

Э. И. Батяновский  
С. М. Эгбалник

**ПЕРВИЧНАЯ ЗАЩИТА  
ТВЕРДЕЮЩЕГО БЕТОНА**

Минск  
БНТУ  
2024

УДК 666.97; 693.54

**Батяновский, Э. И.** Первичная защита твердеющего бетона /  
Э. И. Батяновский, С. М. Эгбалник. – Минск : БНТУ, 2024.  
ISBN 978-985-31-0072-3.

Материал монографии отражает исследования и их результаты по разработке технологии первичной защиты твердеющего цементного конструкционного бетона как непосредственно после формования изделий и конструкций, так и (при необходимости) после их распалубки. В основе предлагаемой технологии защиты бетона лежит свойство твердеющего цементного камня создавать разрежение в объеме бетона, а диффундирующего под влиянием разрежения сульфата алюминия – вступать в химико-физическое взаимодействие с продуктами гидролиза цемента, с образованием увеличивающихся в объеме продуктов такого взаимодействия, уплотняющего структуру и снижающего проницаемость обрабатываемой поверхности бетонных изделий и конструкций.

Книга предназначена для специалистов строительной отрасли и может быть полезна проектировщикам, инженерно-техническим работникам, а также преподавателям, аспирантам, магистрантам, студентам учебных заведений строительного профиля.

Табл. 29. Ил. 19. Библ. назв. 146

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом  
Белорусского национального технического университета  
(протокол № 4 от 10.04.2024)

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник  
ГП «Институт жилища НИПТИС им. Атаева С. С.»

*В. М. Пилипенко;*

доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник  
ГП «БелдорНИИ»

*А. В. Бусел*

ISBN 978-985-31-0072-3

© Батяновский, Э. И., Эгбалник, С. М., 2024

© Белорусский национальный  
технический университет, 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	6
1. АНАЛИЗ И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ ПО УХОДУ ЗА ТВЕРДЕЮЩИМ БЕТОНОМ.....	8
1.1 Теоретические аспекты формирования структуры (пористости) и свойств тяжелого бетона в процессе твердения....	9
1.1.1. Характеристики пористости цементного камня и бетона.....	9
1.1.2. Влияние технологических факторов на структуру бетона.....	12
1.1.3. Влияние условий твердения на пористость и свойства бетона.....	24
1.2. Методы, приемы и режимы ухода за твердеющим бетоном.....	28
1.3. Анализ эффективности и технологичности приемов первичной защиты твердеющего бетона, направление исследований.....	36
2. МЕТОДОЛОГИЯ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	41
2.1. Общая методология исследований.....	41
2.2. Материалы для исследований.....	42
2.2.1. Вяжущие вещества.....	42
2.2.2. Заполнители для бетона.....	43
2.2.3. Защитные вещества и составы.....	44
2.3. Методики исследований, изготовления и испытаний образцов.....	45
2.4. Методики определения свойств цементного камня и бетона.....	47

3. ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОНИКНОВЕНИЯ ЗАЩИТНОГО СОСТАВА В ТВЕРДЕЮЩИЙ БЕТОН.....	50
3.1. Теоретические основы фильтрационно-диффузионного проникновения защитного состава в твердеющий бетон с поверхности .....	50
3.1.1. Физико-химические предпосылки развития процесса массопереноса в твердеющем цементном камне.....	50
3.1.2. Разработка расчетных зависимостей для оценки глубины проникновения вещества защитного состава в бетон .....	54
3.1.3. Экспериментально-теоретическое обоснование расчетных зависимостей.....	60
3.2. Экспериментальная проверка расчетных зависимостей .....	68
3.3. Обобщение результатов исследований .....	72
4. ТЕХНОЛОГИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАЩИТЫ ТВЕРДЕЮЩЕГО БЕТОНА.....	74
4.1. Оценка эффективности гидрофобизирующих и уплотняющих структуру веществ.....	74
4.2. Защита свежееотформованного бетона раствором сульфата алюминия .....	80
4.2.1. Установление рациональной концентрации раствора и расхода вещества .....	81
4.2.2. Обоснование способа нанесения раствора, влияние температуры, времени начала обработки и количества раз нанесения раствора защитного состава.....	83
4.2.3. Влияние скорости движения воздуха и температуры на режим ухода за бетоном и расход защитного состава .....	91
4.3. Защита твердеющего бетона после распалубки .....	94
4.3.1. Влияние защитного состава на количество химически связанной воды и степень гидратации цемента .....	96

4.3.2. Кинетика твердения защищаемого после распалубки бетона в зависимости от температуры, скорости ветра и удельного расхода защитного состава .....	99
4.4. Итоги результатов исследований.....	104
<b>5. ВЛИЯНИЕ ЗАЩИТНОГО СОСТАВА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА БЕТОНА.....</b>	<b>107</b>
5.1. Физико-механические характеристики бетона.....	107
5.1.1. Прочность сцепления слоев «старого» и «свежего» бетона .....	107
5.1.2. Прочность тяжелого бетона (мелкозернистого и с крупным заполнителем) на сжатие, растяжение при изгибе и осевое растяжение (раскалыванием).....	112
5.1.3. Деформативность и упругие характеристики бетона .....	113
5.1.4. Деформации усадки бетона .....	115
5.2. Эксплуатационные свойства бетона.....	118
5.2.1. Водопоглощение и водонепроницаемость.....	118
5.2.2. Солестойкость в среде хлоридов .....	120
5.2.3. Морозостойкость.....	123
5.2.4. Защитная способность по отношению к стальной арматуре .....	124
5.2.5. Истираемость .....	128
5.3. Обобщение результатов оценки свойств бетона.....	129
5.4. Основные положения ведения работ.....	131
5.4.1. Общие положения для работ с защитным составом ...	131
5.4.2. Производственная апробация и ее результаты.....	133
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>137</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>140</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Твердение конструкционного цементного бетона в воздушно-сухих условиях, характерных для монолитного строительства и для тепловой обработки с использованием «сухих» теплоносителей в производстве сборных изделий, сопровождается неконтролируемыми потерями воды затворения, ростом пористости и проницаемости бетона, непредсказуемым снижением его физико-механических характеристик и эксплуатационных свойств. Среди множества вариантов ухода за твердеющим бетоном наиболее технологична и универсальна технология нанесения на защищаемую от испарения влаги поверхность защитных составов, в качестве которых используют гидрофобизирующие и пленкообразующие вещества. При всех достоинствах защиты ими твердеющего бетона от испарения влаги им присущ ряд серьезных недостатков, включая необходимость предварительной выдержки (вплоть до схватывания) свежееотформованного бетона, резкое ухудшение сцепления обработанной поверхности с последующими слоями бетона и, особенно, проблемы с последующей отделкой обрабатываемых поверхностей строительных конструкций. Последний проблемный вопрос частично позволяют решить так называемые «самораспадающиеся пленкообразующие составы». Но эффект «самораспада» реализуется через 14–20 суток твердения, что не решает задачи сцепления слоев: «обработанный старый» бетон и свежееотформованный, сдерживает темп ведения бетонных работ и строительства в целом. Кроме отмеченного, высока стоимость ухода за бетоном пленкообразующими составами и, в особой мере, импортируемыми самораспадающимися веществами. В этой связи в монографии отражены исследования и их результаты по разработке и решению проблемы ухода за бетоном (патент Беларуси № 19821 (BY19821 C1) на основе использования недефицитного и недорогого отечественного химического продукта – сульфата алюминия ( $Al_2(SO_4)_3$ ), который стандартизирован и разрешен к применению в бетоне в качестве уплотняющей структуру добавки. Эффект уплотнения структуры цементного камня и бетона, обрабатываемых этим веществом наружных поверхностей изделий (конструкций), делает их труднопроницаемыми для воды

