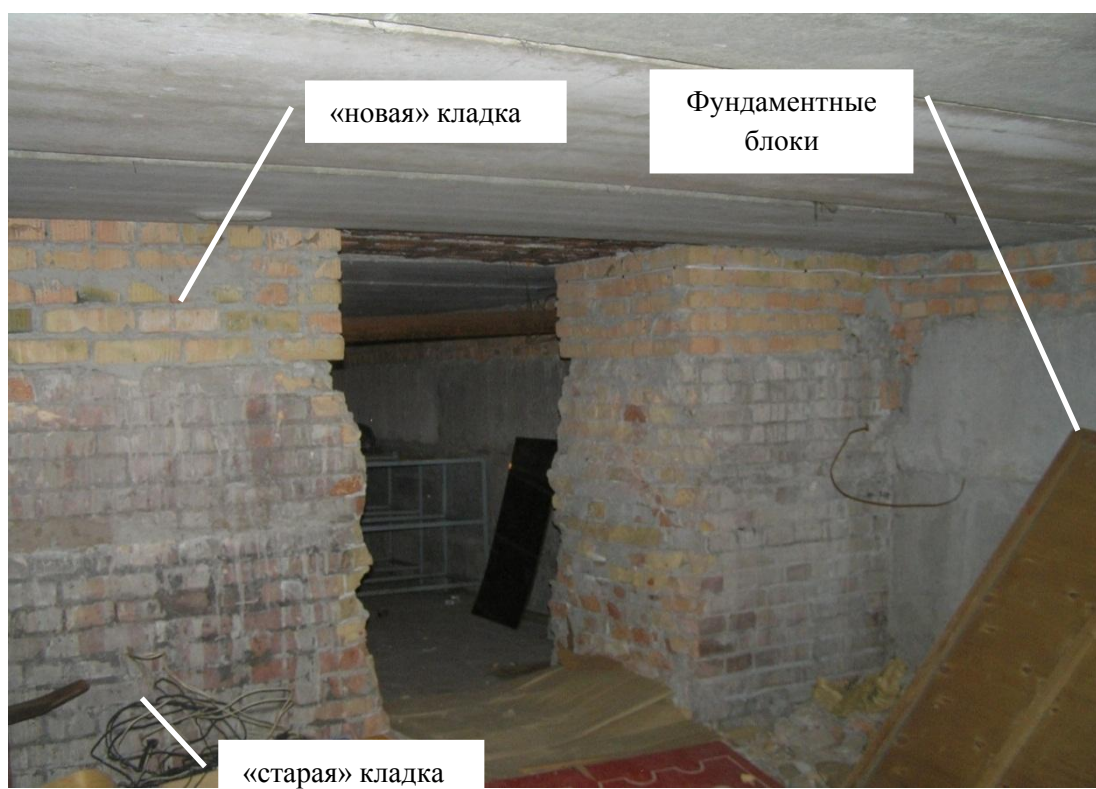


Рис. 3.10 Общий вид средней поперечной стены подвала и плит перекрытия





Рис. 3.11 Общий вид крайней продольной стены подвала и плит перекрытия

Для определения срока службы здания «Дома Союзов» использовалась методика расчета времени карбонизации бетона, описанная в разделе 2.

Натурным осмотром здания установлено, что наружные стены, выполнены из керамического кирпича на цементно-известково-песчаном растворе. Визуальное обследование свидетельствует о том, что в подвале до уровня 1,8м стены выполнены из кладки более раннего срока строительства. Ее внешний вид свидетельствует о том, что эта кладка достаточно «старая» (рис. 3.12, 3.13, 3.14). Выше этой кладки наблюдается кладка более позднего периода. В некоторых местах установлены сборные фундаментные блоки (см. рис.3.13). На «новую» кладку опираются сборные железобетонные плиты перекрытий. Следует отметить, что производство сборных ж/б изделий было налажено в Украине в 60-е годы прошлого столетия. Поэтому предположительный максимальный возраст стен подвала, перекрытий и соответственно вышележащих конструкций здания составляет не более 40 лет.

Отбор проб осуществлялся методом откалывания угловых участков при помощи молотка (рис.3.12). В кирпичной кладке стен, для определения глубины карбонизации кладочного раствора использовались образцы – керны, выбуренные из «старой» и «новой» кладки (рис. 3.15, 3,18).

Глубина нейтрализации бетона определяется колориметрическим способом, основанным на изменении цвета органических индикаторов в зависимости от величины водородного показателя. Оценка производится путем обработки свежего скола бетона индикаторами рН. 1-% спиртовой раствор фенолфталеина изменяет цвет от бесцветного (рН=9,3) до малинового (рН=10,5). Через минуту после нанесения раствора индикатора линейкой с точностью до 1 мм измеряют глубину нейтрализации бетона.

Для контроля методики определения глубины нейтрализации фенолфталеин наносился на образцы из бетона раннего возраста (куб с размерами граней 10x10x10 см, возраст - 1 год с момента изготовления, хранение в помещении лаборатории), на образцы из бетона старого возраста – керны из бетона, отобранного при обследовании Лоцманского тоннеля (строительство тоннеля было закончено в 1928 году), на свежий скол образца – керна из цементно-песчаного раствора кладки здания Дома Союзов (рис. 3.15), а также на свежие сколы бетона фундаментных блоков и кладки наружных стен.

Кроме того, у отобранных образцов раствора и бетона определялось водопоглощение по стандартным методикам. Водопоглощение цементно-песчаного раствора составило 15.8%, а бетона из фундаментных блоков – 4,7%.

Исходя из данных, приведенных в табл. 3.1, водоцементное отношение бетона составляет не менее 0,55, а раствора – не менее 0,6. Расход цемента в бетоне фундаментных блоков составляет 400 кг/куб. м, а в растворе – 100 кг/куб.м.

Таблица 3.13

## Показатели проницаемости бетона

Условные обозначения показателя проницаемости и бетона	Прямые		Косвенные	
	Марка бетона по водонепроницаемости	Коэффициент фильтрации, см/с (при равновесной влажности)	Водопоглощение, %	Водоцементное отношение В/Ц, не более
Н – нормальной проницаемости	W4	$(2...7) \cdot 10^{-9}$	4,7...5,7	0,60
П – пониженной проницаемости	W6	$2 \cdot 10^{-9}$ $...6 \cdot 10^{-10}$	4,2...4,7	0,55
О – особо-низкой проницаемости W 8	W8	$(1...6) \cdot 10^{-10}$	До 4,2	0,45

Глубина карбонизации бетона фундаментных блоков по данным измерений составила 20 мм. Глубина карбонизации раствора «старой» кладки составила более 60 мм, а «новой» – 35 мм.



Рис. 3.12. Угловой участок фундаментного блока с отобранным образцом для определения глубины карбонизации





Рис. 3.13. Участок «новой» стены в месте отбора образца



Рис. 3.14. Участок «старой» стены в месте отбора образца



Рис. 3.15. Образцы – керны, выбуренные из стены с кладочным раствором для определения глубины нейтрализации



Рис. 3.16. Образцы бетона и раствора с нанесенным индикатором фенолфталеином

Испытание 1. Определяем срок службы слоя карбонизированного бетона фундаментных блоков, размером 20 мм. Конструкция изготовлена из бетона с расходом портландцемента 400 кг/м при  $V/C = 0,55$  и эксплуатируется в среде с концентрацией углекислого газа  $C_0 = 0,03\%$  при



относительной влажности воздуха  $\varphi = 60\%$

Решение. По формуле (1.13) определяем значение эффективного коэффициента диффузии:

$$D = 10^{-4} \cdot 10^{(B/C - 0,4)/0,27} = 10^{-4} \cdot 10^{(0,55 - 0,4)/0,27} = 3,60 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}.$$

Используя зависимость (2.14), находим реакционную емкость бетона:

$$m_0 = 0,144C = 0,144 \cdot 400 = 57,6 \text{ кг/м}^3.$$

Срок службы защитного слоя бетона вычисляем по формуле:

$$t = \frac{m_0 x^2}{2DC_0} = \frac{57,6 \cdot 2^2}{2 \cdot 3,60 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0003 \cdot 286 \cdot 24 \cdot 3600} = 43,12 \text{ год}.$$

Испытание 2. Определяем срок службы слоя карбонизированного раствора, глубиной 50 мм. Конструкция изготовлена из раствора с расходом портландцемента 100 кг/м при В/Ц = 0,6 и эксплуатируется в среде с концентрацией углекислого газа  $C_0 = 0,03\%$  при относительной влажности воздуха  $\varphi = 60\%$

Решение. По формуле (1.13) определяем значение эффективного коэффициента диффузии:

$$D = 10^{-4} \cdot 10^{(B/C - 0,4)/0,27} = 10^{-4} \cdot 10^{(0,6 - 0,4)/0,27} = 5,50 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}.$$

Используя зависимость (2.14), находим реакционную емкость раствора:

$$m_0 = 0,144C = 0,144 \cdot 100 = 14,4 \text{ кг/м}^3.$$

Срок службы карбонизированного раствора вычисляем по формуле:

$$t = \frac{m_0 x^2}{2DC_0} = \frac{14,4 \cdot 6^2}{2 \cdot 5,50 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0003 \cdot 286 \cdot 24 \cdot 3600} = 64,42 \text{ год}.$$

Испытание 3. Определяем срок службы слоя карбонизированного раствора, глубиной 35 мм. Конструкция изготовлена из раствора с расходом портландцемента 100 кг/м<sup>3</sup> при В/Ц = 0,6 и эксплуатируется в среде с концентрацией углекислого газа  $C_0 = 0,03\%$  при относительной влажности воздуха  $\varphi = 60\%$

Решение. По формуле (1.13) определяем значение эффективного коэффициента диффузии:

$$D = 10^{-4} \cdot 10^{(B/C - 0,4)/0,27} = 10^{-4} \cdot 10^{(0,6 - 0,4)/0,27} = 5,50 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}.$$

Используя зависимость (2.14), находим реакционную емкость раствора:

$$m_0 = 0,144Ц = 0,144 \cdot 100 = 14,4 \text{ кг/м}^3.$$

Срок службы карбонизированного раствора вычисляем по формуле:

$$t = \frac{m_0 x^2}{2DC_0} = \frac{14,4 \cdot 3,5^2}{2 \cdot 5,50 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0003 \cdot 286 \cdot 24 \cdot 3600} = 22,4 \text{ год}.$$

По результатам выполненных инструментальных исследований, химического анализа и расчетов возраст конструкций здания по пр. К, Маркса, 93 составляет около 25-40 лет.

### **3.3 Экспериментальные исследования кинетики нейтрализации бетона защитного слоя в натуральных условиях атмосферных климатических воздействий г. Днепропетровска**

#### **3.3.1 Общие сведения и характеристика обследуемых железобетонных конструкций**

По обращению ЖЕК Приднепровского района города Днепропетровска было выполнено комплексное обследование железобетонных конструкций балконных плит. Обследование проводилось по указанным адресам.

Жилой массив Приднепровск является одним из самых загрязненных районов, вследствие воздействия выбросов Приднепровской ГЭС.

За период проведения натуральных обследований было исследовано более 400 балконов.

На основании предварительного (рекогносцировочного) обследования было установлено, что по конструктивным признакам балконов и месторасположению жилых домов их можно разделить на 2 следующие группы:

1-я группа – ж/м Приднепровск: ул. 60 лет Октября, ул. Космонавта Волкова, ул. Станиславского, ул. Кольская, ул. Таманская, ул. Рассветная, ул. Электрическая;

2-я группа – ж/м Приднепровск, ул. Вознюка, ул. Роторная д.23а, ул. 20 лет Победы, д.1.

Жилые дома расположенные по ул. 60 лет Октября, ул. Космонавта Волкова, ул. Станиславского, ул. Кольская, ул. Таманская, ул. Рассветная, ул. Электрическая были построены в 50-е года. Расположение жилых домов представлено на рис. 3.17. Они представляют собой двухэтажные или трехэтажные здания (рис 3.18). Конструктивная схема – перекрестно-стенная, с несущими продольными и поперечными стенами. Фундаменты бетонные, ленточные. Наружные стены толщиной 400 мм выполнены из шлакоблоков. Снаружи по фасадам устроены балконы.

Конструкция балконов в этих домах состоит из двух сборных консольных железобетонных балок и трех сборных железобетонных плит, которые опираются на эти балки рис. 3.19. Балки защемлены в стенах жилых домов и имеют переменную высоту сечения по их длине. Высота балок в опорной части составляет 300 мм. Ширина балок 160 мм. Нижняя часть балок имеет декоративные уступы для архитектурного оформления.

Армирование балок и плит балконов представлено на рис. 3.20. Продольная рабочая арматура балок принята в виде 2 гнутых стержней, которые расположены в верхней и нижней зонах балок. Диаметр стержней при вскрытии арматуры составил 15 мм. В качестве поперечной арматуры приняты стержни диаметром 10 мм и шагом 200 мм.

Сборные плиты балконов имеют длину 1750 мм, ширину 400 мм и толщину 70 мм. Армированы они сеткой, в которой продольная арматура имеет диаметр 12 мм, а поперечная 8мм (рис. 3.20). Общий вид данной конструкции балкона представлен на рис. 3.21.



Рис. 3.17. Схема расположения жилых домов 1-й и 2-й групп



Рис. 3.18. Общий вид зданий первой группы балконов

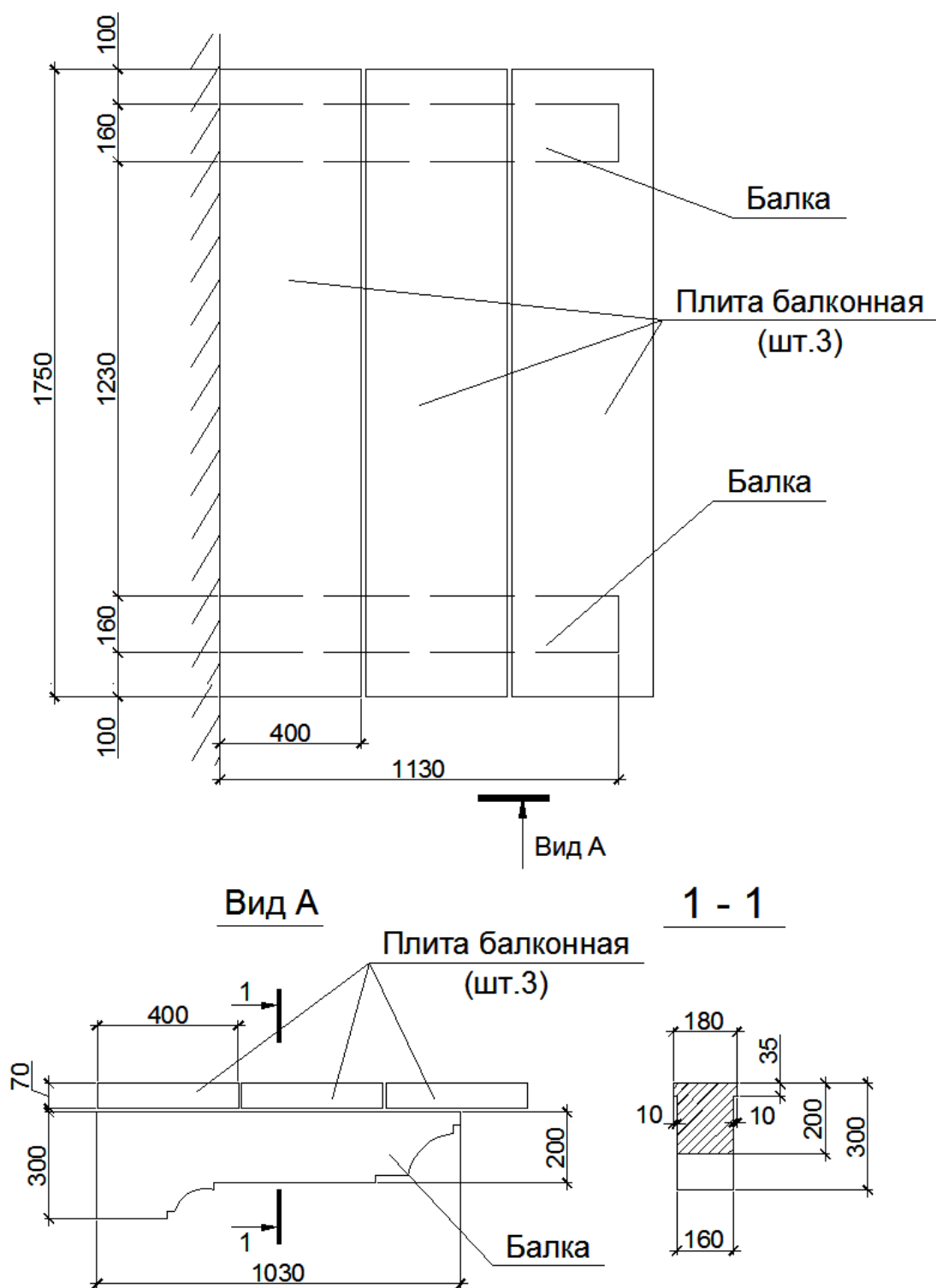
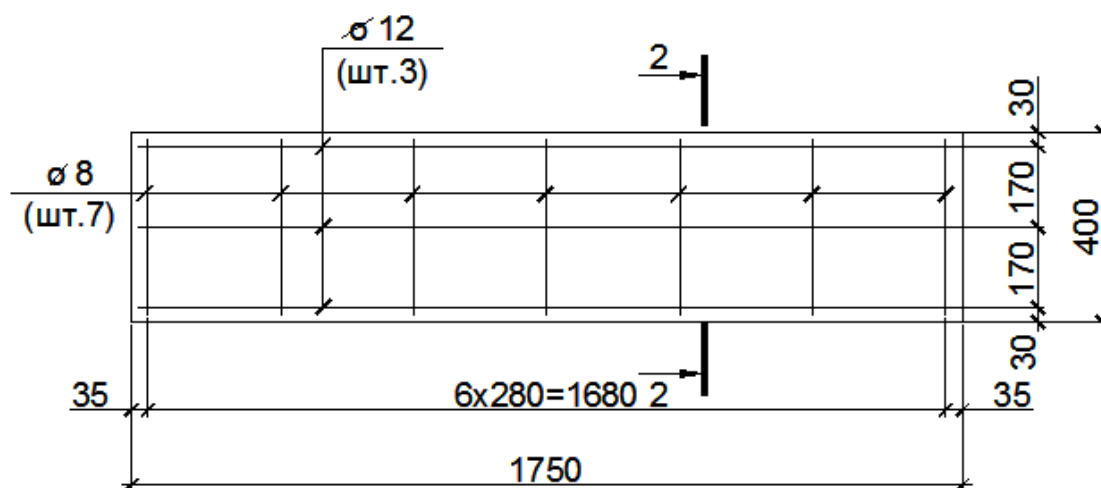


Рис. 3.19. Конструкции балконов

## Плита балконная



## Балка

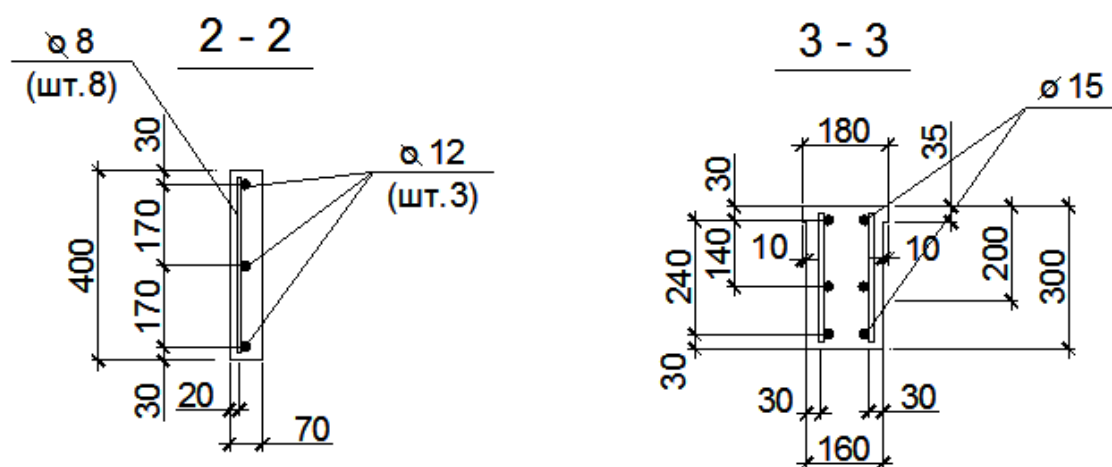
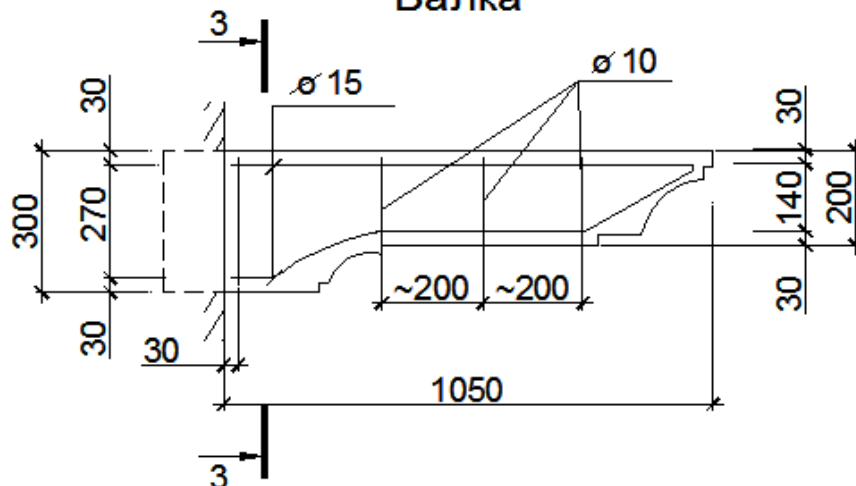


Рис 3.20 Армирование плит и балок балконов



Рис. 3.21 Общий вид балкона первой группы

Жилые дома, расположенные по ул. Вознюка, ул. Роторная д.23а, ул. 20 лет Победы, д.1; были построены в 70-80-е годы. Расположение жилых домов представлено на рис. 3.17. Они представляют собой двухэтажные или четырехэтажные здания. Конструктивная схема – перекрестно-стеновая, с несущими продольными стенами из силикатного кирпича. Фундаменты бетонные, ленточные. Наружные стены толщиной 510 мм. Снаружи по фасадам устроены балконы, а также козырьки над входами.