(предотвращая ее испарение) и одновременно способствует упрочнению внешнего слоя бетона, повышая качество его сцепления с последующими слоями, а также с материалами последующей отделки строительных конструкций. Результаты исследований по данному направлению составляют существо данной монографии.

Авторы выражают признательность рецензентам рукописи, профессорам Пилипенко Владимиру Митрофановичу и Буселу Алексею Владимировичу за полезные замечания и высокую оценку содержания работы.

## **1. АНАЛИЗ И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ ПО УХОДУ ЗА ТВЕРДЕЮЩИМ БЕТОНОМ**

Вся без исключений совокупность физико-технических свойств тяжелого цементного бетона, включая прочностные, упруго-деформативные, эксплуатационные (водо-, коррозионную, морозостойкость, водо-, газонепроницаемость, способность защищать стальную арматуру от коррозии и др.), непосредственно зависит от качества структуры цементного камня. В свою очередь на ее важнейшие характеристики: плотность, пористость, проницаемость, при прочих равных условиях, определяющее влияние оказывает начальный период твердения бетона, в частности, условия влагообмена с окружающей средой, особенно когда она характеризуется пониженной влажностью при высокой положительной температуре в сочетании с наличием и ростом скорости движения воздуха (ветра). Эта проблема существенна как для вариантов твердения бетона в «естественных» (а по существу – в воздушно-сухих условиях) и при тепловой обработке сборных изделий с использованием «сухих» теплоносителей, так и для монолитного строительства в летний период года, а также в любой иной, при использовании разнообразных вариантов обогрева бетона, исключая практически малоприменяемый паробогрев. Основную роль в ухудшении характеристик бетона играет формирование в цементном камне капиллярной (открытой, сообщающейся) пористости под влиянием различных факторов. Первичная защита бетона направлена на создание таких условий его твердения, при которых будет сведено к минимуму влияние факторов, обуславливающих формирование «развитой» (грубокапиллярной) пористости бетона. С этой целью выполнена оценка их роли в формировании пористости цементного камня и тяжелого бетона в целом.



## **1.1. Теоретические аспекты формирования структуры (пористости) и свойств тяжелого бетона в процессе твердения**

### **1.1.1. Характеристики пористости цементного камня и бетона**

Качественными характеристиками структуры бетона на заполнителях из плотных горных пород являются объем порового пространства цементного камня (т. е. величина пористости), вид и размеры его пор и зоны контакта последнего с заполнителями. При этом в общем объеме пор (общая пористость) принято различать капиллярную, контракционную и поры геля. Последнюю разновидность пор, на наш взгляд, более точно было бы называть «порами новообразований», так как к ним относят неплотности (дефекты) структуры, образующиеся между кристаллогидратами новообразований, возникающих в результате реакций клинкерных минералов цемента с водой и спонтанно формирующих реакционные каемки вокруг остаточных «ядер» цементных частиц.

Исследованиями, выполненными за период с 40-х годов XX века [1–33 и др.], установлены характерные параметры основных разновидностей пор цементного камня и определена значимость их влияния на свойства цементного камня и бетона. Наибольшую опасность представляют собой капиллярные (открытые, сообщающиеся) поры с весьма широким диапазоном размеров сечения – от менее  $10 \text{ \AA}$  т. е. 100 нм до  $5000 \text{ \AA}$  (50 000 нм).

Основная причина образования капиллярных пор в цементном камне – это превышение водосодержания в рабочих составах бетона над необходимым для реакций гидратации цемента. Их объем возрастает под влиянием целого ряда факторов, в частности, минералогии клинкерной части цемента, вещественного состава (наличия минеральных добавок и их свойств) и тонкости помола цемента, вида и загрязненности заполнителей, качества приготовления и укладки – уплотнения бетона, режима и условий его твердения на разных этапах и др.

Причины образования и роста объема контракционных пор и пор новообразований (геля) связаны с развитием процессов гидратации и твердения цемента. Контракционные поры – это следствие

уменьшения первоначального объема системы «цемент-вода» в процессе их взаимодействия, которое сопровождается уменьшением размеров зерен цемента и перераспределением воды физико-химически за счет связывания в кристаллогидратах клинкерных минералов, этрингита, портландита; адсорбции в межполостных пространствах между ними и пр., а также за счет ее испарения при твердении в неблагоприятных условиях. В результате формируется система сообщающихся пор, пронизывающих объем цементного камня между «сросшимися» зонами взаимных контактов реакционных каемок из новообразований соседствующих (остаточных) частиц цемента. В зависимости от сочетаний факторов, влияющих на глубину и темп развития гидролизно-гидратационных процессов и связанных с ними процессов формирования кристаллогидратных новообразований и реакционных «каемок» из них вокруг зерен цемента, существенно различаются размеры сечений контракционных пор. Общеизвестно [1; 6; 18; 25 и др.], что они занимают промежуточное положение между размерами сечений капиллярных пор и пор новообразований (геля) и составляют от 5–10 нм (50–100 Å) до 1 000 нм (1 мкм) и даже более. Увеличение сечений контракционных пор, при прочих равных условиях, непосредственно связано с понижением влажности и ростом температуры в начальный период твердения бетона, т. к. при этих условиях вокруг цементных частиц ускоренно формируются плотные, мало- или непроницаемые для воды реакционные каемки из новообразований. В результате формируется структура цементного камня с меньшими (чем при благоприятных условиях твердения) площадями взаимных контактов реакционных каемок и с большими размерами сечений контракционных пор.

Поры новообразований (геля) – это дефекты структуры цементного камня наноуровня, сосредоточенные в объемах, занимаемых продуктами реакции цемента с водой. Они возникают вследствие спонтанного развития «гидратационно-кристаллизационного» процесса и неупорядоченного взаимного расположения кристаллогидратных новообразований, а также из-за миграции адсорбционно-связанной жидкости из межплоскостных пространств между ними и ее уходом на дальнейшее развитие процесса гидратации цемента или на испарение. Размеры пор новообразований (геля) соответ-

ствуют по разным данным 0,5–4,0 нм (5–40 Å), например, по данным [1; 2] соответствуют, примерно, около 2,0 нм (20 Å) при размере кристаллогидратных новообразований около 14 нм (140 Å).

В табл. 1.1 даны классификационные характеристики размеров сечений и названия пор цементного камня, приведенные в источнике [25] на основании исследований Пауэрса, Брунауэра, Микхаила, Кондо, Фельдмана и др. [25–30]. Там же сделан вывод, что в цементном камне и бетоне наиболее значимым является размер сечения пор, оцениваемый «радиусом» равным и менее 100 нм (0,1 мкм). Капилляры такого и меньшего радиуса способны всасывать пары воды и их, по классификации А. В. Лыкова [12; 13], относят к микрокапиллярам. Характерной особенностью таких капилляров является эффект кольматации их адсорбционными слоями жидкости, что делает их практически непроницаемыми для нее.

Таблица 1.1

Классификация и характеристика пор цементного камня разных авторов

Размер пор, Å	Группа пор	Автор классификации	Метод определения размеров пор
Менее 6	Ультрамикропоры Небольшие внутренние Межкристаллические Межслоевые	Брунауэр Микхаил Кондо Фельдман	Водонасыщение  Адсорбция воды Адсорбция воды и всасывание геля
6–15	Микропоры Поры геля Адсорбционные Большие внутренние Внутрикристаллические	Брунауэр Пауэрс Фельдман Микхаил Кондо	Электронная микроскопия То же Адсорбция метанола Адсорбция азота и метанола То же
15–1000	Мезопоры Поры между частями геля	Брунауэр Пауэрс Микхаил	Ртутная порометрия
Более 1000	Макропоры	Брунауэр Пауэрс Микхаил Фельдман Кондо	Ртутная порометрия

Группа пор большего сечения (включая седиментационные [1; 10; 31]) согласно этой классификации относится к макрокапиллярам и некапиллярным порам. Их наличие и нарастающий объем представляют собой угрозу для бетона, т. к. способствуют как росту его проницаемости для воды и агрессивных химических реагентов, так и (являясь дефектами структуры) снижают прочностные и упругие характеристики бетона. Одной из причин увеличения их количества в нем являются неблагоприятные, в частности, воздушно-сухие условия твердения бетона.

Для количественной оценки порового пространства цементного камня используют дифференциальные параметры пористости, среди которых наиболее широко применяемыми является оценка состояния пор по характеристикам удельной поверхности (в частности, метод БЭТ (Брунауэр-Эммет-Тэйлор) [34]) и функции распределения пор по размерам сечений (радиусам).

Формирование структуры твердеющего цементного камня и бетона – это процесс постоянного изменения порового пространства во времени. Создание благоприятных температурно-влажностных режимов твердения обеспечивает снижение общей пористости материала за счет уменьшения объема капиллярных пор при увеличении объемов пор новообразований и контракционных, как отражение развития продолжающейся реакции цемента с водой. Влияние на этот процесс важнейших факторов рассмотрено в следующем разделе.

### **1.1.2. Влияние технологических факторов на структуру бетона**

В бетоне на заполнителях из плотных горных пород весь объем образующихся пор (включая поры зон контактов цементного камня с поверхностью зерен заполнителей) сосредоточен в объеме цементного камня. Наиболее существенными технологическими факторами, влияющими на формирование порового пространства в нем, являются свойства цемента (включая наличие, вид и свойства минеральных добавок), водоцементное отношение, условия и продолжительность твердения. От сочетания этих факторов зависит объем пористости и ее качественные характеристики, в частности,

размеры сечения и протяженность пор, а также соотношение между капиллярной пористостью и другими ее видами.

*Свойства цемента.* При оценке влияния *минералогического состава* цемента на пористость цементного камня (при прочих равных условиях) ее рост связывают [1; 6; 17; 24; 25; 35; 36] с увеличением в портландцементном клинкере содержания минералов  $C_3A$  ( $3CaO \cdot Al_2O_3$ ) и  $C_4AF$  ( $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ ). При механистическом (упрощенном) подходе к этому явлению рост пористости и сечения пор в связи с повышением содержания этих минералов в цементе обусловлен как формированием более «рыхлой» структуры их кристаллогидратных новообразований (из-за связывания ими в 2–3 раза большего количества молекул воды в начальный период (10–12 молекул и более) и после стабилизации (6 молекул)), так и из-за примерно такого же соотношения в размерах собственно кристаллогидратов, в виде гидроалюминатов и гидроферритов (порядка 15–25 нм, против 6–8 нм), в сравнении с гидросиликатами кальция. Еще больше разница в размерах последних в сопоставлении с кристаллогидратами этрингита (гидросульфалюмината кальция  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ) и портландита (гидроксида кальция  $Ca(OH)_2$ ).

*Минеральные добавки*, вводимые в цемент для решения разнообразных задач: удешевление; повышение стойкости в пресной воде (предотвращение коррозии первого вида – выщелачивания); понижение экзотермии цемента и повышение водонепроницаемости гидротехнических бетонов и др., в целом способствуют росту объема и сечений пор в цементном камне и бетоне. Исключение составляют вещества, обладающие гидравлической активностью и содержащие кремнезем ( $SiO_2$ ) в аморфной активной форме. В частности, основные доменные шлаки, кальциевые и силикатные золы-уноса способны обеспечить некоторый рост плотности цементного камня за счет реакций с водой и  $Ca(OH)_2$  с образованием водонерастворимых соединений.

Однако, необходимо отметить, что этот положительный эффект лишь частично компенсирует общий отрицательный, связанный с заменой активного вещества – клинкера, на минеральные добавки меньшей активности. В случае же применения инертных или минеральных добавок с повышенной водопотребностью и, тем более, с

ростом их содержания в цементе пористость цементного камня и бетона возрастает [1; 9; 17; 35; 37; 38].

*Тонкость помола и гранулометрический состав цемента.* Влияние тонкости помола цемента (табл. 1.2; рис. 1.1) [18; 25; 39] на строение порового пространства цементного камня (бетона) обусловлено увеличением содержания мелких фракций с ростом удельной поверхности ( $S_{уд}$ ). В результате в цементном тесте увеличивается площадь поверхности раздела фаз в системе «цемент – вода», что способствует ускорению гидролизно-гидратационного процесса и накоплению его продуктов.