Конструкция балконов в этих домах представляет собой сборные железобетонных плиты, которые защемлены в кирпичной кладке рис.3.22. Ширина пролета плит 780 мм. Длина плит 3000 мм. Толщина плиты переменная – от 75 мм с края до 100 мм возле стены, что обеспечивает уклон для водостока.

На основании вскрытия и замеров в поврежденных плитах было установлено армирование плит балконов, которое представлено на рис. 3.22 и рис. 3.23. Оно состоит из верхней сетки С1, которая уложена по всей площади плиты и имеет рабочую арматуру диаметром 12 и шагом 150мм. В нижней зоне уложены в торцах плиты сетки С2 и продольная, узкая на всю

длину плиты сетка С3. Диаметр арматуры этих сеток составляет 6-8мм, а шаг 100- 150 мм.

Общий вид данной конструкции балкона представлен на (рис. 3.24).

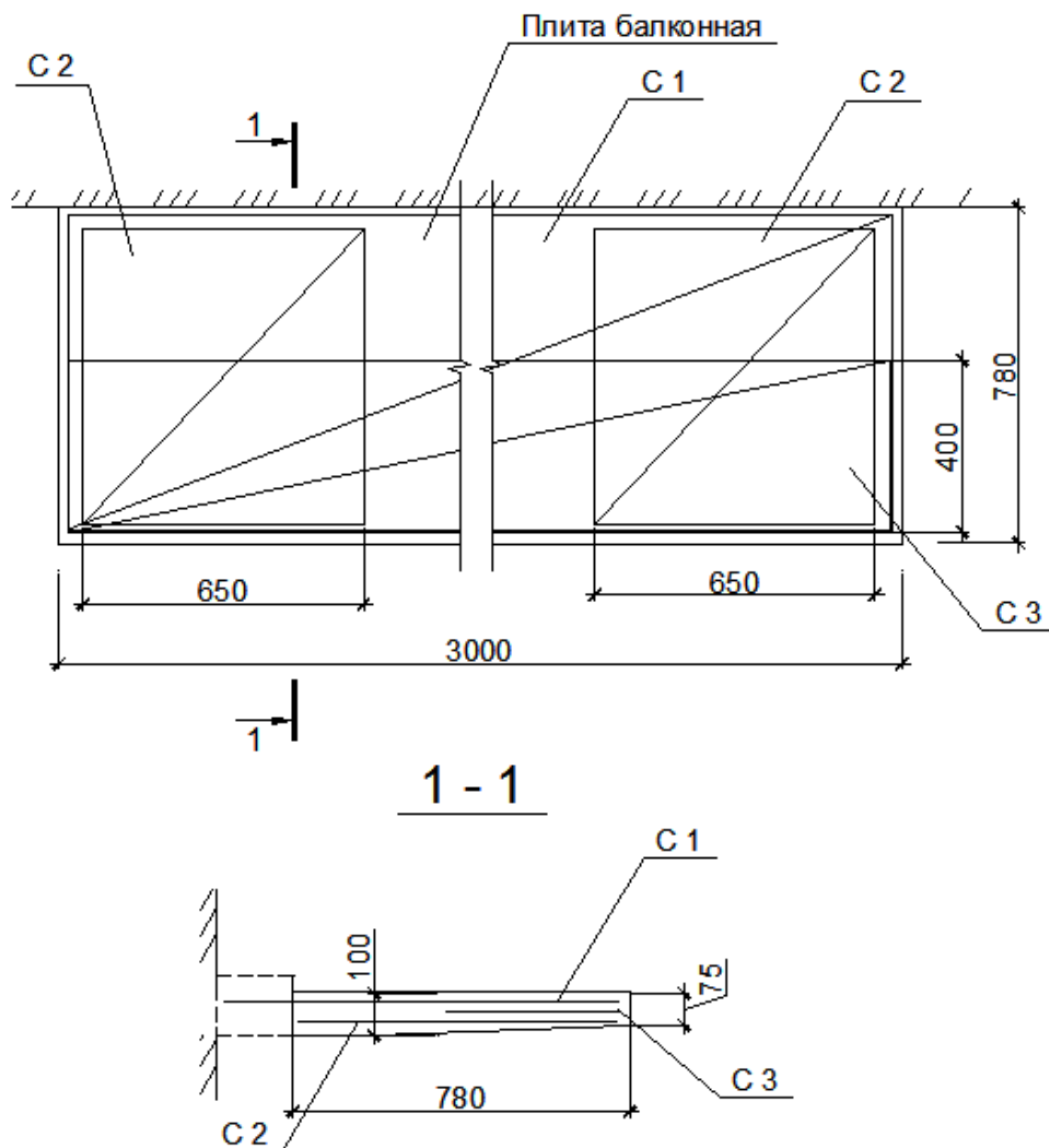


Рис. 3.22 Конструкция балконов



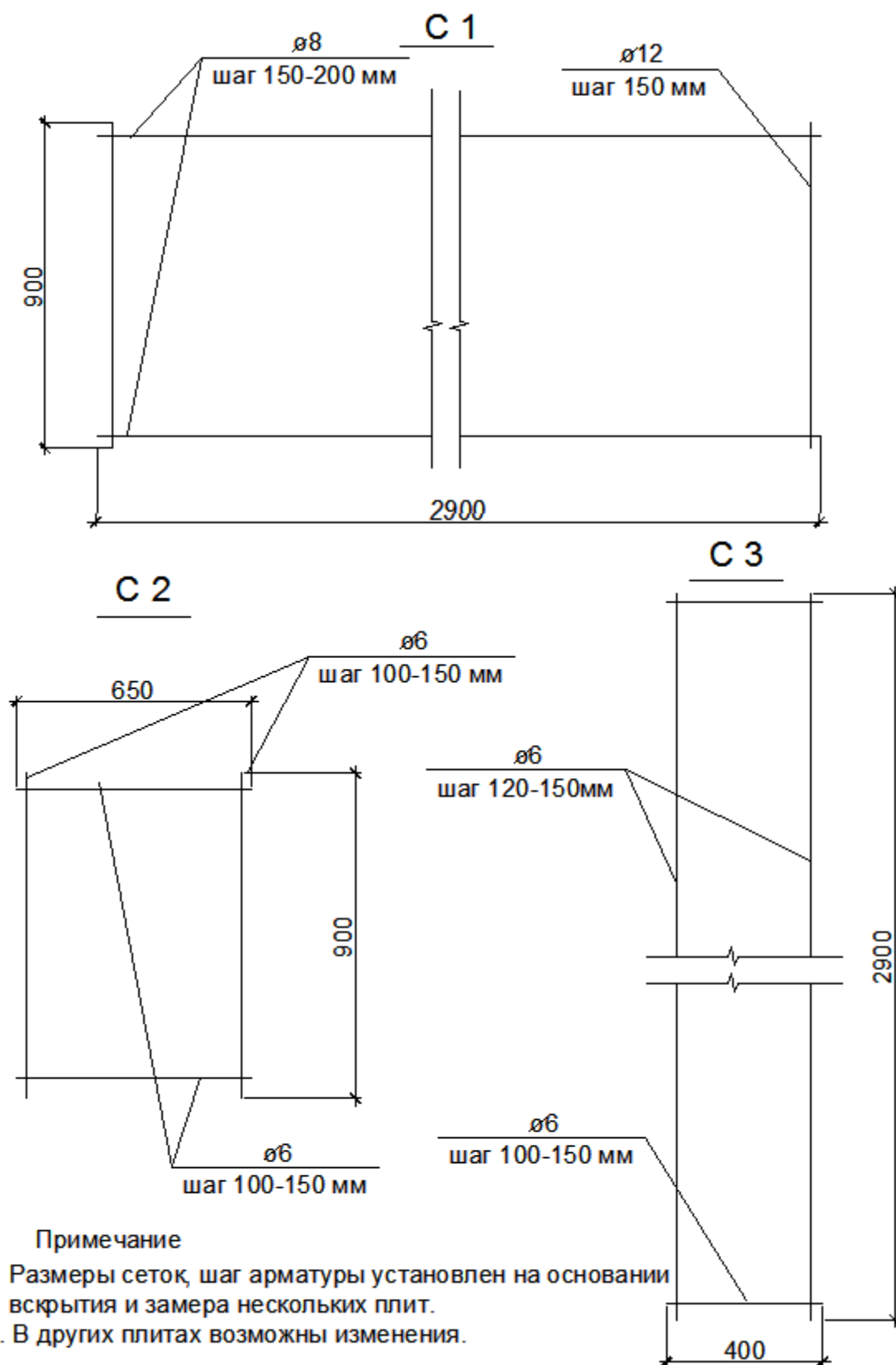


Рис. 3.23 Армирование плит и балок балконов



Рис. 3.24 Общий вид балкона второй группы

Первой стадией натуральных обследований являлся визуальный осмотр конструкций балконов снизу, который включал в себя также фото-фиксацию дефектов и повреждений. Изучалась конструкция, условия эксплуатации, общее техническое состояние, состояние защитного слоя и степень коррозии арматуры. Особое внимание уделялось зоне консольной заделки балок и плит в стену.

По результатам визуального осмотра можно сделать вывод, что практически все балконы имеют дефекты и повреждения в виде отслоения защитного слоя бетона балок и плит и коррозии арматуры.

Основной причиной является нейтрализация защитного слоя бетона вследствие чего, наблюдается интенсивное развитие коррозионных процессов в арматуре конструкций. Нужно отметить, что балконы, получившие наибольшие повреждения данного характера, выходят на улицы с оживленным автомобильным движением.

При обследовании во многих случаях, кроме этого установлены нарушения в толщине защитного слоя при изготовлении ж/б балок и плит.

Второй причиной появления подобных дефектов являлось отсутствие по верху плит сливов из оцинкованной кровельной стали и отсутствие на нижней поверхности плиты по контуру капельника, вследствие чего происходило увлажнение нижней зоны конструкций балконов.

### **3.3.2 Определение прочности бетона железобетонных конструкций**

Второй стадией натурного обследования являлось инструментальное обследование. По результатам инструментального контроля определялись основные показатели эксплуатационной пригодности железобетонных конструкций.

Железобетонные балконные плиты являются самонесущими конструкциями эксплуатируемые под воздействием агрессивной газо-воздушной среды. Для таких конструкций основными показателями эксплуатационной пригодности, являются показатели при которых конструкция может безотказно выполнять свои функции наиболее длительный период времени.

Для самонесущих железобетонных конструкций эксплуатируемых под воздействием агрессивной газо-воздушной среды можно выделить такие основные показатели эксплуатационной пригодности:

- прочность;
- водонепроницаемость;
- карбонизация защитного слоя бетона.

Определение показателей пригодности данной группы позволит выполнить оценку технического состояния, а также проанализировать остаточный ресурс эксплуатации конструкций.

Инструментальное обследование выполнено методами прямых измерений и методами неразрушающего контроля.

В ходе инструментального обследования строительных конструкций выполнялись следующие работы:

- подготовительные работы по метрологическому обеспечению инструментального обследования, поверка приборов и оборудования неразрушающего контроля;
- установление (корректировка) градуировочных зависимостей методов и приборов инструментального контроля неразрушающими методами;
- назначение и разметка участков контроля;
- проведение инструментального контроля неразрушающими методами контроля, измерение параметров материалов и конструкций;
- первичная обработка материалов инструментального контроля конструкций неразрушающими методами;
- первичный анализ результатов инструментального контроля и оценки необходимости дополнительного контроля;
- обработка результатов инструментального контроля, оценка результатов обследования.

Методики инструментального обследования железобетонных конструкций приняты в соответствии с требованиями нормативной документации. Контроль прочности бетона конструкций осуществлялся согласно требований ДСТУ Б В.2.7-224:2009 [17] методами неразрушающего контроля. При инструментальном контроле железобетонных конструкций использовались следующие методы определения прочности бетона: механический метод неразрушающего контроля упругого отскока (УО) согласно ДСТУ Б В.2.7-220:2009 [18].

Прочность бетона методом неразрушающего контроля определялась по предварительно установленной градуировочной зависимости между прочностью бетонных образцов, определенной по ДСТУ Б В.2.7-220:2009 [18] и ДСТУ Б В.2.7-223:2009 [19] и косвенным характеристикам прочности.

В зависимости от примененного метода в качестве косвенных характеристик прочности использованы: при использовании метода упругого отскока - параметр ударного импульса (энергия удара).

Градуировочные зависимости установлены в период подготовительных работ. Градуировочная зависимость определения прочности бетона методом упругого отскока установлена в соответствии с требованиями ДСТУ Б В.2.7-220:2009 [18] на основе результатов испытаний образцов-кубов сначала неразрушающим методом, а затем по ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [20].

Для определения косвенных характеристик испытания проведены на боковых поверхностях образцов (по направлению бетонирования).

Число измерений на каждом образце для методов отскока при ударе было не менее пяти, а расстояние между местами ударов не менее 30 мм.

За единичное значение прочности бетона принято значение прочности бетона в серии по ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [20].

В результате проведенных испытаний получено уравнение зависимости «косвенная характеристика - прочность» линейного типа по формуле

$$R_H = a_0 + a_1 H, \quad (3.3)$$

где  $R_H$  - прочность бетона, МПа;

$H$  - косвенная характеристика;

Коэффициенты  $a_1=1,321$  и  $a_0=-3,52$  МПа, коэффициент вариации уравнения зависимости  $V=11,6\%$ .

Графическая интерпретация зависимости линейного типа и точки значений прочности бетона по серии испытаний представлены на рис. 3.25.

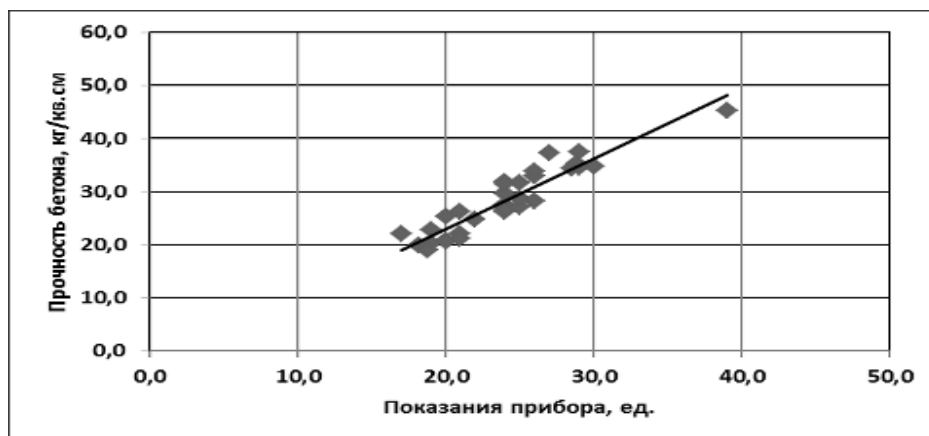


Рис. 3.25. Градуировочная зависимость

Определение прочности бетона неразрушающим методом упругого отскока выполнено в соответствии с требованиями ДСТУ Б В.2.7-220:2009 [18]. Прочность бетона конструкций методом упругого отскока определена с применением прибора «ОНИКС-2.5» в соответствии с руководством по эксплуатации прибора.



Рис. 3.26 Прибор ОНИКС 2.5.

Метод упругого отскока, реализованный в применяемом приборе, основан на связи параметров ударного импульса и отскока бойка от бетона с его прочностью.

На каждом контролируемом участке выполнено не менее пяти измерений косвенной характеристики метода упругого отскока. Прочность бетона на участке определена по среднему значению полученных результатов измерений косвенной характеристики.

Инструментальной оценке прочности подвергались бетон плит и балок. Также определялась прочность кирпича стен, в которых защемлены балконы. Обследованию подвергались плиты и балки балконов получившие наибольшие разрушения и плиты и балки балконов находившиеся в удовлетворительном состоянии. Для уточнения места их расположения указывались и номера квартир к которым относятся данные балконы.

Результаты проведенных испытаний прочности бетона балконов 1-й группы приведены в табл. 3.14.

Таблица 3.14

**Статистическая обработка результатов определения прочности материалов конструкций 1-й группы балконов**

№ п/п	Бетон несущих конструкций балкона	Число точек контроля	Среднее значение прочности, МПа	Коэффициент вариации	Класс бетона по прочности на сжатие
1	балок по ул. К.Волкова, д.17, кв.4	2	37,6	5,8	C25/30
2	балок по ул. К.Волкова, д.17, кв.3	2	36,6	6,9	C25/30
3	плит по ул. К.Волкова, д.17, кв.3	2	26,0	6,4	C16/20
4	балок по ул. 60 лет Октября, д.2, кв.11	2	27,7	5,6	C16/20
5	балок по ул. 60 лет Октября, д.2, кв.6	2	36,75	5,5	C25/30
6	плит по ул. 60 лет Октября, д.2, кв.6	1	34,2	7,7	C25/30
7	плит по ул. Станиславского, д.5, кв.5	1	35,0	3,7	C25/30
8	балок по ул. Станиславского, д.5, кв.5	2	37,3	5,7	C25/30
9	балок по ул. Станиславского, д.5, кв.6	2	36,9	4,5	C25/30
10	балок по ул. Кольская, д.3, кв.12	2	37,7	4,1	C25/30
11	балок по ул. Кольская, д.3, кв.4	2	37,35	3,3	C25/30

На основании полученных результатов прочность бетона балок и плит составляет от 34, 2 МПа до 37, 7 МПа, что соответствует классу бетона C25/30. В случаях интенсивного разрушения защитного слоя бетона

прочность меньше и составляет 26,0 МПа (плита балкона ул. К.Волкова, д.17, кв.3) и 27,7 (балка балкона ул. 60 лет Октября, д.2, кв.11), что соответствует классу бетона С16/20.

Результаты проведенных испытаний прочности бетона балконов 2-й группы приведены в табл. 3.15.

*Таблица 3.15*

**Статистическая обработка результатов определения прочности  
материалов конструкций 2-й группы балконов**

№ п/п	Бетон несущих конструкций балкона	Число точек контро- ля	Среднее значение прочности, МПа	Коэффици- ент вариации	Класс бетона по прочности на сжатие
1	Бетон плиты балкона ул. Вознюка, д.3, кв.6	2	36,6	3,5	С25/30
2	Бетон плиты балкона ул. Вознюка, д.3, кв.7	1	37,4	3,7	С25/30
3	Бетон плиты балкона ул. Вознюка, д.3, кв.18	1	34,3	3,0	С25/30
4	Бетон плиты балкона ул. Вознюка, д.3, кв.19	1	32,9	4,5	С20/25
5	Бетон плиты балкона ул. Вознюка, д.1, кв.7	1	36,8	4,5	С25/30
6	Бетон плиты балкона ул. Вознюка, д.1, кв.18	1	37,0	3,0	С25/30

На основании полученных результатов прочность бетона плит составляет от 32, 9 МПа до 37, 4 МПа, что соответствует классу бетона С25/30- С25/30.



### 3.3.3 Определение водонепроницаемости железобетонных конструкций

На обследуемых балконах 1-й и 2-й групп, определялись показатели проницаемости бетона плит и балок, для установления зависимостей между проницаемостью бетона и глубиной карбонизации.

Основным показателем, характеризующим проницаемость бетона, является его водонепроницаемость (W).

Водопроницаемость, свойственная обычному бетону, объясняется его специфической структурой [91]. Как известно, бетон состоит из цементного теста, песка и гравия (щебня). Наличие в бетоне большого количества воздушных пор обуславливает его водопроницаемость. Тем не менее, это не значит, что с увеличением числа пор водопроницаемость бетона повышается. Она зависит не только от числа, но и от формы и характера пор.

Поры возникают в результате неправильного подбора состава бетонной смеси, недостаточного уплотнения этой смеси при укладке и от избыточного количества воды, требуемого для обеспечения достаточной удобоукладываемости бетонной смеси. Вода впоследствии испаряется, остаются поры и сообщающиеся капилляры. Эти поры и служат основными путями для фильтрации воды.

Обладая сравнительно большим весом, заполнитель оседает, образуя скелет, цементные частицы с небольшой скоростью также опускаются вниз, а свободная вода поднимается на поверхность бетона или скапливается под нижней поверхностью зерен-заполнителей [42].

В результате на поверхности бетона возникает слой, отличающийся высоким водоцементным отношением. После испарения воды в этом слое образуются большие сообщающиеся поры. При этом поверхностные поры взаимодействуют с углекислотой и образованиями труднорастворимого карбоната кальция, который под действием некоторого избытка  $\text{CO}_2$  как в

атмосфере, обратимо превращается в водорастворимый гидрокарбонат, усугубляющий коррозию [3].