Таблица 1.2

Удельная поверхность и размер частиц цемента

Удельная поверхность, $\text{см}^2/\text{г}$ (по ПСХ)	Нормальная густота, %	Содержание (%) фракций с размерами частиц:		
		$\leq 10$ мкм	от 10 до 40 мкм	$\geq 40$ мкм
1400	21,5	10	45	45
5100	25,5	32	47	21

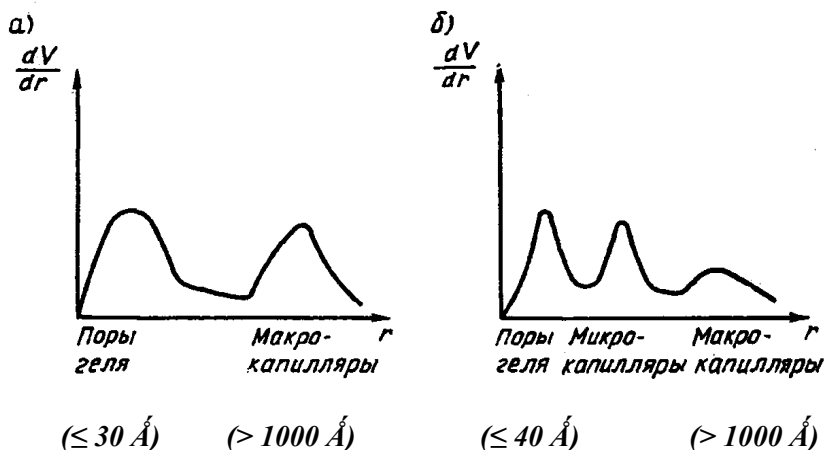


Рисунок 1.1 – Тенденция распределения пор в цементном камне для  $S_{уд} \sim 0,14 \text{ м}^2/\text{г}$  (а) и  $S_{уд} \sim 0,51 \text{ м}^2/\text{г}$  (б)

В цементном камне на грубомолотом цементе ( $S_{уд} \approx 0,14 \text{ м}^2/\text{г}$ ) с ограниченным содержанием зерен мелких фракций образуются преимущественно две группы пор: поры геля и макрокапилляры (рис. 1.1, *а*).

На дифференциальной кривой распределения пор [25; 39] цементного камня по их радиусам наблюдаются два пика, из которых один соответствует порам геля ( $r \leq 30 \text{ \AA}$ ), а другой – макрокапиллярам со средним радиусом от 1000 до 10 000  $\text{\AA}$ , при этом положение второго пика на дифференциальной кривой –  $dV/dr = f v(r)$  определяется степенью гидратации цемента и значением начального В/Ц.

Повышенное содержание зерен мелких фракций (менее 10 мкм) в тонкомолотом цементе существенно влияет на механизм заполнения капиллярного пространства твердеющего цементного камня продуктами гидратации, что сопровождается увеличением объема микрокапилляров ( $r < 1000 \text{ \AA}$ ) при одновременном существенном уменьшении его макропористости (рис. 1.1, *б*). При этом по данным [25; 39] означенная тенденция сохраняется при переходе от цементного камня к бетонам на заполнителях из плотных горных пород, в частности, мелкозернистому (цементно-песчаному).

Соглашаясь с важностью наличия в цементах мелких (менее 10 мкм) фракций для повышения его активности (особенно в начальные сроки твердения) следует отметить, что удельная поверхность  $S_{уд} \sim 0,14 \text{ м}^2/\text{г}$  и  $S_{уд} \sim 0,5 \text{ м}^2/\text{г}$  – это крайности, обусловленные постановкой задач исследований. Общемировая практика измельчения при помолце цементов общестроительного (не специального) назначения соответствует удельной поверхности (по приборам типа «ПСХ»)  $S_{уд} \sim 0,3 \text{ м}^2/\text{г}$ . Это связано с тем, что при такой удельной поверхности цемент, с одной стороны, проявляет достаточную активность при твердении в начальные сроки (в т. ч. за счет содержания мелких фракций), а с другой – содержит достаточное (до 15 % от массы цемента) количество крупных фракций (до 80–100 мкм и более), чтобы в длительной перспективе обеспечивать (поддерживать) гидратационный процесс в бетоне. Благодаря этому поддерживается уровень щелочности в его объеме, оцениваемый величиной  $\text{pH} \geq 11,8$  единиц, что является обязательным условием сохранности (отсутствия коррозии) стальной арматуры в бетоне [40; 42] наряду с его непроницаемостью, зависящей от состояния и раз-

меров пор и влияющей на коррозионную устойчивость и долговечность бетона и железобетона [43–49].

*Водоцементное отношение.* На строение порового пространства цементного камня и бетона наибольшее влияние оказывает начальное водосодержание, оцениваемое водоцементным отношением. Чем больше начальное водосодержание, тем толще водные прослойки, окружающие цементные зерна (флокулы) в начальный период и составляющие основу образования системы взаимосвязанных капиллярных пор, хаотично распределенных по всему объему цементного камня; чем значительнее разница между количеством воды, необходимым для химических реакций гидратации цемента (теоретически  $\approx 23\text{--}25\%$ , практически – менее  $18\text{--}20\%$ ) и начальным водосодержанием, тем больше объем пор. С течением времени в условиях продолжающейся гидратации цемента общая и капиллярная пористость цементного камня уменьшается, так как продукты гидратации цемента занимают часть пространства, занятого вначале водой затворения.

На рис. 1.2 приведены экспериментальные данные [22; 25], характеризующие влияние начального водоцементного отношения на открытую капиллярную пористость, определенную по водопоглощению цементного камня (рис. 1.2, *а*) и цементно-песчаного раствора (рис. 1.2, *б*) на цементах двух разных заводов в возрасте 28 суток. Из этих данных видно, что объем открытых пор как в цементном камне, так и в цементно-песчаном растворе едва ли не линейно возрастает по мере увеличения водоцементного отношения. Одновременно в этих источниках был отмечен рост среднего размера радиуса пор с увеличением водоцементного отношения.

В табл. 1.3 приведены данные [17; 26; 43], подтверждающие (метод ртутной порометрии) тенденцию роста общего объема пор и интегральной пористости цементного камня и мелкозернистого бетона, образцы которых твердели в наиболее благоприятных условиях – в воде.

Таким образом, превышение начального водосодержания над рациональным (с учетом конкретных условий укладки, формирования и уплотнения бетона) недопустимо с позиций повышения его непроницаемости и обеспечения эксплуатационной надежности и долговечности.



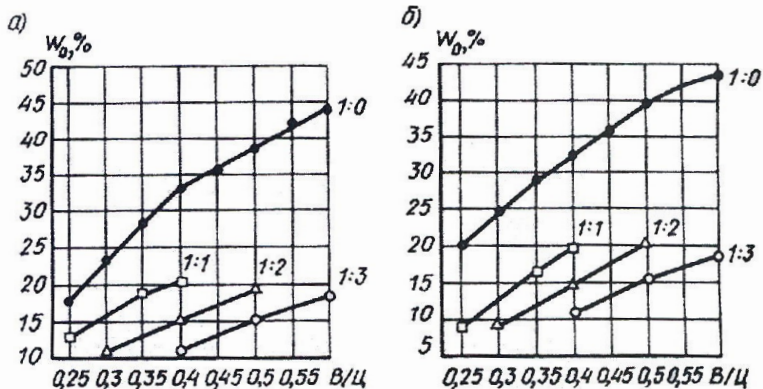


Рисунок 1.2 – Тенденция увеличения объема открытых (капиллярных) пор цементного камня (а) и цементно-песчаного раствора (б) в зависимости от водоцементного отношения

Свойства заполнителей из плотных горных пород (мелкого и крупного) могут оказывать существенное влияние на увеличение объема общей и капиллярной пористости бетона.

Таблица 1.3

Влияние В/Ц на пористость цементного камня и мелкозернистого бетона

В/Ц цементного каменя	В/Ц раствора (состав)	Интегральная пористость		Общая пористость по объему
		см <sup>3</sup> /г	в % по объему	
0,25	–	0,105	19,5	–
0,30	–	0,100	18,9	–
0,35	–	0,145	24,8	–
0,50	–	0,219	33,0	–
–	0,20 (1:1)	–	–	30,2
–	0,23	–	–	32,3
–	(1:1,3)	–	–	38,2
–	0,28	–	–	59,0
	(1:1,8)			
	0,40			
	(1:3,5)			

Во-первых, поверхность зерен заполнителей (собственной пористостью которых можно пренебречь) смачивается водой затворения при приготовлении бетона и на них формируются адсорбционно-диффузионные «пленки» воды, суммарный объем которых может составить до 40–50 л/м<sup>3</sup> бетона [50; 51]. Этот объем жидкой фазы должен быть заполнен продуктами гидратации цемента для обеспечения сцепления цементного камня с поверхностью заполнителей в бетоне и создания условий для их совместной «работы» под нагрузкой. Известно [52–55], что в результате одностороннего диффузионного заполнения этих объемов жидкой фазы (за счет гидратации частиц цемента, окружающих зерна заполнителей и имеющих собственные жидкостные сольватные оболочки) контактная зона имеет неравномерное распределение плотности и пористости (максимум объема пор непосредственно у поверхности заполнителя), характеризуется повышенным (в сравнении с объемом цементного камня) наличием крупных кристаллогидратов портландита –  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , и гидросульфатоалюмината, при ориентации этих кристаллогидратных новообразований по нормали к плоскости поверхности заполнителя, что в целом формирует более пористую структуру цементного камня у поверхности зерен заполнителей на глубину, примерно, от 10–15 до 30–50 мкм.

Во-вторых, во взаимосвязи с величиной начального водосодержания (водоцементного отношения) бетона могут создаваться условия для образования седиментационных пор [1; 10; 31]. Это отражение избытка водосодержания и наличия крупных зерен заполнителя лещадной формы. В результате под нижней гранью такого заполнителя собирается мигрирующая под действием силы тяжести и стяжения (контракции) объема цементного теста жидкость, образуя седиментационные поры. Данное явление приводит как к росту общей пористости и проницаемости бетона, так и может существенно снизить его качественные характеристики, т. к. ухудшается качество сцепления цементного камня с заполнителем, а поры одновременно являются концентраторами напряжений при работе бетона под нагрузкой, что отражается в снижении прочностных и упругих характеристик бетона.

В-третьих, заполнители (как природные, так и дробленые) содержат некоторое количество мелких пылевидных фракций, харак-

теризующихся высокой удельной поверхностью и водопотребностью (особенно глино-, илообразные). Вследствие высокой адсорбционной способности они могут существенно повысить водосодержание бетона заданной консистенции, что сопровождается ростом объема и сечений капиллярных пор, по аналогии с влиянием инертных минеральных добавок к портландцементу, рассмотренному ранее.

*Влияние химических добавок* на формирование структуры цементного камня и бетона в современной технологии связано как с прямым их действием и целенаправленным применением, так и с побочными эффектами от их введения в бетон [56–58].

*Добавки, уплотняющие структуру* цементного камня (бетона), вводят с целью понижения проницаемости за счет эффекта кольматации (заполнения, закупоривания) его пор. Их подразделяют на вещества органического происхождения (водорастворимые смолы и др.) и неорганического (соли ряда неорганических кислот). В первом случае их эффективность обеспечивается тем, что молекулы (значительных размеров) вещества, например, ряда эпоксидных смол, не вступая в реакции с продуктами гидролиза-гидратации цемента постепенно «отжимаются» в неплотности (поры) формирующейся структуры цементного камня (бетона) и заполняют (частично или полно) их, делая трудно- или полностью непроницаемыми для воды, растворенных в ней реагентов и даже газов [59–61].

Неорганические добавки – вещества, используемые с указанной ранее целью, способны вступать в реакции с гидроксидом кальция и продуктами гидратации клинкерных минералов алюминатно-ферритной группы с образованием трудно-, или нерастворимых в воде соединений, характеризующихся значительно большим объемом, чем объем вступающих в реакцию веществ, что также обеспечивает эффект кольматации пор цементного камня (бетона) и роста его непроницаемости. Одновременно и те, и другие добавки проявляют побочные эффекты, которые следует учитывать при их использовании. В частности, молекулы органических веществ, «защемляясь» между кристаллогидратными новообразованиями цементного камня и в зонах контакта последнего с зернами заполнителей, способствует росту трещиностойкости и ударной вязкости бетона, но, одновременно, – снижению модуля упругости

и росту ползучести; составляющие неорганических соединений – солей (хлористых и нитратов) опасны для стальной арматуры; сульфаты – могут являться катализаторами коррозии бетона; есть проблемы со сложно контролируемым ускорением процесса схватывания бетона под влиянием ряда из них. С учетом этих обстоятельств их применяют в бетонах специального назначения, а для общестроительного использования широкое распространение получило *применение пластифицирующих добавок*.