Под нижней поверхностью заполнителя также возникают пустоты (поры). Соединяясь с другими порами, они способствуют большему просачиванию воды. Капиллярные поры в цементном камне появляются в результате испарения избыточной воды. Они соединяют названные выше поры, прокладывая тем самым основные пути для фильтрации воды. Поры геля возникают в процессе гидратации цементного теста и равномерно распределяются в массе в промежутке между капиллярными порами. Их относят к «закрытым», водонепроницаемым порам.

Из всего сказанного следует, что водонепроницаемость бетона зависит от количества и вида пор, соотношения исходных материалов, подбора состава бетонной смеси и характера ее укладки. При определенной консистенции бетонной смеси количество цемента влияет на плотность структуры и водоцементное отношение [126].

Водонепроницаемость бетона плит и балок балконов определялась прибором «Агама» (рис. 3.27) по ДСТУ Б В.2.7-170:2008 [77] (ГОСТ 12730.5-84. [21]). Результаты испытаний определялись по табл 3.2.



Рис 3.27 Определение водонепроницаемости прибором «Агама»

По результатам полученным в ходе испытаний было установлено, что консольные балки 1-й группы имеют марку по водонепроницаемости W0 и W6, а балконные плиты 1-й группы имеют марку по водонепроницаемости W0 и W2.

По результатам полученным в ходе испытаний было установлено, что балконные плиты 2-й группы имеют марку по водонепроницаемости W0, W2, W4.

### **3.3.4 Определение глубины карбонизации бетона защитного слоя**

Как отмечалось, в бетоне защитного слоя, при воздействии на него агрессивной газо-воздушной среды, происходит процесс карбонизации. Под карбонизацией понимают химическую реакцию щелочных компонентов цементного камня с диоксидом углерода с образованием карбонатов. Вследствие этой реакции изменяются структуры и основные свойства бетона.

Глубина нейтрализации бетона определяется колориметрическим способом, основанным на изменении цвета органических индикаторов в зависимости от величины водородного показателя. Оценка производится путем обработки свежего скола бетона индикаторами рН. 1-% спиртовой раствор фенолфталеина изменяет цвет от бесцветного (рН=9,3) до малинового (рН=10,5). Через минуту после нанесения раствора индикатора линейкой с точностью до 1 мм измеряют глубину нейтрализации бетона [58].

Основным критерием при выборе балконов для обследования было их месторасположение. Обследованию подверглись плиты и балки балконов которое выходят на улицы с оживленным автомобильным движением.

В 1-й группе были обследованы плиты и балки балконов расположенные по адресу – ж/м Приднепровск: ул.Космонавта Волкова 17.

Во 2-й группе были обследованы плиты балконов расположенные по адресу – ж/м Приднепровск: ул. Вознюка 3а, 5а, 5б.



Рис 3.28 Карбонизация бетона образцов разного возраста

Молотком и зубилом наносился свежий скол по всей величине защитного слоя до арматуры. После чего, место свежего скола тщательно очищалось и смачивалось водой. С помощью шприца 1% раствор фенолфталеина наносился на обработанную поверхность свежего скола бетона плит и балок рис. 2.19, 2.20. Через минуту после нанесения раствора линейкой с точностью до 0,5 мм измерялось расстояние от поверхности плиты или балки до грани ярко окрашенной зоны, в направлении перпендикулярном к поверхности элемента [58].



Рис 3.29 Определение глубины карбонизации плиты балкона



Рис 3.30 Определение глубины карбонизации консольной балки

По результатам, полученных данных в ходе испытаний по определению глубины карбонизации плит и балок балконов 1-й и 2-й групп, было установлено, что глубина карбонизации плит составила 13-35 мм, а глубина карбонизации консольных балок составила 11-25 мм. Из раздела 3.3.1 следует, что величина защитного слоя консольных балок фактически составлял до 10 мм, а величина защитного слоя плит балконов 1-й и 2-й групп 5 мм.

Полученные данные свидетельствуют о том, что защитный слой плит и балок балконов обеих групп является прокарбонизированным, а значит, отсутствует пассивирующее действие бетона на арматуру. Соответственно условие (1.1), обеспечивающее нормальную работу железобетонной конструкции, не выполняется.

$$y(\tau) \leq a_p$$

Для более удобного сравнения полученных результатов они были помещены в единую сводную таблицу 3.16.



Таблица 3.16

**Сводная таблица полученных результатов по определению показателей эксплуатационной пригодности на балконах 1-й и 2-й групп**

Гр	Месторасположение объекта	Элемент	Прочность, МПа	Глубина карбонизации (X), мм.	Марка бетона по водонепроницаемости	Скорость фильтрации воздуха, с/см <sup>3</sup>
1-я группа.	Космонавт а Волкова 17/ кв. 3	Балка	54.5	11	W6	0,153-0,106
	Космонавт а Волкова 17/ кв. 3	Плита	37.2	30	W0	>0,325-0,224
	Космонавт а Волкова 17/ кв. 4	Балка	34.1	25	W0	>0,325-0,224
	Космонавт а Волкова 17/ кв. 4	Плита	44.3	13	W2	0,325-0,224
2-я группа.	Вознюка 3а/ кв. 12	Плита	47.6	15	W2	0,325-0,224
	Вознюка 5а/ кв. 16	Плита	32.1	35	W0	>0,325-0,224
	Вознюка 5б/ кв. 13	Плита	52.3	19	W4	0,223-0,154

По результатам, представленным в табл. 3.16 можно увидеть прямую зависимость между глубиной карбонизации (X), водонепроницаемостью (W) и прочностью (R). То есть, наибольшая глубина карбонизации была выявлена на тех конструктивных элементах балконов, которые имеют наименьшую прочность и марку по водонепроницаемости.

### 3.3.5 Оценка и статистический анализ технического состояния обследуемых железобетонных конструкций

Оценка технического состояния выполнена на основании комплексного инструментального обследования строительных конструкций, осмотра отдельных элементов и узлов.

Оценка технического состояния конструкций проводилась в соответствии со следующими категориями [47, 82]:

**I. Нормальное** - На поверхности бетона незащищенных конструкций видимых дефектов и повреждений нет или имеются отдельные раковины, выбоины, волосные трещины. Антикоррозионная защита закладных деталей не нарушена, поверхность арматуры при вскрытии чистая. Глубина нейтрализации бетона не превышает половины толщины защитного слоя. Антикоррозионная защита конструкций не имеет нарушений.

Прочность бетона не ниже проектной, величина защитного слоя бетона меньше проектной до 20%, а класс бетона по водонепроницаемости на одну ступень; величина прогиба и ширина раскрытия трещин не превышают допустимую по нормам; потери площади сечения рабочей арматуры нет.



Рис. 3.31. Нормальное техническое состояние

Нормальное техническое состояние конструкции было оценено на тех балконах, которые систематически подвергались своевременному ремонту самими жильцами. То есть на проблемные места, а именно на места оголения арматуры наносился дополнительный слой раствора, который выполняет функции нового защитного слоя.

**II. Удовлетворительное** - Анतिकоррозионная защита железобетонных элементов имеет частичные повреждения, на отдельных участках мокрые или масляные пятна, высолы. На отдельных участках в местах с малой величиной защитного слоя проступают следы коррозии распределительной арматуры или хомутов, коррозия рабочей арматуры отдельными точками и пятнами, язв и пластинок ржавчины нет. Анतिकоррозионная защита закладных деталей не нарушена. Глубина нейтрализации бетона не превышает толщины защитного слоя. Изменен цвет бетона вследствие пересушивания, местами отслоение бетона при простукивании. Шелушение граней и ребер конструкций, подвергшихся замораживанию. Ориентированная прочность бетона ниже проектной не более чем на 10%. Прочность бетона основного сечения элемента (за пределами защитного слоя бетона и в сжатой зоне) не ниже проектной; величина защитного слоя бетона меньше проектной (до 30%) на площади менее 30% поверхности. Потеря площади сечения рабочей ненапрягаемой арматуры и закладных деталей вследствие коррозии не превышает 5%.



Рис. 3.32. Удовлетворительное техническое состояние



Удовлетворительное техническое состояние балконов было оценено на тех балконах, на которых визуально были обнаружены повреждения конструкций, однако эти повреждения не влияют на возможность нормальной их эксплуатации. Следует заметить, что большинство этих балконов выходят во двор, а не на оживленные улицы с автомобильным движением, что напрямую снижает вредоносное влияние на них выхлопных газов.

**III. непригодное к нормальной эксплуатации** - Пластинчатая ржавчина или язвы на стержнях оголенной рабочей арматуры в зоне продольных трещин или на закладных деталях, вызывающие уменьшение площади сечения стержней до 15%. Трещины в растянутой зоне бетона, превышающие их допустимое раскрытие. Бетон в растянутой зоне на глубине защитного слоя между стержнями арматуры легко крошится. Снижение ориентировочной прочности бетона в сжатой зоне изгибаемых элементов до 30 и в остальных случаях до 20%. Провисание отдельных стержней распределительной арматуры, выпучивание хомутов, разрыв отдельных из них вследствие коррозии стали (при отсутствии в этой зоне трещин). Прочность бетона основного сечения элемента ниже проектной; потеря площади сечения рабочей арматуры и закладных деталей вследствие коррозии превышает 5%; ширина раскрытия трещин, вызванных эксплуатационными воздействиями, на уровне арматуры превышает допустимую по действующим нормам; трещины в сжатой зоне и в зоне главных растягивающих напряжений, прогибы элементов, вызванных эксплуатационными воздействиями, превышают допустимые более чем на 30%.



Рис. 3.33. непригодное к нормальной эксплуатации

**IV. Аварийное** - Трещины, в том числе пересекающие опорную зону анкеровки растянутой арматуры; «хлопающие» трещины в конструкциях, испытывающих знакопеременные воздействия (вызывающие сминание бетона и др.); отходы анкеров от пластин закладных деталей из-за коррозии стали в сварных швах или других причин; деформация закладных и соединительных элементов; расстройство стыков сборных элементов с взаимным смещением последних; разрыв отдельных стержней рабочей арматуры в растянутой зоне, выпучивание арматуры в сжатой зоне; раздробление бетона и выкрошивание заполнителя в сжатой зоне.



Рис. 3.34. Аварийное техническое стояние



Рис. 3.35. Аварийное техническое состояние



Рис. 3.36. Аварийное техническое состояние

Всего обследованию подлежало 177 балконов первой группы и 244 балконов второй группы. На основании полученных результатов был проведен статистический анализ по соответствию элементов конструкций разных типов балконов категориям технического состояния.

Установлено, что по техническому состоянию в 1-й группе балконов в аварийном состоянии находятся 8% плит и 2% балок. В непригодном для нормальной эксплуатации состоянии находятся 23% плит, 23% балок рис. 3.37 и рис. 3.38. В 1-й группе балконов в нормальном состоянии находятся соответственно 13% и 24% конструкций. Больше половины конструкций

находится пока в удовлетворительном состоянии. А это значит, что необходимо разрабатывать мероприятия по продлению их срока службы путем ремонтно-восстановительных работ [120].

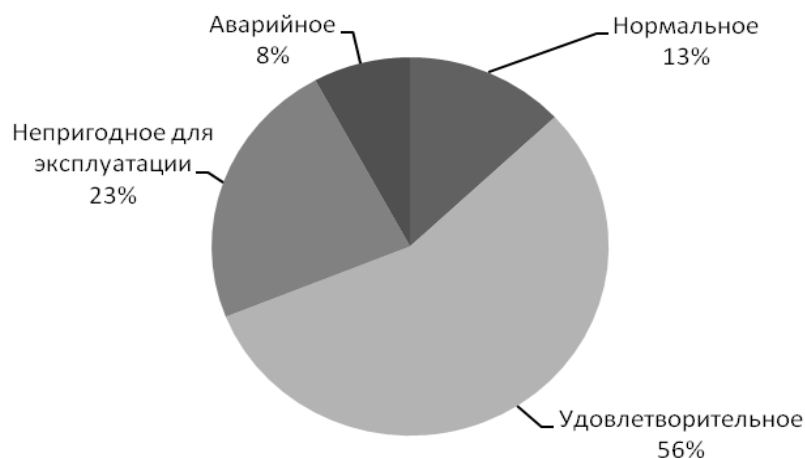


Рис. 3.37. Распределение плит балконов первой группы по техническому состоянию

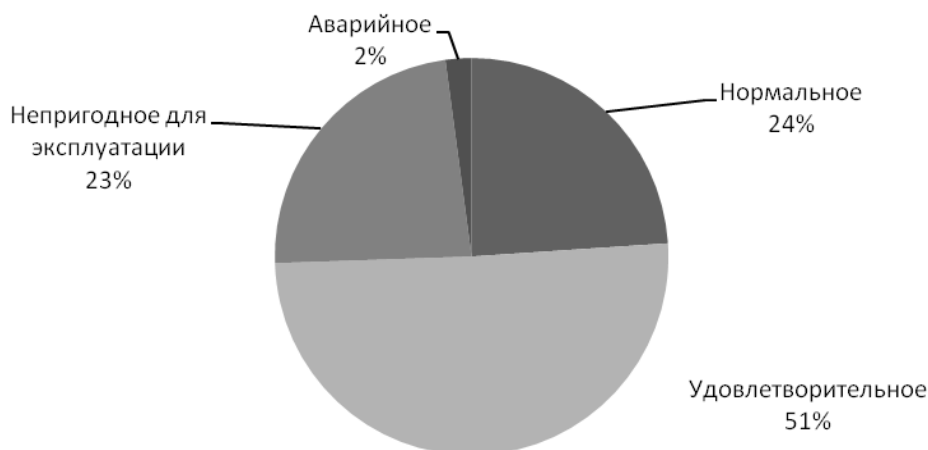


Рис. 3.38. Распределение балок балконов первой группы по техническому состоянию

Установлено, что по техническому состоянию в второй группе балконов в аварийном состоянии находятся 1% плит и соответственно 21% плит в непригодном для нормальной эксплуатации состоянии (рис.3.39). Однако в нормальном состоянии находится всего лишь 2% плит от общего количества. Три четверти балконных плит второй группы пока находятся в удовлетворительном состоянии. Срок эксплуатации балконов второй группы



меньше на 20 лет по сравнению с балконами первой группы. Таким образом, они также требуют срочных мероприятий по их восстановлению и усилению [120].

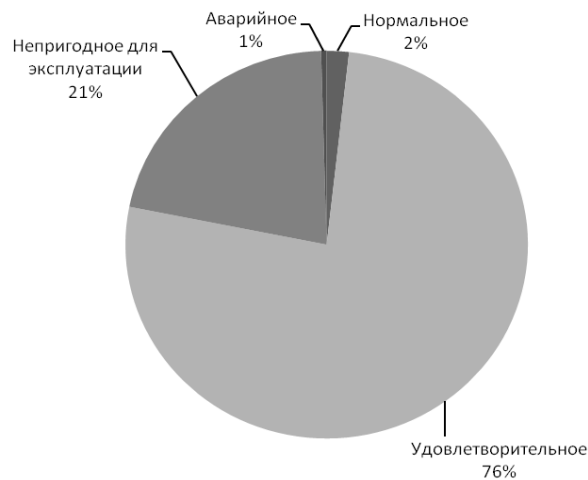


Рис.3.39. Распределение плит балконов второй группы по техническому состоянию.

### Выводы по разделу 3

1. Проведены обширные экспериментальные исследования кинетики карбонизации бетона защитного слоя в лабораторных и натуральных условиях.

2. Выполнены исследования глубины карбонизации бетона возрастом 7 и 23 года в лабораторных условиях. По результатам испытаний были определены зависимости между прочностью, водонепроницаемостью и глубиной карбонизации. Полученные данные подтверждают применимость функции (1.5) для расчета глубины карбонизации с показателем степени  $n=2$  для бетонов высокой проницаемости. Определение долговечности бетона защитного слоя из бетонов марок по водонепроницаемости  $W_6$  и выше, целесообразно осуществлять с применением функции вида (1.6) с показателем степени  $n=3$ .

3. Выполнены исследования по определению срока службы железобетонных конструкций, здания расположенного по адресу г. Днепропетровск, пр. К. Маркса, 93. Для определения срока службы здания «Дома Союзов» использовалась методика расчета времени карбонизации

бетона описанная в разделе 2. Выполнены прогнозные расчеты времени карбонизации бетона защитного слоя толщиной 20, 35, 50 мм фундаментных блоков для климатических условий г. Днепропетровска при расходе портландцемента в бетоне  $400 \text{ кг/м}^3$  и водоцементном отношении  $В/Ц = 0,5$ .

Данные проведенных расчетов свидетельствуют, что диапазон срока службы бетона защитного слоя составляет 22 – 64 года.

4. С целью оценки адекватности предложенного метода оценки долговечности бетона защитного слоя в условиях атмосферных климатических воздействий было выполнено визуальное и инструментальное обследование балконных плит на ж/м Приднепровск г. Днепропетровска. Всего было обследовано около 400 балконных плит.

По результатам инструментального обследования установлена прямая зависимость между глубиной карбонизации ( $X$ ), водонепроницаемостью ( $W$ ) и прочностью ( $R$ ).

5. Установлены распределения балконных плит по категориям технического состояния. По техническому состоянию в 1-й группе балконов в аварийном состоянии находятся 8% плит и 2% балок. В непригодном для нормальной эксплуатации состоянии находятся 23% плит, 23% балок. В нормальном состоянии находятся, соответственно, 13% и 24% конструкций. Более половины конструкций находится в удовлетворительном состоянии.

Установлено, что по техническому состоянию в второй группе балконов в аварийном состоянии находятся 1% плит и соответственно 21% плит в непригодном для нормальной эксплуатации состоянии. В нормальном состоянии находится всего лишь 2% плит от общего количества. Три четверти балконных плит второй группы находятся в удовлетворительном состоянии.

6. Результаты лабораторных исследований, натурных обследований и численных расчетов подтверждают адекватность предложенного метода расчета кинетики нейтрализации бетона защитного слоя в условиях атмосферных климатических воздействий.

## РАЗДЕЛ 4

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОРОЗОСТОЙКОСТИ БЕТОНОВ НА МЕСТНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ

#### 4.1 Требования норм проектирования к морозостойкости бетона железобетонных конструкций

При проектировании бетонных и железобетонных конструкций и в зависимости от их назначения и условий работы устанавливают показатели качества бетона, именуемые классами и марками. Определение понятий «класс бетона» и «марка бетона» приведено в ДСТУ Б В.2.7-43-96 [22].

Классы бетона назначают по прочности на осевое сжатие и осевое растяжение, марки – по морозостойкости, водонепроницаемости и плотности. Класс бетона по прочности на сжатие (В) определяют гарантированным сопротивлением сжатию (МПа) эталонного образца-куба, испытанного согласно требованиям государственных стандартов, со статистической обеспеченностью 0,95 или ее гарантированной доверительной вероятностью 95% (не менее 95% испытанных образцов должны иметь прочность не ниже В).

Второй важной характеристикой бетона, особенно для конструкций эксплуатирующихся в условиях отрицательных температур, является его марка по морозостойкости. Марка бетона по морозостойкости F определяется количеством циклов попеременного замораживания и оттаивания в увлажненном состоянии, которое выдерживают контрольные образцы, изготовленные и испытанные согласно требованиям государственных стандартов.

По морозостойкости для тяжелого (обычного) и мелкозернистого бетонов установлены следующие марки: F50, F75, F100, F150, F200, F300, F400, F500.

Марки бетона по морозостойкости бетонных и железобетонных конструкций в зависимости от режима их эксплуатации, значений расчетной зимней температуры наружного воздуха в районе строительства и класса зданий по степени ответственности принимаются не ниже указанных в таблице 4.1.

В строительных нормах представлены расходы цемента из условия приготовления бетонов на портландцементе марки М400 и его разновидности с определением фракцией щебня и модуля крупности песка. При использовании других составляющих бетонной смеси следует вводить различные поправочные коэффициенты. Для бетонов, к которым предъявляются требования по морозостойкости, рекомендуется применение добавок. В нормах отсутствуют ограничения по минимальным классам бетона для обеспечения морозостойкости, но даны различия в зависимости от удобоукладываемости, которые приведены в таблице 4.2.

Нормы расхода цемента для бетонов монолитных конструкций в зависимости от проектного класса бетона по прочности в возрасте 28 суток для бетонов по удобоукладываемости П2, представлены в таблице 4.3.

При применении цемента марки 500 базовые нормы следует умножать на коэффициент 0,88. Базовые нормы предусматривают применение щебня с наибольшей крупностью 40 мм. При применении бетонных смесей марки П1 базовые нормы следует умножать на коэффициент 0,91.



Таблица 4.1

**Требования к бетону конструкций, работающих в условиях  
знакопеременных температур**

Условия работы конструкций		Марка бетона, не ниже					
Характеристика режима:  попеременное замораживание и оттаивание:	Расчетная зимняя температура наружного воздуха, °С <sup>2)</sup>	по морозостойкости			по водонепроницаемости		
		для конструкций (кроме наружных стен отапливаемых зданий) зданий и сооружений класса по степени ответственности по ДБН В.1.2-14					
		I	II	III	I	II	III
в) в условиях эпизодического водонасыщения (например, надземные конструкции, постоянно подвергающиеся атмосферным воздействиям) <sup>1)</sup>	Ниже –40	F200	F150	F100	W6	W4	W4
	Ниже –20 до –40 включ.	F100	F75	F50	W4	W4	W4
	Ниже –5 до –20 включ.	F100	F75	F50	W4	W4	W4
	– 5 и выше	F75	F50	F35	W4	W4	W4
г) в условиях воздушно-влажностного состояния при отсутствии эпизодического водонасыщения (например, конструкции, постоянно подвергающиеся воздействию окружающего воздуха, но защищенные от воздействия атмосферных осадков)	Ниже –40	F200	F150	F100	W6	W4	W4
	Ниже –20 до –40 включ.	F150	F100	F75	W4	W4	W4
	Ниже –5 до –20 включ.	F100	F75	F50	W4	W4	W4
	– 5 и выше	F75	F50	F35	W4	W4	W4
<sup>1)</sup> Для конструкций, части которых находятся в различных влажностных условиях, например, опоры ЛЭП, колонны, стойки и т.п. марку бетона по морозостойкости назначают как для наиболее подверженного увлажнению участка конструкции. <sup>2)</sup> Расчетные зимние температуры наружного воздуха принимаются согласно ДБН В.2.6-31							

**Таблица 4.2**

Удобоукладываемость		ТЭН для бетона марок по морозостойкости, кг/м <sup>3</sup>			
марка	Осадка конуса, см	F75	F100, F150	F200	F300
П2	5-9	260	300	370	400
П1	1-4	240	280	340	380

**Таблица 4.3**

Класс бетона по прочности на сжатие	Базовые нормы расхода цемента марки 400 для монолитных конструкций, кг/м <sup>3</sup>
B7,5	180
B10	200
B12,5	225
B15	260
B20	320
B22,5	350
B25	380
B30	440

## **4.2 Исследование влияния вида и расхода цемента на прочность и морозостойкость бетонов**

### **4.2.1 Расчет и подбор состава бетона**

В общем виде проектирование составов бетона включает следующие этапы:

- назначение требований к бетону исходя из вида и особенностей службы и изготовления конструкций;
- выбор материалов для бетона и получение необходимых данных, характеризующих их свойства;
- определение предварительного состава бетона;
- проверку состава бетона в пробных замесах;
- контроль за бетонированием;
- корректировку состава в процессе производства при колебаниях свойств заполнителя и других факторов.

Определение предварительного состава бетона производят на основе зависимости прочности бетона от активности цемента, цементно-водного фактора, качества используемых материалов и зависимости подвижности бетонной смеси от расхода воды и т.д.

Имеется целый ряд научно-технической литературы по рациональным методам подбора составов тяжелого бетона, предназначенной для инженерно-технических работников заводов ЖБИ, строительных и проектных организаций [101, 109]. В этих работах изложены основные требования и рекомендации по подбору составов тяжелого бетона заданной прочности.

В то же время отсутствуют специальные нормативные документы, регламентирующие методы проектирования составов бетонов на заданную (нормативную) морозостойкость. Существуют только отдельные указания,

которые регламентируют максимально допустимую величину В/Ц и рекомендуют расход цемента для данной марки бетона по морозостойкости.

В работах [129] и [110] предложены расчетные методы прогнозирования морозостойкости бетона на стадии проектирования состава бетона. Однако широкого практического применения они не нашли.

В качестве заполнителей бетона необходимо использовать материалы из близко расположенных карьеров, но такие, которые позволяют получать бетон с заданными свойствами при минимальных расходах цемента. Заданную подвижность бетонной смеси обеспечивают правильным назначением расхода воды, а прочность бетона – правильным назначением водоцементного отношения и расхода цемента.

Минимального расхода цемента добиваются правильным выбором содержания крупного и мелкого заполнителя. Расходы песка и щебня в тяжелом бетоне определяют по формулам, которые выводятся при решении системы двух уравнений

$$(Ц/\rho_{ц}) + В + (П/\rho_{п}) + (Щ/\rho_{щ}) = 1000 \quad (4.1)$$

$$(Ц/\rho_{ц}) + В + (П/\rho_{п}) = Пщ\alpha (Щ/\rho'_{щ}) \quad (4.2)$$

где Ц, В, П, Щ — соответственно расходы цемента, воды, песка и щебня, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{ц}$ ,  $\rho_{п}$ ,  $\rho_{щ}$  — истинные плотности цемента, песка и щебня, кг/л;

Пщ — пустотность щебня (относительная величина);

$\alpha$  — коэффициент раздвижки зерен щебня раствором;

$\rho'_{щ}$  — плотность щебня, кг/л.

Первое уравнение выведено из условия, что сумма абсолютных объемов компонентов бетона равна 1 м<sup>3</sup> плотного бетона без вовлеченного воздуха, а второе — из условия, что цементно-песчаный раствор должен заполнить все пустоты между щебнем (в стандартно-рыхлом состоянии) с некоторой раздвижкой его зерен, что необходимо для получения

удобообрабатываемой бетонной смеси и хорошего связывания зерен заполнителя в единый прочный монолит.

В этой системе уравнений два неизвестных: расход песка и щебня, так как расходы цемента и воды определяются в зависимости от прочности бетона и подвижности бетонной смеси, а коэффициент  $\alpha$  назначается в соответствии с полученными экспериментальным путем рекомендациями, обеспечивающими наиболее разумное соотношение между песком и щебнем, при котором расход цемента оказывается минимальным.

Решением приведенной системы уравнений получают расходы щебня и песка:

$$\text{Щ} = 1000 / (\alpha \text{Пщ} / \rho'_{\text{щ}} + 1 / \rho_{\text{щ}}); \quad (4.3)$$

$$\text{П} = \rho_{\text{п}} (1000 - \text{Ц} / \rho_{\text{ц}} - \text{В} - \text{Щ} / \rho_{\text{щ}}) \quad (4.4)$$

#### 4.2.2 Материалы и составы

Для изучения влияния величины расхода цемента на морозостойкость бетонов и получения соответствующих прочностных характеристик, были рассчитаны составы на Балаклейском портландцементе марки 500 (плотность 3,11 г/м<sup>3</sup>, нормальная густота цементного теста 25,75%) и Криворожском цементе марки 400 (плотность 3,06 г/м<sup>3</sup>, нормальная густота цементного теста 24,75%).

Расходы цементов были приняты 240, 280, 310, 340 и 380 кг/м<sup>3</sup> из условия обеспечения марок бетона по морозостойкости в диапазоне F75 – F300. Эти расходы соответствуют требованиям при марке бетонной смеси по удобоукладываемости П1 с осадкой конуса 1-4 см.

Для приготовления опытных образцов-кубов использовались Днепровский песок и щебень Рыбальского карьера.

Днепровский песок имеет такие характеристики: модуль крупности - 1,34, насыпная плотность в сухом состоянии - 1586 кг/м<sup>3</sup>, плотность песка - 2645 кг/м<sup>3</sup>, водопотребность - 8,6%, пустотность - 40%.

Щебень Рыбальского карьера удовлетворяет требованиям (ГОСТ 8269.0-97) ДСТУ Б В.2.7-75-98 [131]: смесь фракций - 3-20, плотность - 2640 кг/м<sup>3</sup>, насыпная плотность - 1440 кг/м<sup>3</sup>; водопотребность - 3,2%, пустотность - 45,4%.

Образцы после достижения 28 суточного возраста испытывать на прочность и морозостойкость.

Морозостойкость определялась согласно ДСТУ Б В.2.7-47-96 [23] (ГОСТ 10060.2-95) по третьему ускоренному методу с замораживанием до – (50-55) С в 5% растворе хлористого натрия. Для этого использовалась морозильная машина НС 270/75, позволяющая обеспечивать требуемый нормами температурный режим. Образцы предварительно насыщались солевым раствором, а потом подвергались последовательно 2, 3, 4 и 5 циклам замораживания, что соответствует маркам по морозостойкости F75, F100, F150, F200.

В таблицах 4,4 и 4,5 представлены характеристики составов бетона и их прочность в возрасте 28 суток.

#### **4.2.3 Результаты испытаний на прочность и морозостойкость**

Программой данных предварительных испытаний образцов кубиков 10x10x10 см предусматривалось:

- определить влияние расхода цемента на прочность экспериментальных составов бетонов в возрасте 28 суток;
- установления нормативной прочности бетона при различных расходах цемента;

- влияние расхода цемента на морозостойкость бетонов.

Таблица 4.4

**Характеристики составов бетона на Криворожском  
шлакопортландцементе**

Характеристика состава	Серия бетона				
	КР240	КР280	КР310	КР340	КР380
ШПЦ М400, кг/м <sup>3</sup>	240	280	310	340	380
Песок, кг/м <sup>3</sup>	679	628	601,7	570,77	527,3
Щебень, кг/м <sup>3</sup>	1300	1306	1281,6	1282	1286,6
Вода кг/м <sup>3</sup> /В/Ц,	173/0,72	176,5/0,63	185,8/0,599	190,2/0,56	190,5/0,501
Осадка конуса, см	3	3	5	5	5
Прочность, МПа	18,2	25,5	33,0	39,5	45,3

Таблица 4.5

**Характеристики составов бетона на Балаклейском портландцементе**

Характеристика состава	Серия бетона				
	Б240	Б280	Б310	Б340	Б380
ПЦ М500, кг/м <sup>3</sup>	240	280	310	340	380
Песок, кг/м <sup>3</sup>	674	624	589	543	527
Щебень, кг/м <sup>3</sup>	1298	1298	1312,5	1320	1298
Вода кг/м <sup>3</sup> /В/Ц,	176,3/0,734	182,3/0,651	180,5/0,582	185/0,544	184/0,487
Осадка конуса, см	3	4	3	4	3,5
Прочность, МПа	24,3	25,9	31,1	35,6	43,6

Образцы после достижения 28 суточного возраста испытывать на прочность и морозостойкость согласно по третьему ускоренному методу с замораживанием до  $-(50-55) \text{ C}$  в 5% растворе хлористого натрия. Для этого использовалась морозильная машина НС 270/75, позволяющая обеспечивать требуемый нормами температурный режим. Методика испытаний изложена ранее в разделе 4.3.2.

Анализ результатов испытаний в таблице 4.4 показывает, что с увеличением расхода цемента Криворожского завода от  $240 \text{ кг/м}^3$  до  $380 \text{ кг/м}^3$  средняя прочность бетона изменяется от 18,2 до 45,3 МПа (рис.4.1), что соответствует классам бетона в диапазоне от С10/12,5 до С28/35.

Анализ результатов испытаний прочности бетонов на Балаклейском цементе марки 500, который предоставлен в таблице 4.5, показывает, что средняя прочность бетона в возрасте 28 суток увеличивается в зависимости от расхода цемента по той же закономерности что и на Криворожском цементе (см. рис. 4.1). При начальном расходе цемента  $240 \text{ кг/м}^3$  прочность на Балаклейском цементе выше на 30%, чем на Криворожском цементе. При расходе цемента  $280 \text{ кг/м}^3$  прочность бетонов практически одинаковая на обоих цементах. Далее при расходах цемента в диапазоне  $310-380 \text{ кг/м}^3$  прочность на Балаклейском цементе ниже на 5-10%, чем на Криворожском цементе.

При этом результаты испытаний прочности на Балаклейском цементе более близки к результатам, полученным ранее при исследовании зависимости «расход цемента-прочность» на цементе Сухоложского завода и мелких песках рис. 4.1.

Все составы на Криворожском цементе подвергались четырем циклам замораживания и оттаивания по третьему ускоренному методу согласно ДСТУ Б В.2.7-47-96 (ГОСТ 10060.2-95), что соответствует марке по морозостойкости F150. Как видно из таблицы 4,6, только начиная с расхода  $310 \text{ кг/м}^3$ , обеспечилась марка по морозостойкости F150.



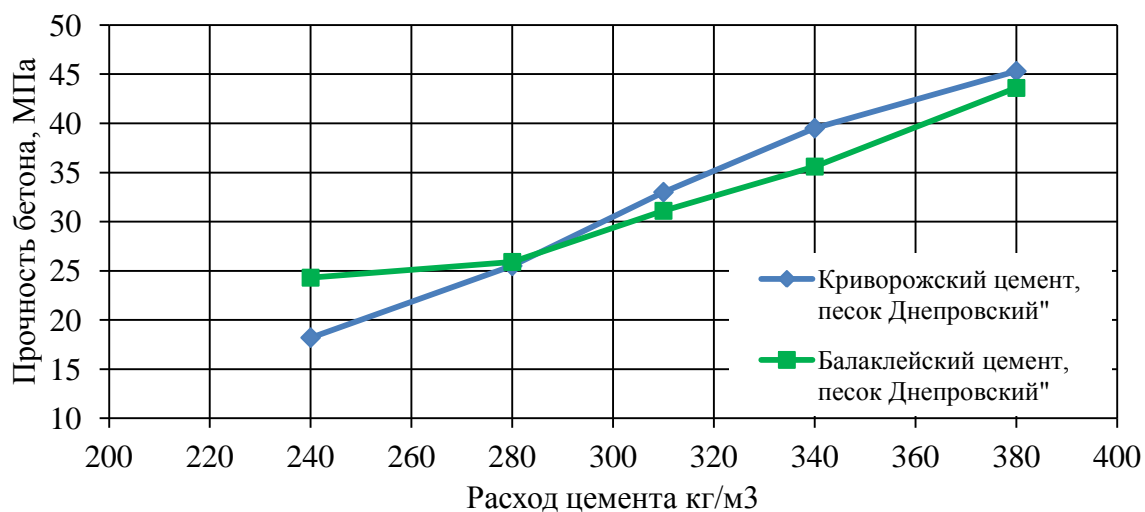


Рис.4.1. Результаты испытаний по определению зависимости прочности бетона от расхода цемента

Таблица 4.6

Результаты испытаний прочности и морозостойкости составов бетона на Криворожском цементе М400

№ п.п.	Серия бетона	Прочность в возрасте 28 сут. ( $R_m$ ), МПа	Класс бетона	Прочность контрольных образцов, ( $R_k$ ), МПа	Прочность основных образцов, ( $R_{oc}$ ), МПа	Проектная марка по морозостойкости	Количество циклов	$R_{oc}/R_k$ , %	Фактическая марка
1	КР 240	18,2	B12,5	17,2	13,1	F150	4	76	нет F150
2	КР 280	25,5	B15	21,5	17,9	F150	4	83	нет F150
3	КР 310	33,0	B25	26,4	26,1	F150	4	99	да F150
4	КР 340	39,5	B30	27,6	29,5	F150	4	107	да F150
5	КР 380	45,3	B35	33,3	35,3	F150	4	106	да F150

Испытания на морозостойкость бетонов на Балаклейском цементе проводились для четырех составов на различное количество циклов в зависимости от расхода цемента. Как видно из таблицы 4.7, при расходе цемента  $240 \text{ кг/м}^3$  марка по морозостойкости F75 не обеспечилась. Проектные составы при расходе цемента 280 и  $380 \text{ кг/м}^3$  обеспечили соответственно марки по морозостойкости F150 и F200 (см. табл.4.7).

Таблица 4.7

*Результаты испытаний прочности и морозостойкости составов бетона на Балаклейском цементе М500*

№ п.п.	Серия бетона	Прочность в возрасте 28 сут. ( $R_m$ ), МПа	Класс бетона	Прочность контрольных образцов, ( $R_k$ ), МПа	Прочность основных образцов, ( $R_{oc}$ ), МПа	Проектная марка по морозостойкости	Количество циклов	$R_{oc}/R_k$ , %	Фактическая марка по морозостойкости
1	Б240	24,3	B15	19,9	18,1	F75	2	91%	нет F75
2	Б280	25,9	B20	20,8	19,9	F150	4	95,7%	да F150
3	Б310	31,1	B22,5	27,6	-	-	-	-	-
4	Б340	35,6	B25	29,6	27,8	F200	5	94%	нет F200
5	Б380	43,6	B30	36,5	35,77	F200	5	98%	да F200

### **4.3 Исследования влияния добавок на набор прочности бетона при отрицательных температурах и его морозостойкость**

#### **4.3.1 Цель и задачи экспериментальных исследований**

Значительное повышение морозостойкости бетона обеспечивается повышением плотности бетона, что достигается в первую очередь понижением плотности бетона. Это возможно достичь путем применения пластификаторов и суперпластификаторов, которые позволяют снизить В/Ц,

сохраняя заданные расходы цемента и заданную пластичность. Применение комплексных добавок позволит также повысить скорость твердения и обеспечить набор прочности бетона при отрицательных температурах без электропрогрева.

Для изучения возможности создания составов бетонов с применением местных мелких песков, которые обеспечивали бы требуемые проектные характеристики по прочности и морозостойкости были запланированы экспериментальные исследования. В ходе испытаний подбирались составы бетона, исходя из их равноподвижности (осадка конуса 2-5 см), и изучалось следующее:

- влияние мелкого песка на изменение прочности и морозостойкости бетона по сравнению с бетонами на крупном песке;
- влияние некоторых добавок на прочностные свойства бетона, приготовленного на мелком песке;
- влияние добавок на набор прочности бетона на мелком песке при отрицательных температурах твердения;
- влияние добавок в бетоны на мелких песках на повышение их морозостойкости.

#### **4.3.2 Материалы для опытных образцов**

Для изготовления опытных образцов используется среднеалюминатный портландцемент Балаклейского завода марки 500. В качестве крупного заполнителя используется щебень Рыбальского карьера, результаты испытаний гранулометрического состава которого приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8

**Результаты испытаний гранулированного состава гранитного щебня  
Рыбальского карьера**

Навеска, г	Наименование остатка	Величина остатка на сите Ø, мм				Прошло через сито Ø2,5	
		25	20	10	2,5	+1,25	-1,25
9981	Частный, г	0	140	6852	2800	31	158
	Частный, %	0	1,4	68,65	28,05		
	Полный, %	0	1,4	70,05	98,1		

Щебень удовлетворяет требованиям ДСТУ Б В.2.7-75-98 [131]: смесь фракций 3-20, плотность 2640 кг/м<sup>3</sup>, насыпная плотность 1440 кг/м<sup>3</sup>; водопотребность 3,2%, пустотность 45,4%.

В качестве мелкого заполнителя используется крупный Вольский песок и мелкий Днепровский песок. Результаты испытаний песков по [85] представлены в таблице 5.2, а основные характеристики песков в таблице 4.9.

Таблица 4.9

**Результаты испытаний зернового состава песка по [85]**

Наименование песка	Навеска, г	Наименование остатка	Величина остатка на сите, мм						Модуль крупности
			2.5	1.25	0.63	0.315	0.14	менее 0,14	
Вольский крупный	5001,5	Частный, г	0.5	10	2585	2385	12	9	2.52
		Частный, %	0.01	0.2	51.68	47.69	0.24	0.18	
		Полный, %	0.01	0.21	51.89	99.58	99.82	100	
Днепровский мелкий	1007,9	Частный, г	4.685	4.6	41.07	317.7	548.3	91.5	1.34
		Частный, %	0.465	0.46	4.08	31.54	54.43	9.04	
		Полный, %	0.465	0.92	5	36.53	90.96	100	

Таблица 4.10

**Характеристики песков**

Показатели песков	Вольский крупный	Днепровский мелкий
Модуль крупности	2,52	1,34
Насыпная плотность в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup>	1448	1586
Плотность песка, кг/м <sup>3</sup>	2650	2645
Водопотребность, %	4,0	8,6
Пустотность, %	45	40

В качестве добавок в бетон использовались добавки системы «Релаксол»: комплексная пластифицирующая и противоморозная добавка «Лидер» на основе ЛСТ, комплексная пластифицирующая и противоморозная добавка «Супер» на основе суперпластификатора С-3 и пластифицирующая добавка ЛСТ.

**4.3.3 Расчет составов бетонов с применением добавок**

При расчете составов исходили из обеспечения класса бетона по прочности С18/22,5 и подвижности смеси с осадкой конуса 2-5 см.

Мелкие пески обладают лучшей водоудерживающей способностью и уменьшают подвижность бетонной смеси. Однако замена крупного песка мелким в большей степени сказывается на осадке конуса и в меньшей степени на удобоукладываемость бетонной смеси. При одинаковой удобоукладываемости бетон на обычном песке имеет осадку конуса 4-5 см, а на мелком песке она составляет 2-3 см. Поэтому расход цемента приняли за постоянную величину (365 кг/м<sup>3</sup>), а одинаковую подвижность смесей для всех составов бетона обеспечивали за счет изменения водоцементного отношения.

Для получения морозостойкого бетона необходимо создать структуру материала, обладающего высокой стойкостью в условиях попеременного замораживания и оттаивания. Для исходного состава использовался цемент ПЦ: М 500 с нормированным минералогическим составом клинкера. Использование такого цемента гарантировало получение заданной морозостойкости.

Определяющее значение для получения морозостойкого бетона имеет ограниченное водоцементное отношение, которое гарантирует образование достаточно плотной, непроницаемой и прочной структуры бетона, стойкого к воздействию попеременного замораживания и оттаивания. Согласно „Руководства” [101] табл. 5, для морозостойкости F 200 водоцементное отношение должно быть не более 0,55. Расход цемента для бетона F 200 подвижности 1-4 см должен составлять не более 375 кг/м<sup>3</sup>.

Используя вышеизложенные требования и расчетно-экспериментальный способ определения состава тяжёлого бетона [88], были рассчитаны составы бетонов без добавок с применением представленных заполнителей.

Используя рекомендации по применению пластифицирующих добавок, полученные составы были откорректированы с учётом пластифицирующего эффекта добавок и уменьшения количества воды. В составах с добавками добивались исходной подвижности бетонных смесей (ОК=2...4 см).