В данном случае цель – улучшение структуры бетона, снижение объемов общей и капиллярной пористости и уменьшение сечений капилляров, обеспечивается побочным эффектом этих добавок, позволяющих существенно понизить начальное водосодержание или водоцементное отношение бетона при сохранении необходимой для конкретных условий ведения работ формоустойчивости (удобоукладываемости) смеси [1; 62–65]. При этом оценка эффективности применения пластифицирующих добавок с позиций влияния на поровое пространство бетона базируется на физическом аспекте явления, то есть взаимоувязывается с ранее рассмотренной зависимостью объема и характеристик пористости с изменением водоцементного отношения. Возможное влияние крупных молекул поверхностно-активных веществ (ПАВ), входящих в состав добавок, на состояние порового пространства бетона не учитывается и относится к общему эффекту от понижения водосодержания. Этот подход характерен и в случае применения современных, высококачественных пластифицирующих добавок (гиперпластификаторов) на основе поликарбоксилатных смол [66–68], позволяющих снизить водосодержание цементного теста консистенции нормальной плотности на 35–40 % (до значений  $K_{нт} \leq 0,2$ ). Исключением из этого правила является оценка влияния на проницаемость и долговечность бетона добавок, обладающих комплексным «пластифицирующе-поризующим» эффектом и содержащих гидрофобизирующие ПАВ [65; 69]. Их влияние на повышение водонепроницаемости бетона учитывается как важнейший фактор роста его долговечности.

*Возраст цементного камня и бетона.* С течением времени в условиях продолжающейся гидратации цемента уменьшается общая и капиллярная пористость цементного камня и увеличивается объем пор в единице его объема, представленный порами новообразова-

ний (геля) радиусом менее  $40\text{--}50 \text{ \AA}$  и контракционными ( $50\text{--}10\,000 \text{ \AA}$ ;  $5\text{--}1000 \text{ нм}$ ), согласно тенденции, выраженной графиками рис. 1.3.

Поскольку изменения в строении порового пространства цементного камня связаны с продолжением процесса гидратации цемента, поэтому они значительнее для цементов с меньшей удельной поверхностью, процесс гидратации которых идет медленнее, чем тонкомолотых. Так, по данным [30] с увеличением возраста цементного камня от 28 до 360 суток капиллярная пористость цементного камня на цементе с удельной поверхностью  $S_{уд} = 0,3 \text{ м}^2/\text{г}$ , представленная капиллярами с радиусами от  $300$  до  $1\,000 \text{ \AA}$  уменьшились в 3 раза, в то время как на цементе более тонкого помола ( $S_{уд} = 0,45 \text{ м}^2/\text{г}$ ) практически не изменилась.

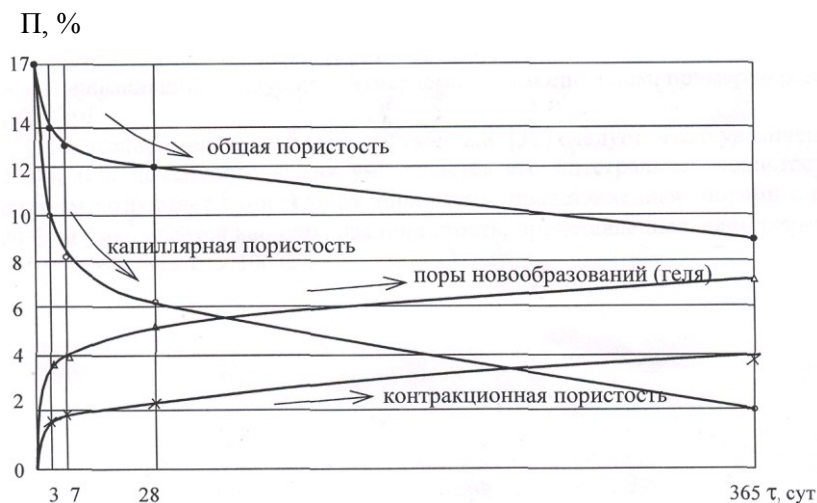


Рисунок 1.3 – Тенденция изменения пористости бетона во времени

Подобное влияние времени твердения цемента на интегральную и дифференциальную пористость цементного камня отмечалось в ряде других работ. В частности, методом ртутной порометрии получены данные [17; 39], частично представленные в табл. 1.4, из которых следует, что с увеличением возраста образцов снижается интегральная пористость цементного камня (как собственно его, так

и в цементно-песчаном растворе), и уменьшается объем капиллярных пор радиусом  $r > 300 \text{ \AA}$  (30 нм) при одновременном увеличении объема пор с меньшими размерами сечений.

Таким образом, продолжительное твердение в благоприятных условиях, обеспечивающих развитие процесса гидратации цемента, способно существенным образом повлиять на структуру и свойства бетона с позиций повышения его качественных характеристик.

Таблица 1.4

Изменения в строении порового пространства цементного камня во времени

Характеристика образцов	Продолжительность твердения образцов в воде, сут.	Интегральная пористость		Объем пор с радиусами от 50 до 1000 $\text{\AA}$ $\text{см}^3/\text{г}$
		$\text{см}^3/\text{г}$	%	
Цементный камень (В/Ц = 0,25)	28	0,105	19,5	0,095
	180	0,068	13,6	0,033
Раствор состава 1:3 (В/Ц = 0,5)	28	0,07	14,8	0,038
	180	0,051	10,8	0,020

Это влияние может быть оценено [1; 2; 18; 25; 70; 71] степенью гидратации цемента, отражающей уровень развития процесса взаимодействия, вяжущего с водой и по физической сути являющейся отношением количества гидратированного цемента к исходному. Поскольку выделение «гидратированного» цемента из общего количества (если он прогидратировал не полностью на 100 %, как это имеет место на практике) не представляется возможным, то на основании примерного постоянства количества химически связанной воды в кристаллогидратных новообразованиях цементного камня, степень гидратации цемента ( $\alpha$ ) экспериментально определяют, например, как отношение количества связанной воды ( $w$ ) в пробах цементного камня путем прокаливании при  $t \sim 600\text{--}650 \text{ }^\circ\text{C}$  на заданной стадии (например, в проектном (28 сут) возрасте) твердения (для конкретных условий, В/Ц и пр.), к количеству воды при полной

гидратации, т. е.  $\alpha = W/W_0$ , где  $W_0 \sim 0,227$  (примерно 23 % от массы вяжущего) [1; 2; 25; 26].

На рис. 1.4 представлена графическая иллюстрация этой закономерности в виде изменений объема открытых пор [25] образцов цементного камня, изготовленных при различных В/Ц и твердевших в нормально-влажностных условиях после пропаривания.