Общеизвестно, что избыточное количество воды резко снижает морозостойкость и прочность бетона, т. к. способствует образованию открытой пористости. Чтобы не передозировать количество воды, полученный состав проверялся с учётом водопотребности песка и щебня. Зная пустотность заполнителей, была произведена проверка состава на наличие избыточной пустотности, которая также могла бы привести к снижению морозостойкости и прочности бетона.

Избыточное количество воды определялось по формуле:

$$\Delta B = B - (Ц * НГ + Вп * П + Вщ * Щ) \quad (4.5)$$

Наличие избыточной пустотности проверялось по формуле:

$$\frac{Щ}{\rho_{щ}} + \frac{П}{\rho_{п}} + \frac{Ц}{\rho_{ц}} + B \geq \left(1 - \frac{\rho_{щ}^H}{\rho_{щ}}\right) + \left(1 - \frac{\rho_{п}^H}{\rho_{п}}\right) \quad (4.6)$$

где: Ц, П, Щ – расход материалов – цемента, песка, щебня, кг;

$\rho_{ц}$ ,  $\rho_{п}$ ,  $\rho_{щ}$  - плотность материалов – цемента, песка, щебня, кг/м<sup>3</sup>;

НГ – нормальная пустота цемента, 1/100;

Вп, Вщ – водопотребность песка и щебня, 1/100;

$\rho_{п}^H$ ,  $\rho_{щ}^H$  - объёмная насыпная масса песка и щебня, кг/м<sup>3</sup>.

Расчёты показали, что избыточной воды в исходном контрольном составе на днепровском речном песке около 8 литров, что составляет 0,8% от общего объёма. Этого достаточно для необходимой подвижности и не сможет значительно влиять на ухудшение свойств.

Избыточной пустотности в составе нет. Поэтому и этот показатель удовлетворён.

Проведён анализ песков и щебней на их пригодность для приготовления плотного состава. Основным показателем был минимальный расход цемента на 1 м<sup>3</sup> при известных пустотностях песка и щебня. Для данного анализа использовался следующий расчёт удельного расхода материалов:

- 1) объём щебня с учётом водопотребности в 1 м<sup>3</sup>;

$$V_{щ}^B = \frac{\frac{1}{\rho_{щ}} + B_{щ}}{\frac{1}{\rho_{щ}^H} + B_{щ}} \quad (4.7)$$

- 2) масса щебня в 1 м<sup>3</sup>;

$$m_{\text{Щ}} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_{\text{Щ}}} + B_{\text{Щ}}} \quad (4,8)$$

- 3) объём песка, входящего в состав на 1 м<sup>3</sup> бетона;

$$V_{\text{П}}^{\text{В}} = \frac{(1 - V_{\text{Щ}}^{\text{В}}) \times \left( \frac{1}{\rho_{\text{п}}} + B \right)}{\frac{1}{\rho_{\text{П}}} + B_{\text{П}}}; \quad (4,9)$$

- 4) масса данного песка в 1 м<sup>3</sup> бетона;

$$m_{\text{П}} = 1 - (V_{\text{П}}^{\text{В}} + V_{\text{Щ}}^{\text{В}}); \quad (4,10)$$

- 5) объём цемента и его масса, входящего в 1 м<sup>3</sup> бетона

$$V_{\text{Ц}}^{\text{В}} = 1 - (V_{\text{П}}^{\text{В}} + V_{\text{Щ}}^{\text{В}}); \quad (4,11)$$

$$m_{\text{Ц}} = \frac{1 - (V_{\text{П}}^{\text{В}} + V_{\text{Щ}}^{\text{В}})}{\frac{1}{\rho_{\text{Ц}}} + \text{НГ}}; \quad (4,12)$$

В результате расчетов получен минимально возможный расход цемента с учётом плотности и водопотребности заполнителей. Для днепровского песка он составил 275 кг/м<sup>3</sup> при В/Ц=0,59, а для вольского - 335 кг/м<sup>3</sup> при В/Ц=0,44. Окончательно согласно рекомендаций [101] принят расход 365 кг/м<sup>3</sup>, который больше в обоих случаях. Составы с таким расходом цемента будут иметь плотную структуру, что положительно отразится на физико-механических свойствах бетонов.



Изготовлено пять серий образцов, основные характеристики которых представлены в таблице 4.11. Из анализа данных, приведенных в таблице 4.11. могут быть сделаны следующие выводы.

Мелкий песок обладает большей водопотребностью по сравнению с крупным Вольским песком, так как для достижения одинаковой подвижности ( $OK=2...3$  см) водоцементное отношение необходимо было увеличить с 0,45 до 0,5. Хотя по утверждению [11] замена крупного песка мелким в большой степени сказывается на осадке конуса, чем на удобоукладываемости. Например, при одинаковой удобоукладываемости бетонной смеси осадка конуса 4...5 см на обычном песке соответствует осадке конуса 2...3 см бетонной смеси на мелком песке.

Введение в бетонную смесь в количестве 1,8% от массы цемента добавок системы «Релаксол» „Лидер” и „Супер”, а также добавки ЛСТ в количестве 0,25% от массы цемента позволило понизить водоцементное отношение при тех же расходах цемента и обеспечении исходной подвижности бетонной смеси. Достигнуто понижение водоцементного отношения до 0,433 с добавкой „Лидер”, до 0,416 с добавкой „Супер” и до 0,45 с добавкой ЛСТ. В составе серии Д-IV (добавка „Супер”) при снижении В/Ц на 16,9% по сравнению с серией Д-I (без добавок) осадка конуса повысилась с 2 см до 5 см. В бетонах серии Д-III и Д-IV наблюдается увеличение плотности бетона за счёт пластификации бетонных смесей добавками „Лидер” и „Супер”.

В серии Д-V с добавкой ЛСТ наблюдается снижение объёмной массы за счёт воздухововлечения до 6%, что должно благоприятно сказаться на морозостойкости бетона.

Было изготовлено пять серий образцов, основные характеристики которых представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11

**Характеристики составов бетона для предварительных испытаний**

Характеристика состава	Серия бетона				
	Д-I	В-II	Д-III	Д-IV	Д-V
ПЦ М500, кг/м <sup>3</sup>	365	365	365	365	365
Песок, кг/м <sup>3</sup>	518	567	586	600	566
Щебень, кг/м <sup>3</sup>	1336	1340	1336	1336	1336
Вода кг/м <sup>3</sup> /В/Ц, Снижение воды	183/0,5	163,1/0,45	158/0,43 13,7%	152/0,416 16,9%	165/0,45 11,4%
Добавки, %	-	-	Лидер, 1,8	Супер, 1,8	ЛСТ, 0,25
объем. масса, кг/м <sup>3</sup>	2401	2395	2428	2410	2297
Воздуховлечение	-	1,6%	0,8%	1,8%	6,0%
Осадка конуса, см	2	3	2	5	3
Прочность, МПа	49,0	47,5	42,9	51,8	44,9

**4.3.4 Результаты испытаний бетонов на прочность и морозостойкость**

Образцы после достижения 28 суточного возраста испытывались на морозостойкость согласно ДСТУ Б В.2.7-47-96 [23] (ГОСТ 10060.2-95) по третьему ускоренному методу с замораживанием до  $-(50-55) \text{ C}$  в 5% растворе хлористого натрия. Для этого использовалась морозильная машина НС 270/75, позволяющая обеспечивать требуемый нормами температурный режим. Образцы предварительно насыщались солевым раствором, а потом подвергались последовательно 5, 8, и 12 циклам замораживания, что соответствует маркам по морозостойкости F200, F300, F400.

Результаты испытаний образцов бетонов на морозостойкость представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12

**Результаты испытаний прочности бетонов, которые испытывали  
замораживание и оттаивание**

Серия	Прочность бетона, МПа			
	28сут.	после 5 циклов	после 8 циклов	после 12 циклов
Д-I	49,0	50,3 (102,7%)+	49,6 (101,1%)+	38,9 (79,4%)-
В-II	47,5	37,8 (79,6%)-	40,1 (84,4%)-	-
Д-III	42,9	41,4 (96,5%)+	40,2 (93,7%)-	35,0 (81,6%)-
Д-IV	51,4	48,9 (95,1%)+	50,2 (97,7%)+	46,4 (90,3%)-
Д-V	44,9	48,1 (107,1%)+	46,3 (103,1%)	42,6(95,0%)+

Примечание: в скобках дано изменение прочности в процентах после соответствующего числа циклов по сравнению с 28-суточной прочностью.

Из анализа данных, приведенных в таблице 4.12, могут быть сделаны следующие выводы.

Мелкий песок обладает большей водопотребностью по сравнению с крупным Вольским песком, так как для достижения одинаковой подвижности ( $OK=2...3$  см) водоцементное отношение необходимо было увеличить с 0,45 до 0,5. Хотя по утверждению [11] замена крупного песка мелким в большой степени сказывается на осадке конуса, чем на удобоукладываемости. Например, при одинаковой удобоукладываемости бетонной смеси осадка конуса 4...5 см на обычном песке соответствует осадке конуса 2...3 см бетонной смеси на мелком песке.

Введение в бетонную смесь в количестве 1,8% от массы цемента добавок системы «Релаксол» „Лидер” и „Супер”, а также добавки ЛСТ в количестве 0,25% от массы цемента позволило понизить водоцементное отношение при тех же расходах цемента и обеспечении исходной подвижности бетонной смеси. Достигнуто понижение водоцементного отношения до 0,433 с добавкой „Лидер”, до 0,416 с добавкой „Супер” и до 0,45 с добавкой ЛСТ. В составе серии Д-IV (добавка „Супер”) при снижении В/Ц на 16,9% по сравнению с серией Д-I (без добавок) осадка конуса

повысилась с 2 см до 5 см. В бетонах серии Д-III и Д-IV наблюдается увеличение плотности бетона за счёт пластификации бетонных смесей добавками „Лидер” и „Супер”.

В серии Д-V с добавкой ЛСТ наблюдается снижение объёмной массы за счёт воздухововлечения до 6%, что благоприятно сказывается на морозостойкости бетона.

Анализ результатов испытаний на морозостойкость показывает, что все составы на мелком Днепровском песке обеспечили марку по морозостойкости F300. Бетон серии Д-V с добавкой ЛСТ практически обеспечил марку F400. Это можно объяснить воздухововлечением 6% в этом составе бетона.



Рис 4.2. Контрольные и основные образцы для испытаний на морозостойкость в процессе водонасыщения



Рис 4.3. Основные образцы в процессе оттаивания в 5-% растворе хлорида натрия

#### **Выводы по разделу 4**

1. Величина расхода цемента оказывает существенное влияние на прочность и морозостойкость составов бетона на различных цементах.
2. При соответствующем расчете и подборе составов бетона на мелком песке в зависимости от расхода цемента можно достигать необходимых проектных классов по прочности и марок по морозостойкости. Бетоны на Балаклейском портландцементе имеют более высокую морозостойкость, чем на Криворожском цементе.
3. При применении мелких песков для получения морозостойких бетонов необходимо корректировать типовые элементные нормы расхода цемента в зависимости от применяемых местных материалов.
4. Для получения оптимальных составов по прочности и морозостойкости на местных строительных материалах (цемент, песок,

щебень) необходимо применять добавки, улучшающие соответствующие свойства бетона.

5. Для приготовления бетонов при соответствующем расчете и подборе их составов можно использовать мелкие пески. При применении пластифицирующих добавок и портландцемента М500 с расходом цемента  $375 \text{ кг/м}^3$  обеспечивается класс бетона по прочности на сжатие выше С25/30. Такие составы бетонов при естественном твердении обеспечивают марку по морозостойкости F300, F400.

6. Применение добавок в бетон на мелком песке позволяет изменять процесс твердения бетона, его структуру и физико-механические свойства. Состав с добавкой ЛСТ в количестве 0,25% от массы цемента обеспечил марку по морозостойкости F400. Комплексные добавки системы «Релаксол» вызывают пластифицирующий эффект и ускоряют процесс твердения бетона. Добавка «Супер» в количестве 1,8% от массы цемента позволила снизить В/Ц с 0,5 до 0,416 при неизменном расходе цемента ( $375 \text{ кг/м}^3$ ) и повышении осадки конуса с 2см до 5см.

## РАЗДЕЛ 5

### МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕРВИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ КАРБОНИЗАЦИИ И МОРОЗНОЙ ДЕСТРУКЦИИ БЕТОНА

#### 5.1 Обеспечение долговечности бетона защитного слоя согласно требованиям норм проектирования при карбонизации и морозной деструкции

В стандарте [55] определены технические требования к защите от коррозии бетонных и железобетонных конструкций для срока эксплуатации 50 лет. При больших сроках эксплуатации конструкций защита от коррозии должна выполняться согласно специальных требований.

Исходными данными для проектирования защиты от коррозии являются:

- 1) характеристика агрессивной среды: вид и концентрация агрессивного вещества, частота и продолжительность агрессивного воздействия;
- 2) условия эксплуатации: температурно-влажностный режим в помещениях, вероятность попадания на строительные конструкции агрессивных веществ, наличие, количество и состав пыли (в особенности пыли, содержащей соли) и др.;
- 3) климатические условия района строительства;
- 4) результаты инженерно-геологических изысканий;
- 5) предполагаемые изменения степени агрессивности среды в период эксплуатации здания или сооружения;
- 6) механические воздействия на конструкцию;
- 7) термические воздействия на конструкцию.

При воздействии на здание или сооружение нескольких различных агрессивных сред необходимо определять соответствующие зоны конкретных агрессивных воздействий и степени агрессивности в этих зонах.

Методы защиты должны назначаться с учетом наиболее агрессивных воздействий. При наличии обоснования по особому проекту назначается защита от комплекса агрессивных воздействий.

Перед началом проектирования отдельных железобетонных конструкций и конструктивных элементов следует определять необходимость и возможность осуществления их первичной защиты от коррозии, заключающаяся в выборе конструктивных решений, материала конструкции или в создании его структуры с тем, чтобы обеспечить стойкость этой конструкции при эксплуатации в соответствующей агрессивной среде.

К мерам первичной защиты относятся:

- 1) применение бетонов, стойких к воздействию агрессивной среды;
- 2) применение добавок, повышающих коррозионную стойкость бетонов и их защитную способность по отношению к стальной арматуре, стальным закладным деталям и соединительным элементам;
- 3) снижение проницаемости бетонов.

При проектировании защиты от коррозии бетонных и железобетонных конструкций следует определять характеристики агрессивной среды и условий, в которых происходят те или иные коррозионные разрушения.

В зависимости от физического состояния агрессивные среды подразделяют на газообразные, жидкие и твердые.

В зависимости от интенсивности агрессивного воздействия на бетонные и железобетонные конструкции среды подразделяют на неагрессивные, слабоагрессивные, среднеагрессивные и сильноагрессивные.

Степень агрессивности характеризуется разрушением бетона и/или потерей защитного действия его по отношению к стальной арматуре за 50 лет эксплуатации и соответственно, для слабоагрессивной, среднеагрессивной и сильноагрессивной распространяется на глубину не более 10 мм, не более 20мм, 20 мм и более.



В зависимости от условий воздействия агрессивных сред на бетон среды подразделяют на классы, которые определяют по отношению к конкретному защищенному от коррозии бетону и железобетону. Классы сред с указанием их индексов по возрастанию агрессивности указаны в таблице 5.1. При одновременном воздействии агрессивных сред, различающихся по индексам, но одного класса, применяют требования, относящиеся к среде с более высоким индексом (если в проекте не указано иное).

Условные обозначения классов сред эксплуатации указывают в проекте в зонах конкретных агрессивных воздействий с увязкой с местом расположения здания или сооружения и ожидаемыми воздействиями.

Степени агрессивного воздействия газообразных сред на конструкции из бетона и железобетона приведены в таблице 5.2, 5.3.

При определении степени агрессивного воздействия среды на конструкции, находящиеся на открытом воздухе и в грунтах выше уровня грунтовых вод влажностной режим следует принимать согласно ДБН В.2.6-31.

В зависимости от степени агрессивности среды следует применять следующие виды защиты или их сочетания:

- 1) в слабоагрессивной среде - первичную и, при необходимости, вторичную;
- 2) в среднеагрессивной среде - первичную и вторичную, осуществляя последнюю путем нанесения защитного покрытия, ограничивающего доступ агрессивной среды к материалу конструкции;
- 3) в сильноагрессивной среде - первичную и вторичную, осуществляя последнюю путем нанесения покрытия, исключая доступ агрессивной среды к материалу конструкции.

В особых экономически обоснованных случаях эксплуатации зданий и сооружений допускается применение специальной защиты бетонов и железобетонов от коррозии.

Таблица 5.1

## Среды эксплуатации

Индекс (класс)	Среда эксплуатации	Примеры сред эксплуатации
<b>1 Среда без признаков агрессии</b>		
ХО	Для бетона без арматуры и закладных деталей: все среды, кроме воздействия замораживания -оттаивания, истирания или химической агрессии  Для железобетона: очень сухая	Внутри сухих помещений
<b>2 Коррозия вследствие карбонизации</b>		
XC1	Постоянно сухая или постоянно сырая среда эксплуатации	Внутри помещений с низкой влажностью.  Бетон постоянно под водой
XC2	Влажная, иногда сухая	Бетонная поверхность подвергается длительному увлажнению.  Большинство фундаментов
XC3	Умеренно влажная (влажные помещения, влажный климат)	Бетон внутри помещений с умеренной влажностью.  Бетон на открытом воздухе, но защищен от дождя.
XC4	Попеременное увлажнение и высушивание	Бетонная поверхность периодически имеет контакт с водой
<b>3. Коррозия, вызванная попеременным замораживанием и оттаиванием</b>		
XF1	Умеренное водонасыщение без антиобледенителей	Вертикальные поверхности зданий и сооружений при действии дождя и мороза
XF2	Умеренное водонасыщение с применением антиобледенителей	Вертикальные поверхности транспортных сооружений

Продолжение табл. 5.1.

XF3	Сильное водонасыщение без антиобледенителей	Горизонтальные поверхности дорог и других сооружений при действии дождя и мороза
XF4	Сильное водонасыщение (в том числе морской водой) с применением антиобледенителей	Горизонтальные поверхности дорог и мостов, ступени наружных лестниц и др.  Зона переменного уровня для морских сооружений при действии мороза

Таблица 5.2

### Классификация агрессивных газовых сред

Зона влажности (по ДБН В.2.6-31) [69]	Группа газов	Степень агрессивного воздействия газообразных сред на конструкции из железобетона
Сухая	А	Неагрессивная
	В	Неагрессивная
Нормальная	А	Неагрессивная
	В	Слабоагрессивная
Влажная	А	Слабоагрессивная
	В	Среднеагрессивная

Таблица 5.3

### Группы агрессивных газов в зависимости от их вида и концентрации

Наименование	Концентрация, мг/м <sup>3</sup> , для групп газов	
	А	В
Углекислый газ	До 2000	Св. 2000

Окончательное решение о виде защиты и материалах для защиты от коррозии бетонных и железобетонных конструкций следует принимать на

основе сравнения технико-экономических показателей различных вариантов технических решений.

При технико-экономических расчетах защитных мероприятий должны быть учтены капиталовложения, средняя годовая стоимость защиты от коррозии бетонных и железобетонных конструкций и стоимость ее периодического восстановления, а также значение вынужденных потерь, вызываемых необходимостью перерыва производственного процесса на время восстановления защиты от коррозии.

Выбор мер защиты должен проводиться на основании технико-экономического сравнения вариантов с учетом прогнозируемого срока службы и расходов, включающих в себя расходы на возобновление вторичной защиты, текущий и капитальный ремонты и другие расходы, связанные с затратами на эксплуатацию конструкций.

Срок службы защиты от коррозии бетонных и железобетонных конструкций с учетом необходимости ее периодического восстановления должен соответствовать сроку эксплуатации здания или сооружения.

Требования к бетону и конструкции должны назначаться, исходя из необходимости обеспечения срока надежной эксплуатации сооружения не менее 50 лет. Для большего или меньшего расчетного срока эксплуатации могут применяться более или менее жесткие требования по граничным характеристикам.

Требования по обеспечению коррозионной стойкости бетона для каждого класса среды эксплуатации должны включать в себя:

- 1) разрешенные виды и марки (классы) составляющих бетона;
- 2) максимально допустимую величину водоцементного отношения;
- 3) минимально необходимое содержание цемента в бетоне;
- 4) минимальное воздухововлечение (в случае необходимости);
- 5) минимальный класс бетона по прочности на сжатие;
- 6) минимальную допускаемую марку бетона по водонепроницаемости и/или максимальный допускаемый коэффициент диффузии.

Требования к бетону железобетонных конструкций в зависимости от классов сред эксплуатации приведены в таблице 5.4.

Требования к бетону железобетонных конструкций, работающих в условиях знакопеременных температур (класс агрессивности среды эксплуатации XF), приведены в таблице 5.4.

Бетоны конструкций зданий и сооружений, подвергающихся воздействию воды и знакопеременных температур, марок по морозостойкости более F150 рекомендуется изготавливать с применением воздухововлекающих или микрогазообразующих добавок, а также комплексных добавок на их основе. Объем вовлеченного воздуха в бетонной смеси для изготовления железобетонных конструкций и изделий должен соответствовать значениям, указанным в ДСТУ Б В.2.7-96 или в нормативных документах на бетоны конкретных видов.

Таблица 5.4

**Требования к бетонам<sup>2)</sup> в зависимости от классов сред эксплуатации**

Требования к бетонам	Классы сред эксплуатации							
	Карбонизация				Замораживание-оттаивание			
	Индексы сред эксплуатации							
	XC1	XC2	XC3	XC4	XF1	XF2	XF3	XF4
Максимальное В/Ц	0,65	0,6	0,55	0,5	0,55	0,55	0,5	0,45
Минимальный класс по прочности В	25	30	37	37	37	30	37	37
Минимальный расход цемента, кг/м <sup>3</sup>	260	280	280	300	300	300	320	340
Минимальное воздухововлечение, %					-	4,0 <sup>1)</sup>	4,0 <sup>1)</sup>	4,0 <sup>1)</sup>
Прочие требования					Заполнитель с необходимой морозостойкостью			

<sup>1)</sup> Для эксплуатации в условиях попеременного замораживания-оттаивания бетон должен быть испытан на морозостойкость. <sup>2)</sup>Значения величин в данной таблице относятся к бетону на цементе ПЦ I (по ДСТУ Б В.2.7-46 [28] ДСТУ Б В.2.7-96-2000 [27]) и заполнителе с максимальной крупностью 20...30 мм. <sup>2)</sup>ДБН В.1.2-14:2009 [112]

Требования к толщине защитного слоя, водонепроницаемости бетона, максимально допустимой величине коэффициента диффузии газа в бетоне при воздействии газообразных агрессивных сред следует устанавливать в соответствии с таблицей 5.6, 5.7.

Толщину защитного слоя тяжелого и легкого бетонов конструкций плоских плит, полок ребристых плит и полок стеновых панелей допускается принимать равной 15 мм для слабоагрессивной и среднеагрессивной степени воздействия газообразной среды и 20 мм - для сильноагрессивной степени, независимо от класса арматурных сталей.

Толщину защитного слоя монолитных конструкций следует принимать на 5 мм более значений, указанных в таблице 5.5.

Таблица 5.5

**Требования к железобетонным конструкциям, эксплуатирующимся при воздействии газообразных агрессивных сред**

Классы арматурной стали <sup>1)</sup>	Минимальная толщина защитного слоя бетона <sup>2)</sup> , мм (над чертой), и марка бетона по водонепроницаемости (под чертой) в среде		
	слабо-агрессивной	средне-агрессивной	сильно-агрессивной
Конструкции без предварительного напряжения			
A240C, A400C, A500C, B500 <sup>3)</sup>	<u>20</u> W4	<u>20</u> W6	<u>25</u> W8

<sup>1)</sup> Обозначения классов арматуры приняты в соответствии с ДБН В.2.6-98 и ДСТУ ENV 10080 [115]. Классы арматуры, методы их изготовления и эксплуатационные характеристики принимаются в соответствии с нормативными документами на стали.

<sup>2)</sup> Толщина защитного слоя для сборных железобетонных конструкций. Для монолитных конструкций толщину защитного слоя следует увеличивать на 5 мм.

<sup>3)</sup> Класс B500 включает арматуру по ДСТУ ENV 10080 B500A и B500B.

Таблица 5.6

**Требования к защитному слою бетона железобетонных конструкций,  
эксплуатирующихся при воздействии газообразных агрессивных сред**

Концентрация углекислого газа в воздухе, мг/м <sup>3</sup>	Толщина защитного слоя, мм	Максимально допустимая величина коэффициента диффузии $D \cdot 10^4$ , см <sup>2</sup> /с, углекислого газа в бетоне железобетонных конструкций со сроком эксплуатации, лет		
		20	50	100
До 600	10	1,14	0,45	0,23
	15	2,57	1,03	0,51
	20	4,57	1,83	0,91
От 600 до 6000	10	0,26	0,10	0,05
	15	0,46	0,18	0,09
	20	0,71	0,28	0,14
Примечание - Диффузионную проницаемость бетона для углекислого газа определяют по ДСТУ Б В.2.6-XX2 [68].				

В нормах [53] существенное внимание уделяется мероприятиям по обеспечению долговечности железобетонных конструкций. При этом основные требования предъявляются к бетону защитного слоя.

Защита стальной арматуры от коррозии зависит от плотности, качества и толщины защитного слоя бетона и образования трещин. Плотность и качество защитного слоя достигается контролем максимального водоцементного отношения и минимального количества цемента (EN 206-1) и может зависеть от минимального класса прочности бетона.

Для достижения необходимого проектного срока службы конструкции должны использоваться соответствующие меры для защиты элементов конструкций от негативного воздействия окружающей среды. Вопросы

долговечности должны учитываться при выполнении следующих стадий проекта:

- выбор конструктивной схемы,
- выбор материала,
- конструирование,
- возведение,
- контроль качества,
- проверка,
- специальные мероприятия (например, использование нержавеющей стали, защитные покрытия, катодная защита).

Минимальный защитный слой бетона должен обеспечивать:

- безопасную передачу усилий сцепления;
- защиту арматурной стали от коррозии (долговечность);
- необходимую огнестойкость (см. EN 1992-1-2).

Необходимо выбирать большую из величин, что удовлетворяют условиям относительно сцепления и влияния условий окружающей среды:

$$c_{min} = \max\{c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ мм}\}$$

где:  $c_{min,b}$  - минимальный защитный слой по требованию сцепления;

$c_{min,dur}$  - минимальный защитный слой по требованию условий среды;

$c_{min,\gamma}$  - учет составляющей безопасности;

$c_{dur,st}$  - уменьшение минимального слоя при использовании нержавеющей стали;

$c_{dur,add}$  - уменьшение минимального слоя при дополнительной защите .

Минимальные величины защитного слоя для обычной и предварительно напряженной арматуры в обычном тяжелом бетоне с учетом классов влияния среды устанавливаются через  $c_{min,dur}$ .



Рекомендуется принимать класс конструкции (проектный срок службы 50 лет) S4 при рекомендуемых классах бетона, предоставленных в табл. 5.8 и рекомендованных вариантах классов конструкций, приведенных в табл. 5.8. Минимальный рекомендуемый класс конструкций - S1.

Защитный слой  $c_{min, \gamma}$  необходимо увеличивать на дополнительную составляющую безопасности. Рекомендованная величина 0 мм.

При применении нержавеющей стали или принятия других специальных мероприятий минимальный защитный слой может уменьшаться на  $c_{dur, st}$ . В таких случаях необходимо учитывать влияние всех соответствующих характеристик материалов, включительно со сцеплением. Рекомендуемая величина без дополнительного определения 0 мм.

Для бетона с дополнительной защитой (например, покрытием), минимальный защитный слой может уменьшаться на  $c_{dur, add}$ . Рекомендуемая величина без дополнительного определения 0 мм.

Таблица 5.7

### Рекомендованная классификация конструкций

Классы конструкций				
Критерий	Классы влияния среды			
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4
Проектный срок службы 100 лет	Увеличение класса на 2			
Класс прочности <sup>1)2)</sup>	$\geq C30/37$		$\geq C35/45$	$\geq C40/50$
	Уменьшение класса на 1			
Элементы с геометрией плит (строительные процессы не влияют на расположение арматуры)	Уменьшение класса на 1			
Обеспечен специальный контроль качества изготовления бетона	Уменьшение класса на 1			
Примечания: <sup>1)</sup> Считается, что существует связь между классом прочности и В/Ц отношением. Для достижения низкой водопроницаемости может подбираться специальная смесь (тип цемента, значение В/Ц, мелкие заполнители).				
<sup>2)</sup> Границу можно снижать на 1 класс прочности, если имеет место втягивание воздуха более 4%.				

Таблица 5.8

**Величины минимального защитного слоя по требованиям  
долговечности для обычной арматурной стали, согласно EN 10080**

Требования окружающей среды к $c_{min, dur}$ , мм				
Класс конструкций	Классы влияния среды			
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4
S1	10	10	10	15
S2	10	10	15	20
S3	10	10	20	25
S4 (долговечность 50 лет)	10	15	25	30
S5	15	20	30	35
S6 (долговечность 100 лет)	20	25	35	40

Когда предполагается возможность влияния на бетон замораживания / оттаивания (класс XF), необходимо уделить особое внимание составу бетона (раздел 6 EN 206-1). Защитный слой, принятый в соответствии с вышеперечисленными рекомендациями, как правило, достаточен в таких случаях.

При определении номинального защитного слоя  $c_{nom}$  к его минимальному значению необходимо добавить допуск на отклонение  $\Delta c_{dev}$ . Необходимый минимальный защитный слой необходимо увеличить на абсолютное значение допустимого отрицательного отклонения. Рекомендованное значение 10 мм.

Выбор необходимой долговечности бетона для защиты арматуры от коррозии и стойкости к коррозии бетона требует подбора состава бетона. В результате бетон может иметь более высокую прочность на сжатие, чем необходимо по конструктивному расчету. Связь между классами прочности бетона и классами воздействия среды (таблица 5.9) может выражаться через рекомендованные классы прочности.

Таблица 5.9

**Рекомендованные классы прочности**

Классы влияния							
Риск отсутствует	Коррозия, вызванная карбонизацией				Влияние замораживания/оттаивания		
X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XF1	XF2	XF3
C12/15	C20/25	C25/30	C30/37		C30/37	C25/30	C30/37

### 5.2 Метод расчета долговечности бетона защитного слоя при карбонизации и морозной деструкции

#### Исходные данные:

- Режим эксплуатации – температурная зона, влажностная зона, условия эксплуатации, количество циклов замораживания/оттаивания;
- срок службы конструкций;
- концентрация агрессивных газов;
- проектный класс бетона по прочности.

#### Варьируемые параметры:

- толщина защитного слоя;
- состав бетона (цемент, песок, щебень, вода, добавки);
- активность цемента.

#### Расчет состава бетона:

Исходными параметрами при подборе состава бетона, как известно, является прочность бетона и подвижность бетонной смеси. Если прочность бетона конструкций задана в проекте, то она является нижним ограничением, которое необходимо учитывать при подборе состава бетона по критерию долговечности.

В зависимости от требуемой прочности бетона  $R_b^{req}$  определяется водоцементное отношение (W/C). При этом используется известная зависимость для прочности бетона:

$$R_b = A R_c ((C/W) - b), \quad (5.1)$$

где:  $R_b$  – прочность бетона на сжатие;

$R_c$  – активность цемента;

(C/W) – цементно-водное отношение;

A, b – эмпирические коэффициенты. Для бетона на щебне  $A = 0,55$ ;  $b = 0,5$ .

$$R_b = R_b^{req} \quad (5.2)$$

$$(C/W) = R_b / (A R_c) + b, \quad (5.3)$$

$$(W/C) = 1 / (C/W) \quad (5.4)$$

где:  $R_b^{req}$  – требуемая прочность бетона на сжатие;

Назначается марка бетона по морозостойкости:

$$F \geq F^{req}, \quad (5.5)$$

где:  $F^{req}$  – требуемая марка бетона по морозостойкости;

Определить требуемую марку по морозостойкости с учетом или без учета применения воздухововлекающей добавки возможно с использованием полиномиальной модели предложенной в [44].

$$F^{req} = 380 - 68X_1 + 162X_2 + 148X_1 - 27X_4 + 22X_5 + 63X_6 - 39(X_2)^2 + \\ + 30X_1X_2 + 27X_2X_3 + 24X_3X_6 \quad (5.6)$$

где:  $X_1 = (B - 180)/30$ ;  $X_2 = (Ц/В - 2,1)/0,8$ ;  $X_3 = (СНП - 0,06)/0,06$ ;  $X_4 = (НГ - 27,2)/2,6$ ;  $X_5 = (R_{ц} - 41,2)/6,7$ ;  $X_6 = (\lg\tau - 1,86)$ .

В приведенных выше кодированных значений факторов  $В$  – расход воды, л/м<sup>3</sup>; Ц/В – цементно-водное отношение; НГ – нормальная плотность цемента, %;  $R_{ц}$  – активность цемента, МПа;  $\tau$  – длительность твердения бетона, сут.; СНП- воздухововлекающая добавка.

Если не вводится воздухововлекающая добавка, то:

При заданной подвижности бетонной смеси (жесткости) и крупности гравия  $d_g$  определяется расход воды  $W$  для пластичных и жестких бетонных смесей по аналитическим зависимостям, полученным путем аппроксимации табулированных и графических данных, содержащихся в руководстве [91]:

$$\left. \begin{aligned} W &= 176.4 + 5.76 \cdot CS - 0.166 \cdot CS^2, \text{ если } d_g = 10 \text{ мм;} \\ W &= 162 + 5.464 \cdot CS - 0.125 \cdot CS^2, \text{ если } d_g = 20 \text{ мм;} \\ W &= 148.3 + 4.786 \cdot CS - 0.08 \cdot CS^2, \text{ если } d_g = 40 \text{ мм;} \\ W &= 133 + 5.286 \cdot CS - 0.134 \cdot CS^2, \text{ если } d_g = 70 \text{ мм;} \end{aligned} \right\} (5.7)$$

где  $CS$  - осадка конуса, см;

$$\left. \begin{aligned} W &= 189.47 - 1.983 \cdot H + 0.033 \cdot H^2, \text{ если } d_g = 10 \text{ мм;} \\ W &= 173.25 - 1.748 \cdot H + 0.0257 \cdot H^2, \text{ если } d_g = 20 \text{ мм;} \\ W &= 157.6 - 1.581 \cdot H + 0.0228 \cdot H^2, \text{ если } d_g = 40 \text{ мм;} \end{aligned} \right\} (5.8)$$

где  $H$  - жесткость бетонной смеси, определенная по ГОСТ 10181-76, с.

Для жесткости бетонной смеси, определенной по техническому вискозиметру, получена зависимость:

$$\left. \begin{aligned} W &= 189.51 - 0.654 \cdot H + 0.0036 \cdot H^2, \text{ если } d_g = 10 \text{ мм;} \\ W &= 173.55 - 0.586 \cdot H + 0.0028 \cdot H^2, \text{ если } d_g = 20 \text{ мм;} \\ W &= 158.27 - 0.548 \cdot H + 0.0027 \cdot H^2, \text{ если } d_g = 40 \text{ мм.} \end{aligned} \right\} (5.9)$$

Расход цемента, крупного и мелкого заполнителей определяется в соответствии с [111] по формулам:

$$Cem = W:W/C, \quad (5.10)$$

$$G = \frac{1000}{\frac{\alpha \cdot V_g}{\gamma_g} + \frac{1}{\rho_g}} \quad (5.11)$$

$$S = \left( 1000 - \frac{Cem}{\rho_{cem}} - W - \frac{G}{\rho_g} \right) \cdot \rho_s, \quad (5.12)$$

где  $Cem$ ,  $G$ ,  $S$  - соответственно, расход цемента, гравия, песка,  $\text{кг/м}^3$ ;

$V_g$  - пустотность гравия (щебня);

$\rho_{cem}$ ,  $\rho_s$ ,  $\rho_g$  - соответственно, плотности цемента, песка и гравия,  $\text{кг/л}$ ;

$\gamma_g$  - насыпная плотность гравия,  $\text{кг/л}$ ;

$\alpha$  - коэффициент раздвижки, зависящий от водоцементного отношения  $W/C$  и расхода цемента  $Cem$ . Значения  $\alpha$  для пластичных бетонных смесей приведены в табл.16 [91], которая для удобства использования преобразована при помощи интерполяционного многочлена Лагранжа в аналитическую зависимость:

$$\begin{aligned} \alpha = & \frac{(Cem - 300) \cdot (Cem - 350) \cdot (Cem - 400) \cdot (Cem - 500) \cdot (Cem - 600)}{-6,5625 \cdot 10^{10} \cdot (0,6 \cdot W / C + 0,9)} + \\ & + \frac{(Cem - 250) \cdot (Cem - 350) \cdot (Cem - 400) \cdot (Cem - 500) \cdot (Cem - 600)}{1,5 \cdot 10^{10} \cdot (0,6 \cdot W / C + 1)} + \\ & + \frac{(Cem - 250) \cdot (Cem - 300) \cdot (Cem - 400) \cdot (Cem - 500) \cdot (Cem - 600)}{-9,735 \cdot 10^9 \cdot (0,6 \cdot W / C + 1,08)} + \\ & + \frac{(Cem - 250) \cdot (Cem - 300) \cdot (Cem - 350) \cdot (Cem - 500) \cdot (Cem - 600)}{1,5 \cdot 10^{10} \cdot (0,6 \cdot W / C^2 + 0,9 \cdot W / C + 0,86)} + \\ & + \frac{(Cem - 250) \cdot (Cem - 300) \cdot (Cem - 350) \cdot (Cem - 400) \cdot (Cem - 600)}{-7,5 \cdot 10^{10} \cdot (-2 \cdot W / C^2 + 2,2 \cdot W / C + 0,96)} + \\ & + \frac{(Cem - 250) \cdot (Cem - 300) \cdot (Cem - 350) \cdot (Cem - 400) \cdot (Cem - 500)}{5,25 \cdot 10^{11} \cdot (0,4 \cdot W / C + 1,4)}; \end{aligned} \quad (5.13)$$

При расходе цемента свыше  $400 \text{ кг/м}^3$  расход воды необходимо увеличить на 1 л на каждые 10 кг цемента сверх 400 кг, согласно [111]:

$$W = W + n, \text{ если } 400+10n \leq x_1 < 400+10(n+1); \quad (5.14)$$

$$n = 1, 2, \dots, 20$$

где:  $n$  - количество дополнительной воды, л.

Время карбонизации бетона защитного слоя арматуры железобетонных конструкций (долговечность)  $\tau_{carb}$  определяется из выражений:

$$a = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_{ij} \quad (5.15)$$

$$y_{ij} = \sqrt{\frac{2A_{j-1}(F) D_{ij}(T, \varphi) c \tau_i}{m_0}}$$

$$A_{j-1}(F) = \frac{1}{(1-p)^{Fj-1}}$$

$$D_{ij}(T, \varphi) = D_0 \cdot \xi_{Tij},$$

$$D_0 = 10^{-4} (10^{(W/C - 0,4)/0,27} + 0,033(\varphi_{ij} - 60)(10^{(W/C - 0,7)/0,2} - 10^{(W/C - 0,4)/0,27})), \quad (5.16)$$

$$\xi_{Tij} = \left( \frac{273 + t_i}{273} \right)^{1,75};$$

$$m_0 = f p_c (1 - p_a) C_{em} V \text{ Mg/M}_{CaO};$$

где:  $a$  – величина защитного слоя бетона;

$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_{ij}$  - глубина карбонизации бетона защитного слоя арматуры за  $j$  календарных годов;

$y_{ij}$  – глубина карбонизации бетона защитного слоя для  $i$ -го месяца с положительной температурой в  $j$ -том году определяется согласно зависимости (2.18);

- $D_{ij}(T, \varphi)$  - эффективный коэффициент диффузии углекислого газа;
- $C$  – концентрация углекислого газа;
- $\tau_i$  – время (продолжительность  $i$ -го месяца);
- $m_0$  – реакционная емкость бетона;
- $A_{j-1}(F)$  - коэффициент проницаемости;
- $D_0$  – эффективный коэффициент диффузии газа в бетоне при  $t=0^0C$ ;
- $\xi_{Tij}$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры в  $i$  – м месяце  $j$  – го года на эффективный коэффициент диффузии газа.
- $W/C$  - водоцементное отношение;
- $\varphi_{ij}$  - относительная влажность воздуха в  $i$ - м месяце  $j$  – го года, %.
- $t_i$  - температура окружающей среды в  $i$ - м месяце, град. С.
- $r_c$  - содержание основных оксидов в цементном клинкере в пересчете на CaO в относительных величинах по массе;
- $r_a$  - содержание активных добавок в цементе.
- $f$  - степень нейтрализации бетона, равная отношению количества основных оксидов, прореагировавших с газом, к общему их количеству в цементе;
- $S_{em}$  - расход цемента;
- $V$  - объем 1 г газа:  $V = V_m/M_g$ ;
- $V_m$ - объем 1 моля газа;
- $M_g$  - молекулярная масса газа;
- $M_{CaO}$  - молекулярная масса CaO.

Среднемесячная температура воздуха выражается зависимостью (2.1):

$$T(m)=a \cdot \sin(bm-c)+d,$$

Для условий г. Днепропетровска зависимость (2.1) принимает вид:

$$T(m)=14,213\sin(0,52m-2,095)+8,44$$



### 5.3 Прогнозирование долговечности бетона защитного слоя при карбонизации и морозной деструкции

С целью анализа нормативных значений бетона защитного слоя согласно ДСТУ – Н Б EN 1992 – 1-1: 2010 и ДСТУ Б В.2.6-145:2010 на соответствие реальным условиям эксплуатации для г. Днепропетровска, был выполнен расчет глубины нейтрализации защитного слоя бетона конструкций здания в условиях карбонизации и морозной деструкции. (таблица 5.10). Расчет срока карбонизации бетона был выполнен при концентрации углекислого газа в воздухе в 0,03% и относительной влажности воздуха 62-87%.

Для принятых исходных данных был выполнен прогноз глубины нейтрализации защитного слоя в условиях карбонизации и морозной деструкции согласно методике, описанной в разделе 5.2. Результаты расчетов приведены в табл. 5.11 и на рис 5.1.

Таблица 5.10

#### Исходные данные для расчета

Класс бетона, МПа	C30/37
Марка цемента	M500
Расход цемента, кг/м <sup>3</sup>	300
В/Ц	0,5
Циклы попеременного замораживания и оттаивания	55
Требуемая морозостойкость	F100
Концентрация агрессивных газов, мг/м <sup>3</sup>	2000 <sup>(1)</sup>
Срок службы конструкции, лет	50
Толщина защитного слоя	20 <sup>(2)</sup> , 30 <sup>(3)</sup>
<sup>(1)</sup> – для углекислого газа; <sup>(2)</sup> – рекомендуемая величина защитного слоя по ДСТУ Б В.2.6-145:2010; <sup>(3)</sup> - рекомендуемая величина защитного слоя по ДСТУ – Н Б EN 1992 – 1-1: 2010.	