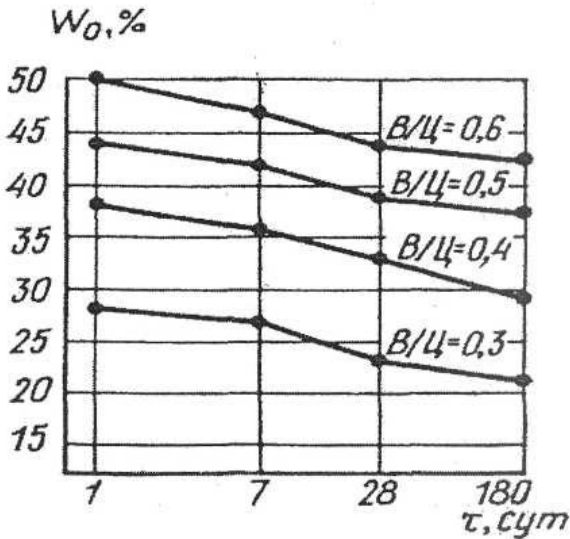


Рисунок 1.4 – Зависимость объема открытых пор и показателя их среднего размера с течением времени

По существу, явления, отраженного данными настоящего раздела, снижение объемов общей и капиллярной пористости, уменьшение сечений капилляров является следствием повышения со временем степени гидратации цемента. Для его развития особое значение имеет начальный период твердения бетона, так как наиболее интенсивно процесс гидратации цемента протекает в первые 1–3 суток взаимодействия с водой. Поэтому обеспечение благоприятных условий твердения бетона в этот период является залогом формирования качественной структуры материала.

### 1.1.3. Влияние условий твердения на пористость и свойства бетона

Условия твердения – это один из определяющих факторов, влияющих на строение порового пространства цементного камня (бетона). При рационально подобранном составе бетона и качественном его уплотнении, испарение воды на начальной стадии твердения бетона является одной из основных причин образования в его структуре макрокапиллярных пор. В исследованиях [12; 13] выполненных в 60–70-ых годах XX века показано, что вода, находящаяся в порах и капиллярах с радиусами более  $1000 \text{ \AA}$ , будет испаряться из таких пор до установления равновесной влажности даже если воздух насыщен водяными парами, то есть поры и макрокапилляры в бетоне могут обезвоживаться даже в камерах нормального твердения при высокой относительной влажности воздуха ( $\varphi \geq 90 \%$ ).

В твердеющем цементном камне, вследствие развития реакций цемента с водой и перераспределения последней, проявляется эффект контракции, в результате которого в его объеме возникает некоторое разрежение (вакуум), так как абсолютный объем формирующихся новообразований меньше суммарного абсолютного объема ионов клинкерных минералов и воды, вступивших в реакцию. *При твердении бетона в воде* (в наиболее благоприятных условиях) создающийся вакуум способствует непрерывному подсосу влаги, и капиллярное пространство, свободное от продуктов гидратации цемента, практически полностью заполняется жидкой фазой. В этих условиях развитие гидратации цемента обеспечивает формирование порового пространства, характеризующегося возрастающими объемами пор новообразований (геля), уменьшением сечений контракционных пор и большим количеством микрокапиллярных пор  $\leq 1000 \text{ \AA}$  или  $\leq 0,1 \text{ мкм}$ ) при снижении количества макрокапиллярных пор ( $\geq 10\,000 \text{ \AA}$  или  $\geq 1 \text{ мкм}$ ).

Данные [26; 72] табл. 1.5 для образцов из цементно-песчаного раствора состава 1:2, приготовленных из пластичной растворной смеси при В/Ц, равном 0,3, твердевших в различных условиях, показывают, что при твердении в воде уменьшается общая (интегральная) пористость вследствие повышения степени гидратации цемента; при этом возрастает относительная пористость, представ-



ленная капиллярами с радиусами менее 1000 Å, при одновременном существенном уменьшении доли макрокапилляров с радиусами более 10 000 Å, в сравнении с твердением в «нормальных» условиях при относительной влажности воздуха  $\phi \geq 85\%$ .

Таблица 1.5

Влияние условий твердения на характеристики пористости цементно-песчаного раствора

Условия твердения	Общая пористость, %	Количество пор (в % от общей пористости), с радиусом			
		< 50 Å	от 50 до 10 000 Å	от 1000 до 10 000 Å	>10 000 Å
В воде	16,6	17,8	40,2	39,5	11,5
Воздушно-влажные	17,4	15,0	20,6	25,7	38,4

При тепловой интенсификации твердения бетона (тепловые обработки сборных изделий и разнообразные прогревы бетона монолитных конструкций) большое влияние на строение порового пространства цементного камня (бетона) оказывают режимы тепловой обработки, в частности, время и условия предварительной выдержки, скорость подъема температуры, продолжительность и температура изотермического прогрева, скорость охлаждения, условия хранения изделий и распалубки монолитных конструкций. Перечисленные параметры оказывают существенное влияние на общую и дифференциальную пористость бетона. В сравнении с образцами нормального влажностного (тем более водного) твердения в образцах бетона после пропаривания или прогрева наблюдается увеличение интегральной пористости, главным образом за счет повышения доли макропор [17; 22; 25; 32; 72; 73 и др.]. В частности, по экспериментальным данным интегральная пористость образцов из цементного камня на цементе с удельной поверхностью 0,3 м<sup>2</sup>/г после пропаривания составила 0,115 см<sup>3</sup>/г, после 28 суток водного тверде-

ния  $\sim 0,0607 \text{ см}^3/\text{г}$ ; пористость раствора на том же цементе после пропаривания была равна  $\sim 0,092 \text{ см}^3/\text{г}$ , а после 28 суточного твердения в воде  $\sim 0,066 \text{ см}^3/\text{г}$ .

Сравнение дифференциальной пористости цементного камня после 28 суток водного твердения и после пропаривания показало, что если объем пор радиусом от 300 до 1000 Å (до 0,1 мкм, т. е. микропор) у цементного камня 28 суточного водного твердения составил  $\sim 74,1 \%$ , то у пропаренного объем тех же пор был равен 39,8 % при одновременном увеличении количества более крупных пор. Эта тенденция сохраняется и для образцов бетона (по указанным экспериментам – мелкозернистого). При этом последующее хранение в воде пропаренных образцов цементного камня и раствора способствует уменьшению интегральной пористости и среднего радиуса капилляров, однако менее значительно в сравнении с образцами бетона нормально-влажностного твердения или постоянного (до 28 суток) твердения в воде.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что даже при высокой степени влажности воздушной среды нельзя избежать явления испарения и потерь влаги из твердеющего бетона. При этом внутреннее перераспределение жидкой фазы на продолжение гидратации цемента (в целом благоприятный процесс, способствующий снижению общей пористости бетона и уменьшению объемов грубокапиллярной пористости) может быть ограничено оттоком воды на испарение. При *твердении бетона в воздушных условиях* с пониженной влажностью воздуха так и происходит. Исследованиями и практикой монолитного строительства при повышенных температурах воздуха и при производстве сборных изделий с «сухими» вариантами прогрева (электромагнитные камеры, отходящие горячие газы и пр.) выявлена недопустимость таких условий твердения бетона без дополнительных мер по его защите с целью обеспечения требуемого качества (физико-механических и эксплуатационных свойств) материала и строительных конструкций в целом. По существу эти мероприятия направлены на предотвращение неконтролируемого и некомпенсируемого удаления (испарения) воды затвердения бетона, как причины, обуславливающей недостаточное развитие процессов гидролиза-гидратации цемента, снижение темпа образования и количества образующихся кристаллогидратов, а в