Таблица 5.11

**Результаты расчета глубины нейтрализации защитного слоя  
бетона**

Бетон класса С30/37	Продолжительность эксплуатации, лет									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Глубина карбонизации, мм	2,43	4,86	7,29	9,72	12,15	14,58	17,01	19,44	21,87	24,30

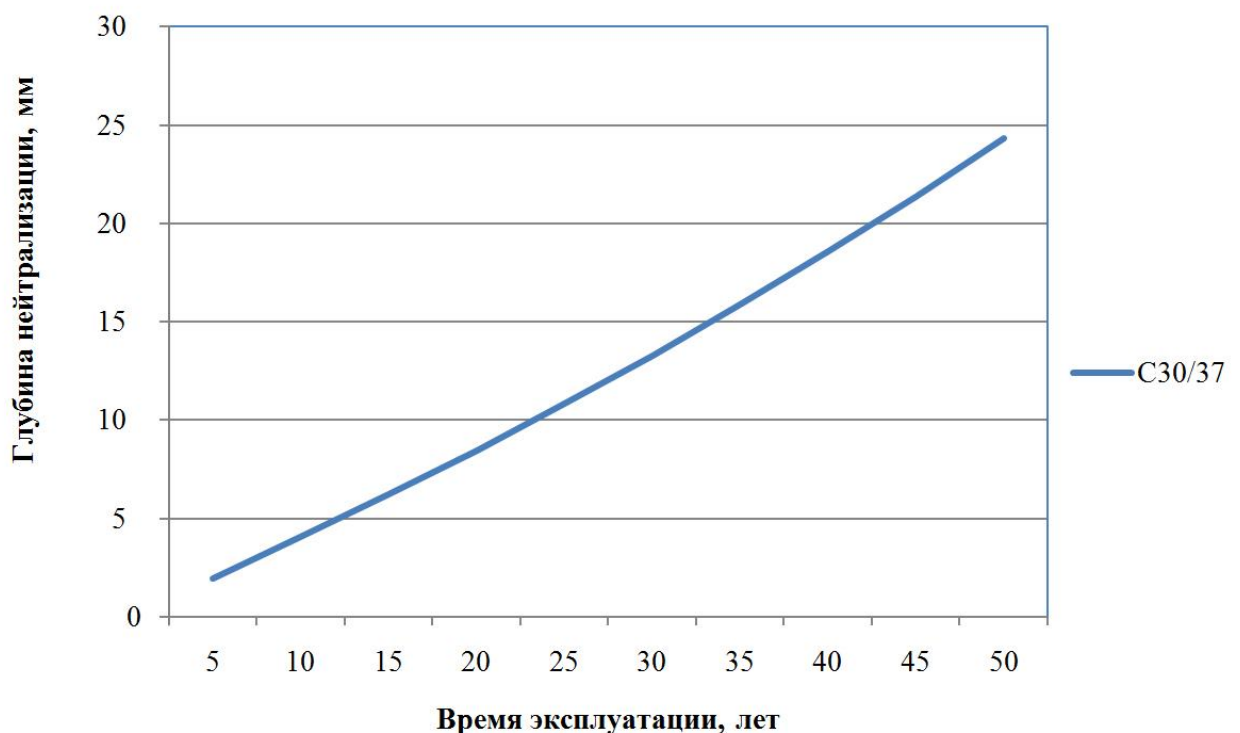


Рис. 5.1. Результаты расчета глубины нейтрализации защитного слоя бетона

Как следует из данных, представленных в таблице 5.11 и рис. 5.1 необходимая долговечность бетона 50 лет, в условиях эксплуатации в г. Днепропетровске, обеспечивается при толщине защитного слоя 25 мм.

Для анализа соответствия требованиям ДСТУ - Н Б EN 1992 - 1-1: 2010 и ДСТУ Б В.2.6-145:2010 прогнозные значения глубины карбонизации бетона в реальных условиях эксплуатации полученные данные сведены в табл. 5.12.

Таблица 5.12

**Сравнительный анализ величины защитного слоя для обеспечения долговечности бетона 50 лет**

Нормативный документ	С30/37		Запас долговечности
	Величина защитного слоя по нормам, мм	Результаты расчета глубины карбонизации по разработанной методике, мм	
ДСТУ Б В.2.6-145:2010	20	24,3	-22%
ДСТУ – Н Б EN 1992 – 1-1:2010	30		+24%

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что действующие нормы не полностью учитывают все возможные факторы при выборе величины защитного слоя. Так например, величина защитного слоя 20 мм по ДСТУ Б В.2.6-145:2010 является недостаточной для обеспечения необходимой долговечности 50 лет. А величина защитного слоя 30 мм по ДСТУ – Н Б EN 1992 – 1-1:2010 является избыточной для обеспечения долговечности, равной 50 лет.

### **Выводы по разделу 5**

1. Приведен алгоритм обеспечения долговечности бетона защитного слоя согласно требованиям норм проектирования при карбонизации и морозной деструкции, который базируется на рецептурном подходе.
2. Разработан количественный метод проектирования параметров первичной защиты бетона защитного слоя железобетонных конструкций при

карбонизации и морозной деструкции, который учитывает как внутренние характеристики бетона (проницаемость, реакционная емкость, зависящая от химико-минералогического состава цемента, содержание цемента, относительное содержание оксида кальция в цементе, количество активных добавок, водоцементное отношение, морозостойкости бетона ), так и параметры внешних воздействий (концентрация агрессивного газа в воздушной среде, влажность, температура, количество циклов попеременного замораживания и оттаивания).

3. Для климатических условий г. Днепропетровска выполнен прогноз глубины карбонизации бетона защитного слоя при регламентируемых нормами параметрах бетона. Проведено сопоставление требований нормативных документов по назначению величины защитного слоя и прогнозных значений глубины карбонизации бетона. Установлено, что при назначении защитного слоя по нормам ДСТУ Б В.2.6-145:2010 получают недостаточную долговечность, меньше регламентируемого срока службы равного 50 лет. При назначении защитного слоя по нормам ДСТУ – Н Б EN 1992 – 1-1:2010 получают избыточную надежность и долговечность защитного слоя бетона более 50 лет.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Для оценки атмосферных климатических воздействий на бетон защитного слоя железобетонных конструкций проведены статистические исследования концентрации агрессивных кислых газов в воздушной среде, температуры и влажности, а также количества циклов замораживания и оттаивания бетона для условий города Днепропетровска.

Исходя из гипотезы о равенстве глубины нейтрализации бетона для равной степени агрессивности газовой среды и имеющихся экспериментальных данных предложены зависимости для расчета эффективных коэффициентов диффузии кислых газов, вызывающих нейтрализацию бетона.

Получена зависимость для расчета реакционной емкости бетона при его карбонизации, учитывающий содержание активных добавок в цементе.

2. На основе обработки экспериментальных данных, а также обобщения теоретических представлений о процессе нейтрализации бетона и определяющих факторов внешней среды (концентрации агрессивного газа в воздушной среде, влажности, температуры, количества циклов попеременного замораживания и оттаивания) и внутренних параметров бетона (содержания цемента, относительного содержания оксида кальция в цементе, количества активных добавок, водоцементного отношения, морозостойкости бетона) получены зависимости для расчета кинетики нейтрализации бетона защитного слоя в реальных условиях атмосферных климатических воздействий.

Получены теоретические оценки долговечности бетона защитного слоя железобетонных конструкций различной толщины, с различным содержанием цемента и водоцементным отношением. Данные свидетельствуют о возможной нейтрализации бетона защитного слоя и депассивации арматуры до истечения нормативного срока службы железобетонных конструкций 50 лет.

3. Результаты лабораторных исследований, натурных обследований и численных расчетов глубины карбонизации бетона в зависимости от определяющих факторов подтверждают адекватность предложенного метода расчета кинетики нейтрализации бетона защитного слоя в условиях атмосферных климатических воздействий.

4. Проведено исследование морозостойкости бетонов на мелких Днепровский песках. Установлено, что при применении мелких песков для получения морозостойких бетонов необходимо корректировать типовые элементные нормы расхода цемента в зависимости от применяемых местных материалов.

Для получения оптимальных составов по прочности и морозостойкости на мелких песках необходимо применять добавки, улучшающие соответствующие свойства бетона.

При применении пластифицирующих добавок и портландцемента М500 с расходом цемента  $375 \text{ кг} / \text{м}^3$  обеспечивается класс бетона по прочности на сжатие более С30/37. Такие составы бетонов при естественном твердении обеспечивают марку по морозостойкости F300, F400.

Применение добавок в бетон на мелком песке позволяет изменять процесс твердения бетона, его структуру и физико-механические свойства. Состав с добавкой ЛСТ в количестве 0,25% от массы цемента обеспечил марку по морозостойкости F400. Комплексные добавки системы «Релаксол» вызывают пластифицирующий эффект и ускоряют процесс твердения бетона. Добавка «Супер» в количестве 1,8% от массы цемента позволила снизить В/Ц с 0,5 до 0,416 при неизменном расходе цемента ( $375 \text{ кг} / \text{м}^3$ ) и повышении осадки конуса с 2 см до 5 см.

5. Разработан метод проектирования первичной защиты при карбонизации и морозной деструкции. На основе экспериментальных данных получено выражение для расчета эффективного коэффициента диффузии углекислого газа, как функции водоцементного отношения и относительной влажности воздуха.

Согласно результатам расчета по указанному методу получены результаты, которые подтверждаются фактическими замерами глубины нейтрализации защитного слоя на эксплуатируемых конструкциях.

б. Для климатических условий г. Днепропетровска выполнен прогноз глубины карбонизации бетона защитного слоя при регламентируемых нормами параметрах бетона. Проведено сопоставление требований нормативных документов по назначению величины защитного слоя и прогнозных значений глубины карбонизации бетона. Установлено, что при назначении защитного слоя по нормам ДСТУ Б В.2.6-145:2010 получают недостаточную долговечность, меньше регламентируемого срока службы равного 50 лет. При назначении защитного слоя по нормам ДСТУ – Н Б EN 1992 – 1-1:2010 получают избыточную надежность и долговечность защитного слоя бетона более 50 лет.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Авершина Н. М. Закономерности кинетики коррозии и стойкость бетона с активным заполнителем : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Авершина Наталья Максимовна. – Воронеж, 1995. – 210 с.
2. Агаджанов В. И. Экономика повышения долговечности и коррозионной стойкости строительных конструкций / В. И. Агаджанов. – Москва : Стройиздат, 1988. – 144 с.
3. Адамович А. Н. Водонепроницаемость цементного камня и раствора. «Известия ВНИИГ им. Веденеева», том 56, 1956.
4. Алексеев С. Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С. Н. Алексеев, Н. К. Розенталь. – Москва : Стройиздат, 1976. – 205 с.
5. Алексеев С. Н. Проблемы нормирования защиты конструкций от коррозии / С. Н. Алексеев // Бетон и железобетон. – 1988. – № 11. – С. 21-22.
6. Алексеев С. Н., Перспективы использования методов первичной защиты конструкций / С. Н. Алексеев, В. Ф. Степанова, В. В. Яковлев // Бетон и железобетон. – 1990. – № 3. – С. 13-15.
7. Андреев М. В. Конспект лекций по курсу «Основы экологии» / М. В. Андреев. – Днепропетровск, 2002. – 128 с.
8. Анваров. А. Р. Обоснование достаточности средств первичной защиты для достижения проектной долговечности железобетона в естественных условиях эксплуатации : автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. тех. наук : 05.23.01 / Анваров Аскар Рамилевич. – Уфа : УГНТУ, 2007. – 22 с.
9. Бабушкин В. И. Физико-химические процессы коррозии бетона и железобетона / В. И. Бабушкин. – Москва : Стройиздат, 1968. – 187 с.
10. Баженов Ю. М. Способы определения состава бетона различных видов / Ю. М. Баженов. – Москва : Стройиздат, 1975. – 268 с.



11. Баженов Ю. М. Технология бетона : учеб. пособие для вузов / Ю. М. Баженов. – Москва : Высшая школа, 1987. – 415 с.
12. Балалаев Г. А. Защита строительных конструкций от коррозии : учеб. пособие / Г. А. Балалаев, В. М. Медведев, Н. А. Мощанский. – Москва : Стройиздат, 1966. – 224 с.
13. Батраков В. Г. Повышение долговечности бетона с добавками кремнийорганических полимеров / В. Г. Батраков. – Москва : Стройиздат, 1968. – 135 с.
14. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. ДБН В.2.6-98:2009. – [Действующий от 2011-07-01]. – Киев : Минстрой Украины, 2011. – 73 с. – (Национальные стандарты Украины).
15. Бетонные и железобетонные конструкции: СНиП 2.03.01–84\* / Госстрой СССР. – Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 120 с.
16. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. ГОСТ 26633-2012. – [Действующий от 2014-01-01]. – Москва : Минстрой России, 2012. – 24 с. – (Национальные стандарты Российской Федерации).
17. Бетоны. Правила контроля прочности. ДСТУ Б В.2.7-224:2009. – [Действующий от 2010-09-01]. – Киев : Минстрой Украины, 2009. – 26 с. – (Национальные стандарты Украины).
18. Бетоны. Правила контроля прочности механическими методами неразрушающего контроля. ДСТУ Б В.2.7-220:2009. – [Действующий от 2010-09-01]. – Киев : Минстрой Украины, 2010. – 34 с. – (Национальные стандарты Украины).
19. Бетоны. Правила контроля прочности по образцам отобраным из конструкций. ДСТУ Б В.2.7-223:2009. – [Действующий от 2009-12-22]. – Киев : Минстрой Украины, 2009. – 14 с. – (Национальные стандарты Украины).
20. Бетоны. Правила контроля прочности по контрольным образцам. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. – [Действующий от 2009-12-22]. – Киев : Минстрой Украины, 2009. – 43 с. – (Национальные стандарты Украины).

21. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости. ГОСТ 12730.5–84 / Госстрой СССР. – Москва : Стройиздат, 1985. – 34 с.
22. Бетоны тяжелые. Технические условия. ДСТУ Б В.2.7-43-96. – [Действующий от 2006-07-01]. – Киев : Минстрой Украины, 1996. – 25 с. – (Национальные стандарты Украины).
23. Бетоны. Методы определения морозостойкости : ГОСТ 31384-2008) : ДСТУ Б В.2.7-47-96. – [Действующий от 1995-11-22]. – Киев : Минстрой Украины, 1996. – 13 с. – (Национальные стандарты Украины).
24. Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование : учеб. пособ. для студ. высш. учеб. заведений / О. П. Мелехова, Е. И. Егорова, Т. И. Евсеева и др. ; под ред. О. П. Мелеховой и Е. И. Егоровой. – Москва : Академия, 2007. – 288 с.
25. Бондаренко В. М. Феноменология кинетики повреждений бетона железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в агрессивной среде / В. М. Бондаренко // Бетон и железобетон. – 2008. – № 2. – С. 25-28.
26. Большаков В. И. Многопараметрическое проектирование составов бетона / В. И. Большаков, О. Л. Дворкин // Новини науки Придніпров'я. – 2003. – № 5. – С. 38-44.
27. Будівельні матеріали. Суміші бетонні. Технічні умови. ДСТУ Б В.2.7-96-2000 (ГОСТ 7473-94). – [Діючий від 2000-02-23]. – Київ : Державний комітет будівництва, архітектури та державної політики України, 2000. – 20 с. – (Національні стандарти України).
28. Будівельні матеріали. Цементи загально будівельного призначення. Технічні умови. ДСТУ Б В.2.7-46-96. – [Діючий від 2010-12-14]. – Київ : Міністерство регіонального будівництва, 2010. – 14 с. – (Національні стандарти України).
29. Вандаловская Л. А. Исследование процессов коррозии железобетонных конструкций прядильных цехов вискозных производств и разработка способов повышения их долговечности : автореферат дис. на

соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.23.01 / Вандаловская Людмила Алексеевна. – Киев : НИИСК, 1971. – 22 с.

30. Васильев А. И. О выборе толщины защитного слоя бетона мостовых конструкций / А. И. Васильев, А. С. Бейвель, А. М. Подвальный // Бетон и железобетон. – 2001. – № 5. – С. 25-27.

31. Васильев А. И. Вероятностные оценки срока службы эксплуатируемых автодорожных мостов в условиях коррозии арматуры / А. И. Васильев // Бетон и железобетон. – 2003. – № 2. – С. 17-20.

32. Вплив технологічних параметрів на довговічність залізобетону при корозії арматури / М. В. Савицький, І. М. Матюшенко, Т. Д. Нікіфорова, Л. М. Лаухіна, С. Є. Шехоркіна // Theoretical foundations of civil engineering : Polish - Ukrainian - Lithuanian Transactions (conference), Warsaw, September, 2010 / Ed. by W. Szczesniak. – Warsaw, 2010. – Vol. 18. – P. 523-528.

33. Глагола І. І. Методи визначення корозійної тривкості, довговічності та антикорозійний захист залізобетонних конструкцій : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Глагола Іван Іванович. – Львів, 2004. – 171 с.

34. Гороновский И. Т. Краткий справочник по химии / И. Т. Гороновский, Ю. П. Назаренко, Е. Ф. Некряч. – Киев : Наукова думка, 1987. – 833 с.

35. Горчаков Г. И. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений / Г. И. Горчаков, М. М. Капкин, Б. Г. Скрамтаев. – Москва : Стройиздат, 1965. – 190 с.

36. Гузеев Е. А. Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики / Е. А. Гузеев, С. Н. Леонович, К. А. Пирадов. – Брест : БПИ, 1999. – 217 с.

37. Гузеев Е. А. Основные принципы обеспечения долговечности конструкций на стадии проектирования с учетом кинетики коррозионных процессов в бетоне / Е. А. Гузеев, Н. В. Савицкий // Совершенствование

технологии производства бетонов повышенной прочности и долговечности. – Уфа, 1985. – С. 124-127.

38. Гузеев Е. А. К вопросу оптимального проектирования железобетонных конструкций для агрессивных сред / Е. А. Гузеев, М. Г. Булгакова, Л. Л. Лемыш // Способы повышения коррозионной стойкости бетона и железобетона. – Москва, 1988. – С. 13-19.

39. Гузеев Е. А. Учет агрессивных воздействий в нормах проектирования конструкций / Е. А. Гузеев, С. Н. Алексеев, Н. В. Савицкий // Бетон и железобетон. – 1992. – № 10. – С. 8-10.

40. Гузеев Е. А. Об учете параметров, определяющих стойкость железобетонных конструкций в агрессивных средах / Е. А. Гузеев // Коррозия и стойкость железобетона в агрессивных средах. – Москва : НИИЖБ, 1980. – С. 4-9.

41. Гусев Б. В. Построение математической теории процессов коррозии бетона / Б. В. Гусев, А. С. Файвусович // Строительные материалы. – 2008. – № 3. – С. 38-41.

42. Давидсон М. Г. Водонепроницаемый бетон / М. Г. Давидсон. – Москва : Лениздат, 1965. – 98 с.

43. Дворкин Л. И. Многопараметрическое проектирование составов бетона / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин // Збірник наукових праць УкрДАЗТ : обрані праці 4-ї Міжнародної наук.-техн. конференції. – 2013. – Вип. 138. – С. 32–40.

44. Дворкін Л. Й. Основи бетонознавства / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін. – Київ : Основа, 2007. – 616 с.

45. Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами) затверджених Наказом Міністерства охорони здоров'я України № 201 від 09.07.97, м. Київ.

46. Десов А. Е. Некоторые свойства бетона, способствующие защите от коррозии арматурной стали в железобетонных конструкциях / А. Е. Десов

// Структура, прочность и деформации бетонов. – Москва : Стройиздат, 1966. – С. 210-216.

47. Диагностика и оценка технического состояния строительных конструкций / А. Н. Березюк, Н. В. Савицкий, Н. И. Шимон, Е. А. Гузеев, К. В. Баташева. – Днепропетровск, ПГАСиА, 1996. – 176 с.

48. Добавка для бетонных смесей – суперпластификатор С-3 / Ф. М. Иванов, В. М. Москвин, В. Г. Батраков, Е. И. Досовицкий, С. С. Каприелов, В. А. Бабаев // Бетон и железобетон. – 1978. – № 10. – С. 13-16.

49. Добавки для бетонов и строительных растворов. Технические условия. ГОСТ 24211-2008. – [Действующий от 2008-12-10]. – Москва : Стандартиформ, 2010. – 16 с. – (Национальные стандарты Российской Федерации).

50. Добшиц Л. М. Влияние свойств цемента на морозостойкость бетонов / Л. М. Добшиц, В. И. Соломатов // Бетон и железобетон. – 1999. – № 3. – С. 19-21.

51. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев, Ф. М. Иванов, С. Модры, П. Шиссль. – Москва : Стройиздат, 1990. – 320 с.

52. Дубницкий В. Ю. Оценка коррозионного состояния бетона при сложных агрессивных воздействиях / В. Ю. Дубницкий, В. Л. Чернявский // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1988. – № 10. – С. 51-55.

53. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций Часть 1-1. Общие правила и правила для сооружений (EN 1992-1-1: 2004, ИДТ). ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1: 2010. – [Действующий от 2010-12-27]. – Киев: Минстрой Украины, 2010. – 311 с. – (Национальные стандарты Украины).

54. Емец Н. А. Оцінка стану території міста Дніпропетровська за ступенями забруднення атмосферного повітря / Н. А. Емец, Я. Я. Сердюк // Екологія і природокористування : зб. наук. праць ІППЕ НАН України. – Дніпропетровськ. – 2003. – Вип. 6. – С. 200-207.

55. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования : ГОСТ 31384-2008, NEQ) : ДСТУ Б В.2.6-145:2010. – [Действующий от 2011-07-01]. – Киев : Минстрой Украины, 2010. – 56 с. – (Национальные стандарты Украины).
56. Защита строительных конструкций от коррозии. Нормы проектирования : СНиП 2.03.11-85 / Госстрой СССР. – Москва : Стройиздат, 1986, – 48 с.
57. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии ГОСТ 31384-2008. – [Действующий от 2012-12-10]. – Москва : Стройиздат, 2008. – 65 с. – (Национальные стандарты Российской Федерации).
58. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний. ГОСТ Р 52804-2007. – [Действующий от 2009-01-01]. – Москва : Стройиздат, 2008. – 52 с. – (Национальные стандарты Российской Федерации).
59. Звіт про стан навколишнього природного середовища в Дніпропетровській області за 2003 рік. – Дніпропетровськ, 2004. – 137 с.
60. Иванов Ф. М. Морозостойкие бетоны на мелкозернистых песках / Ф. М. Иванов, В. Е. Крекшин // Строительство трубопроводов. – 1979. – № 11. – С. 24-26.
61. Иванов Ф. М. Структура и свойства цементных растворов / Ф. М. Иванов, В. Л. Солнцева // Бетон и железобетон. – 1962. – № 5. – С. 233-237.
62. Иванов Ф. М. О моделировании процессов коррозии бетонов / Ф. М. Иванов // Бетон и железобетон. – 1982. – № 7. – С. 45-46.
63. Исаев Н. И. Теория коррозионных процессов / Н. И. Исаев. – Москва : Metallurgy, 1997. – 368 с.
64. Карнаухова Л. Н. Исследование физико-химических процессов и закономерностей массопереноса при коррозии цементного камня в кислых средах / Л. Н. Карнаухова, В. Г. Петров-Денисов // Коррозионная стойкость бетона, арматуры и железобетона в агрессивных средах. – Москва : НИИЖБ, 1984. – С. 35-41.

65. Клименко Є. В. До питання прогнозування технічного стану залізобетонних конструкцій / Є. В. Клименко // Будівельні конструкції : міжвід. наук.-техн. зб. / Держ. наук.-дослід. ін-т буд. констр. Держбуду України ; гол. ред. П. І. Кривошеєв. – Київ : НДІБК. – Вип. 59. Кн. 2 : Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону. – 2003. – С. 68-73.

66. Клименко Є. В. Ресурс залізобетонних конструкцій / Є. В. Клименко, В. С. Дорофєєв // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури : зб. наук. пр. – Одеса : ОДАБА, 2012. – Вип. 47, частина 2. – С. 111-117.

67. Клименко Є. В. Методологія оцінювання, прогнозування та регулювання технічного стану будівель і споруд із залізобетону : автореф. дис.... д-ра техн. наук : 05.23.01 / Клименко Євгеній Володимирович ; Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Львів, 2008. – 31 с.

68. Конструкції будинків і споруд. Захист бетонних та залізобетонних конструкцій від корозії. Методи випробувань. ДСТУ Б В.2.6-181:2011 – [Діючий від 2013-01-01]. – Київ : Мінрегіон України, 2011. – 62 с. – (Національні стандарти України).

69. Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель. ДБН В.2.6-31:2006. – [Діючий від 2006]. – Київ : Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України, 2006. – 69 с. – (Національні стандарти України).

70. Коррозия бетона и железобетона. Методы их защиты / В. М. Москвин, Ф. М. Иванов, С. Н. Алексеев, Е. А. Гузеев. – Москва : Стройиздат, 1980. – 536 с.

71. Краснюк Т. В. Оптимизация первичной защиты арматуры железобетонных конструкций в агрессивных газовых средах : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Краснюк Татьяна Витальевна. – Днепропетровск, 2001. – 201 с.

72. Крекшин В. Е. Морозостойкость бетона на очень мелких песках при введении суперпластификатора С-1 и смолы нейтрализованной

воздухововлекающей СНВ / В. Е. Крекшин // Бетон с эффективными суперпластификаторами. – Москва : труды НИИЖБ, 1979. – С. 120-130.

73. Кривенко П. В. Современные проблемы долговечности бетона: состояние и перспективы / П. В. Кривенко // Будівельні конструкції : міжвід. наук.-техн. зб. / Держ. наук.-дослід. ін-т буд. констр ; відп. ред. П. І. Кривошеєв. – Київ : НДІБК, 2000. – Вип. 38. – С. 15-27.

74. Кузнецов Ю. Д. Обеспечение долговечности железобетонных конструкций при реконструкции промышленных предприятий / Ю. Д. Кузнецов, И. Н. Заславский. – Киев : Будівельник, 1985. – 112 с.

75. Математические модели процессов коррозии бетона / Б. В. Гусев, А. С. Файвусович, В. Ф. Степанова, Н. К. Розенталь. – Москва : Информационно-издательский центр «ТИМР», 1996. – 104 с.

76. Махинько Н. Н. Обеспечение долговечности крупнопанельных жилых зданий первых массовых серий при коррозии арматуры связей : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Махинько Николай Николаевич. – Днепропетровск, 2014. – 136 с.

77. Методы определения средней плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости. ДСТУ ДСТУ Б В.2.7-170:2008. – [Действующий от 2009-07-01]. – Киев : Минстрой Украины, 2009. – 45 с. – (Национальные стандарты Украины).

78. Моделирование процессов коррозии арматуры железобетонных конструкций в агрессивных средах / Н. В. Савицкий, И. Н. Матюшенко, Т. Д. Никифорова, Л. Н. Лаухина // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. научн. тр. / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2006. – Вып. 37. – С. 425-430.

79. Моделирование воздействия продуктов коррозии арматуры на бетон защитного слоя / Н. В. Савицкий, Л. Н. Матюшенко, С. Е. Шехоркина, И. Н. Лаухина // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія : Будівельні конструкції : зб. наук. праць. – Львів : Львівська політехніка, 2010. – Вип. 664. – С. 183-185.



80. Москвин В. М. Коррозия бетона / В. М. Москвин. – Москва : Госстройиздат, 1952. – 342 с.
81. Научно-практические аспекты охраны воздушной среды : учеб. пособие / А. И. Кораблева, Л. Г. Чесанов, И. Л. Ветвицкий, С. З. Полищук, В. Л. Чесанов, И. В. Житченко. – Днепропетровск : Монолит, 2008. – 323 с.
82. Нормативні документи з питань обстежень, паспортизації, безпечної та надійної експлуатації виробничих будівель і споруд. Київ, 1997 р. Держкомбуд України.
83. Основні показники стану повітряного басейну Дніпропетровської області у 2003 році. Статистичний бюлетень. – Дніпропетровськ, 2004. – 111 с.
84. Оцінка забруднення атмосферного повітря міста Дніпропетровська з використанням чисельних розрахунків на ПЕОМ / С. З. Поліщук, В. В. Голуб, М. А. Ємець, Л. Г. Чесанов, Г. Г. Шматков, А. І. Корабльова, В. І. Крадожен, В. М. Полтарацька // Екологія і природокористування : зб. наук. праць ІППЕ НАН України. – Дніпропетровськ 2004. – Вип. 7. – С. 154-160.
85. Песок плотный природный для строительных материалов, изделий, конструкций и работ. Технические условия. ДСТУ- Б В.2.7-32-95. – [Действующий от 1995-10-31]. – Киев : Минстрой Украины, 1996. – 14 с. – (Национальные стандарты Украины).
86. Песок для строительных работ. Технические условия. ГОСТ 8736-93.- [Действующий от 1995-07-01]. Москва : Минстрой России, 1995. – 12 с. – (Национальные стандарты Российской Федерации).
87. Подвальный А. М. Об испытаниях бетона на морозостойкость / А. М. Подвальный // Бетон и железобетон. – 1996. – № 4. – С. 26-29.
88. Подвальный А. М. Коррозия бетона при действии физических факторов внешней среды / А. М. Подвальный // Коррозия и стойкость железобетона в агрессивных средах. – Москва : НИИЖБ, 1980. – С. 21-30.

89. Полак А. Ф. Моделирование коррозии железобетона и прогнозирование его долговечности / А. Ф. Полак // Итоги науки и техники. Коррозия и защита от коррозии. – Том XI. – Москва : ВИНТИ, 1986. – С. 136-180.
90. Полак А. Ф. Моделирование процесса коррозии бетона / А. Ф. Полак, В. В. Бабков, В. М. Латыпов // Защита подземных железобетонных конструкций от коррозии. – Волгоград, 1990. – С. 73-77.
91. Полак А. Ф. О применении теории моделирования к вопросам коррозии бетона в агрессивной среде / А. Ф. Полак // Тр. НИИпромстроя, вып. 12. – Москва : Стройиздат, 1974. – С. 260-265.
92. Полак А. Ф. Основы коррозии железобетона, математическое моделирование процесса с применением ЭВМ : учеб. пособие / А. Ф. Полак. – Уфа : УНИ, 1986. – 69 с.
93. Полак А. Ф. Расчет долговечности железобетонных конструкций / А. Ф. Полак. – Уфа : УНИ, 1983. – 116 с.
94. Полак А. Ф. Теоретические исследования по коррозии железобетона в среде кислых агрессивных газов / А. Ф. Полак, И. Ш. Фазуллин, В. М. Кравцов // Тр. НИИПромстрой, вып. 13. – Уфа : Баш. кн. изд-во, 1973. – С. 237-241.
95. Попов Н. А. Эффективность применения добавки суперпластификатора С-3 в бетоне для монолитных и сборных конструкций / Н. А. Попов, Н. Ф. Башенкова, Ф. М. Иванов // Бетон с эффективными суперпластификаторами. – Москва : труды НИИЖБ, 1979. – С. 100-114.
96. Попов Н. А. Применение добавки суперпластификатора при изготовлении вибропрессованных железобетонных труб / Н. А. Попов, А. Л. Улонский, В. Г. Батраков // Бетон с эффективными суперпластификаторами. – Москва : труды НИИЖБ, 1979. – С. 85-99.
97. Прогнозирование долговечности железобетона при коррозии арматуры / Н. В. Савицкий, И. Н. Матюшенко, Л. М. Лаухина, С. Е. Шехоркина // Будівельні конструкції : міжвід. наук.-техн. зб. – Київ, 2011. –

Вип. 74, кн. 2 : Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону. – С. 78-83.

98. Пунагин В. Н. Долговечность бетонных и железобетонных изделий и конструкций : учеб. пособие / В. Н. Пунагин, А. П. Приходько, Н. В. Савицкий. – Киев : УМК ВО, 1988. – 112 с.

99. Ратинов В. Б. Добавки в бетон / В. Б. Ратинов, Т. И. Розенберг. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 1989. – 186с.

100. Ребиндер П. А. Поверхностно-активные вещества / П. А. Ребиндер. – Москва : Знание, 1961. – 46 с. – ([Серия IX. Физика и химия. 14]).

101. Руководство по подбору составов тяжелого бетона / НИИЖБ. – Москва : Сторойиздат, 1979. – 103с.

102. Савицкий Н. В. Численно-аналитический метод оценки надежности и долговечности железобетонных конструкций / Н. В. Савицкий, Е. А. Гузев // Повышение долговечности строительных конструкций в агрессивных средах : тез. докл. науч.-техн. семинара – Уфа : НИИпромстрой, 1987. – С. 248.

103. Савицкий Н. В. Основы расчета надежности железобетонных конструкций в агрессивных средах : дис. докт. техн. наук : 05.23.01 / Савицкий Николай Васильевич. – Москва., 1993. – 399 с.

104. Сергеева И. Г. Исследование диффузионной проницаемости бетонов различной структуры : дис. ... канд. тех. наук : 05.23.05 / Сергеева Ирина Григорьевна. – Москва, 1973. – 139 с.

105. Сетков В. Ю. Разрушение железобетонных перекрытий производственных зданий при действии углекислого газа / В. Ю. Сетков, И. С. Шибанова // Бетон и железобетон. – 1989. – № 12. – С. 35-36.

106. Сетков В. Ю. Степень агрессивного воздействия газообразной среды, содержащей сернистый ангидрид, на железобетонные конструкции / В. Ю. Сетков, И. С. Шибанова // Известия Вузов. Строительство и архитектура. – 1989. – № 7. – С. 1-4.

107. Сизов В. П. О зависимости прочности и морозостойкости бетона от свойств и расхода цемента / В. П. Сизов // Бетон и железобетон. – 2000. – № 6. – С. 27-29.

108. Сизов В. П. К вопросу совершенствования ГОСТ 10060-95 на испытание бетона на морозостойкость / В. П. Сизов // Бетон и железобетон. – 1999. – № 2. – С. 24-26.

109. Сизов В. П. Рациональный подбор составов тяжелого бетона / В. П. Сизов. – Москва : Стройиздат, 1995. – 174 с.

110. Сизов В. П. К вопросу прогнозирования водонепроницаемости бетона / В. П. Сизов // Бетон и железобетон. – 1996. – № 2. – С. 23-24.

111. Система химических добавок в бетоны и строительные растворы «Релаксол» / Н. П. Синайко, А. П. Лихопуд, А. Г. Синякин, В. П. Сопов, А. В. Ушеров-Маршак, М. А. Саницкий, У. Д. Марущак // Будівництво України. – 2000. – № 5. – С. 30-34.

112. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. ДБН В.1.2-14:2009. – [Діючий від 2008-12-13]. – Київ : Міністерство регіонального будівництва, 2009. – 39 с. – (Національні стандарти України).

113. Сосипатрова Н. И. Эффективное средство повышения долговечности бетона – снижение его проницаемости / Н. И. Сосипатрова, А. С. Смоленцев // Способы повышения коррозионной стойкости бетона и железобетона. – Москва : НИИЖБ, 1988. – С. 59-61.

114. Справочник химика Т. 1. Общие сведения, строение вещества, свойства важнейших веществ, лабораторная техника / Редкол. : Никольский Б. П. и др. – 2-е изд., испр. – Москва-Ленинград : Химия, 1966. – Т. 1. – 1072 с.

115. Сталь для армування бетону. Зварювана рифлена арматурна сталь В500. Технічні умови на постачання прутків, мотків і зварної сітки (ENV 10080:1995, IDT). ДСТУ EN 10080:2009 – [Діючий від 2009-12-30]. – Київ :

Держспоживстандарт України, 2012. – 64 с. – (Національні стандарти України).

116. Стойкость бетона и железобетона при отрицательной температуре / В. М. Москвин, М. М. Капкин, Б. М. Мазур, А. М. Подвальный. – Москва : Стройиздат, 1967. – 132 с.

117. Строительная климатология. ДСТУ- Н Б.1.1-27:2010.– [Действующий от 2011-11-01]. – Киев : Минстрой Украины, 2011. – 122 с. – (Национальные стандарты Украины).

118. Структура и морозостойкость гидротехнического бетона с добавкой ГКЖ-94 / В. М. Москвин, В. Г. Батраков, О. В. Кунцевич, В. В. Конько, В. М. Бертов // Бетон и железобетон. – 1980. – № 7. – С. 20-22.

119. Субботкин М. И. Морозостойкий бетон на шлакопортландцементе / М. И. Субботкин, А. И. Волкова // Бетоны с эффективными модифицирующими добавками. – Москва : НИИЖБ, 1985. – С. 120-124.

120. Техническое состояние железобетонных конструкций балконов в жилых домах после длительного срока эксплуатации в атмосферной среде / Н. В. Савицкий, А. А. Тытюк, А. А. Тытюк, С. В. Богаченко // Вісник Придніпровської державної академії будівництва і архітектури : зб. наук. пр. – 2010. – № 10. – С. 53-57.

121. Тытюк А. А. Исследование факторов, влияющих на глубину карбонизации бетона в агрессивных газовоздушных средах / Н. В. Савицкий, Ан. А. Тытюк, А. А. Тытюк, // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск: ПГАСА, 2011. – Вып. 61. – С.394 – 400.

122. Тытюк А. А. Проблемы оценки технического состояния железобетонных конструкций с целью достройки незавершенного железобетонного каркаса на примере жилого дома в г. Днепропетровске по ул. Мечникова, 5 / Н. В. Савицкий, Ан. А. Тытюк, А. А. Тытюк // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск: ПГАСА, 2013. – Вып. 69. – С.435 – 439.

123. Тытюк А. А. Морозостойкость бетонов на мелких днепровских песках / Н. В. Савицкий, Ан. А. Тытюк, А. А. Тытюк // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск: ПГАСА, 2014. – Вып. 77. – С.207–211.

124. Тытюк А. А. Strength and frost resistance of concrete based on the dnipro sands with the low fineness modulus / Н. В. Савицкий, Ан. А. Тытюк, А. А. Тытюк // Theoretical Foundations of Civil Engineering. – Dnipropetrovsk: PSACEA, 2014. – Vol. 22, part II. – P. 39–46.

125. Тытюк А. А. Количественный метод проектирования первичной защиты бетона защитного слоя в условиях атмосферных климатических воздействий / Н. В. Савицкий, Ан. А. Тытюк, А. А. Тытюк // Вісник Придніпровської державної академії будівництва і архітектури. – Дніпропетровськ: ПДАБА, 2015. – № 6. – С. 27-36.

126. Факторы, влияющие на водонепроницаемость бетона. – Режим доступа: <http://betony.ru/vodonepronicamiy-beton/factory.php>.

127. Чернявский В. Л. Адаптация бетона : монография / В. Л. Чернявский. – Днепропетровск : Нова ідеологія, 2002. – 115 с.

128. Чернявский В. Л. Об адаптации цементного бетона к действию внешней среды / В. Л. Чернявский. // Бетон и железобетон. – 1994. – № 5. – С. 7-10.

129. Шейкин А. Е. Цементные бетоны высокой морозостойкости / А. Е. Шейкин, Л. М. Добшиц. – Ленинград : Стройиздат, 1989. – 127 с.

130. Шестоперов С. В. Долговечность бетона транспортных сооружений / С. В. Шестоперов. – Москва : Транспорт, 1966. – 500 с. – Библиогр. : с. 496-499.

131. Щебень и гравий, плотные природные для строительных материалов, изделий, конструкций и работ. Технические условия. ДСТУ Б В.2.7-75-98. – [Действующий от 1998-08-25]. – Киев : Минстрой Украины, 1999. – 14 с. – (Национальные стандарты Украины).

132. Экспериментальные исследования свойств сухих смесей для ремонта железобетонных конструкций / А. Н. Пшинько, Н. В. Савицкий, А. Н. Савицкий, С. В. Богаченко, Ан. А. Тытюк, А. А. Тытюк // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск: ПГАСА, 2011. – Вып. 61. – С. 357 – 364.
133. Юнг В. Н. Поверхностно-активные гидрофильные вещества и электролиты в бетонах / В. Н. Юнг, Б. Д. Тринкер ; под ред. Ю. М. Бутта. – Москва : Госстройиздат, 1960. – 166 с.
134. [Baker](#) J. M. Durability of Building Materials and Components: Proceedings of the Fifth International Conference / [J. M. Baker](#), [H. Davies](#), [A. J. Majumdar](#), [P. J. Nixon](#). – Spon Press, 1990. – 760 p.
135. [Broomfield](#) J. P. Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair / [John P. Broomfield](#). – CRC Press, 2006. – 296 p.
136. Corrosion resistance of functionally graded coatings on plain steel rebars / Jaesuk Ryou, Thomas Voight, Maria S. Konsta-Gdoutos etc // Journal of advanced concrete technology. – Vol. 3. – № 1. – Japan concrete institute, 2005. – P. 69-75.
137. El-Reedy M. Steel-Reinforced Concrete Structures: Assessment and Repair of Corrosion / [Mohamed El-Reedy](#). – CRC Press, 2007. – 216p.
138. Gambhir M. L. Concrete Technology: Theory and Practice / M. L. [Gambhir](#). – Tata Mcgraw Hill Education Private Limited, 2013. – 792 p.
139. McCormac J. C. Design of reinforced concrete. ACI 318-05 Code Edition / Jack C. McCormac, James K. Nelson. – 7th ed. – USA, 2005. – 737 p.
140. Merritt F. S. Building design and construction handbook / Frederick S. Merritt, Jonathan T. Ricketts. – 6th ed. – New York, 2000. – 1722 p.
141. Mosley W. H. Reinforced concrete design to Eurocode 2 / W. H. Mosley, Ray Hulse, J. H. Bungey. – London, 2004. – 67 p.
142. Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion / AFGC. – 2003. – 107 p.

143. Setzer M. J. Frost Resistance of Concrete / [M. J. Setzer](#), R. Auberg. – CRC Press, 1997. – 368 p.
144. Structural use of concrete : British standard BS 8110-1:1997. – 1997. – Part 1 : Code of practice for design and construction. – Режим доступа: [https://docs.google.com/document/d/13wWCIZIjDSUPoHLdL4wBlg8JzBRAidK6FKQILhAGz\\_8/edit?pli=1](https://docs.google.com/document/d/13wWCIZIjDSUPoHLdL4wBlg8JzBRAidK6FKQILhAGz_8/edit?pli=1)
145. Zhang H. Building Materials in Civil Engineering / [Haimei Zhang](#). – Woodhead Publishing, 2011. – 440 p.



ПРИЛОЖЕНИЕ А  
Справки о внедрении