результате – ухудшение условий формирования «реакционных каемок» из кристаллогидратных новообразований, окружающих отдельные остаточные цементные частицы, что сопровождается ростом размеров контракционных пор при одновременном уменьшении зон (площадей) взаимных контактов между реакционными каемками в «бетоне Юнга» [7; 51]. Это в целом приводит к формированию структуры цементного камня и бетона (для бетона дополняется объемом пор у поверхности заполнителей), которая характеризуется как возросшим объемом общей пористости, так и увеличением количества и размеров сечений макрокапиллярных пор. При этом контракционные поры в условиях нерегулируемого испарения воды затворения практически могут перейти в разряд макрокапиллярных открытых пор (т. е.  $r > 0,1$  мкм), т. к. сообщаются между собой и имеют «выходы» в объеме цементного камня к внешним поверхностям конструкций. Как известно (см. п. 1.1.1) размер их сечений может достигать  $\geq 1$  мкм и они способны существенно ухудшить свойства бетона.

Оценивая влияние рассмотренных основных факторов на формирование порового пространства цементного камня и бетона на заполнителях из плотных горных пород приходим к следующим выводам. Среди технологических факторов, таких, как свойства цемента (минералогический и вещественный состав, тонкость помола) характеристик состава бетона (расход вяжущего, свойства заполнителей, водоцементное отношение), а также условий и продолжительности твердения, наиболее значимыми для бетона общестроительного назначения являются водоцементное отношение и условия его твердения. А в случае рационального выбора вида и свойств цемента, подбора состава бетона (включая расчет количественного соотношения компонентов, водоцементного отношения и использования химических добавок) и качественного уплотнения бетона в «теле» конструкции решающее значение на формирование структуры бетона оказывают условия его твердения. В зависимости от них, при прочих равных условиях, по-разному развиваются физико-химические процессы, обеспечивающие структурообразование, рост прочности бетона и формирование его эксплуатационных свойств.

## 1.2. Методы, приемы и режимы ухода за твердеющим бетоном

На основании ранее изложенного можно констатировать, что уход за бетоном при твердении в сухой воздушной среде состоит в обеспечении благоприятных температурно-влажностных условий для развития процессов гидролиза-гидратации цемента (повышения степени гидратации и структурообразования цементного камня). Обобщение данных руководств и рекомендаций, ряда научно-исследовательских работ и информации о практической реализации приемов защиты твердеющего бетона [74–88] представлено в виде табл. 1.6 и 1.7, отражающих сущность и область применения различных вариантов ухода за ним. Их анализ показывает, что у каждого из приведенных приемов есть «сильные» и «слабые» стороны, ограничивающие область рационального применения.

При этом основными критериями назначения *режима ухода* за бетоном действующими нормативами рекомендуется принимать время и условия, при которых бетон набирает прочность не менее 50 % от проектной (проектного возраста – 28 суток), при рекомендуемой ее величине  $\geq 70$  % от проектной. В последнем случае воздействие воздушно-сухих условий при дальнейшем твердении бетона на его прочность и качество структуры сводится к минимуму.

На рис. 1.5 приведены данные, отражающие кинетику роста прочности образцов бетона в воздушно-сухих условиях ( $t \sim 25$  °С;  $\phi \sim 60$  %) при гидроизоляции поверхности (герметичное укрытие пленкой) в течение 28–5–4–2 суток (№ 1–№ 4) и без нее (без защиты; № 5).

Эти данные свидетельствуют о недостаточности положения рекомендаций по минимально необходимой прочности бетона даже для указанных (не самых «жестких») условий его твердения на уровне 50 % от проектной, прежде чем прекращать уход за ним при твердении на воздухе (продолжительность ухода – 4 суток (график № 3); снижение прочности бетона в проектном возрасте составило  $\sim 15$  %. Более приемлем режим, обеспечивающий 70 % уровень прочности бетона (уход – 6 суток; № 2) до прекращения ухода за ним, т. к. в этом случае в проектном возрасте снижение прочности составило менее 10 т. е.  $\sim 8$  %.

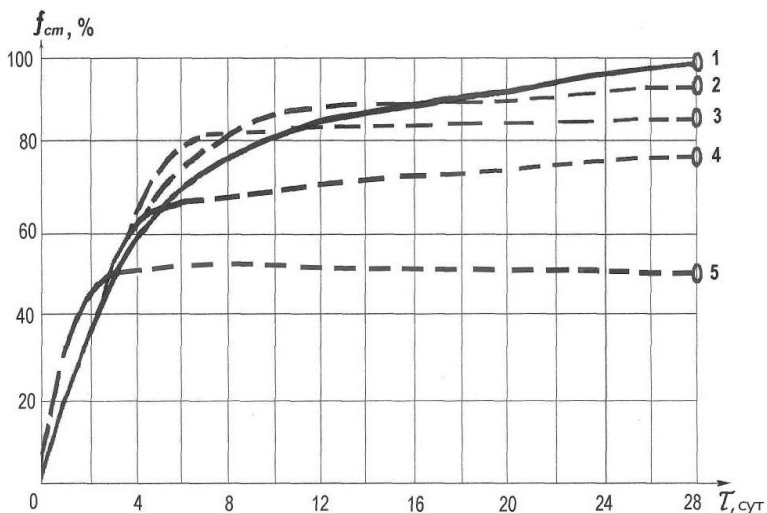


Рисунок 1.5 – Зависимость относительной прочности бетона от продолжительности ухода (№ 1 – уход 28 сут; № 2 – 6 сут; № 3 – 4 сут; № 4 – 2 сут; № 5 – без ухода)

Оценка информации о методах и приемах ухода за бетоном, приведенных в табл. 1.6, показывает, что наиболее благоприятные условия для твердения бетона (формирования плотной структуры) обеспечивает вариант ухода – «покрывающие водные бассейны». По существу, они близки (при герметичной и непроницаемой для воды опалубке) к водным условиям твердения бетона, что обеспечивает углубленное развитие процесса гидратации цемента, формирование структуры цементного камня и бетона, характеризующейся наименьшими объемами макрокапиллярных пор (см. п. 1.1.3).

Таблица 1.6

## Приемы выдерживания свежееуложенного бетона

Мероприятие	Технологическая операция при защите поверхности свежееуложенного бетона	Материалы для ухода за бетоном
Покрывающие водные бассейны	Твердение под слоем воды	Вода
Периодическое увлажнение поверхности водой	Орошение и поливка водой	Вода
Укрытие гидрофильным материалом с постоянным увлажнением	Укладка гидрофильного материала, постоянное увлажнение его водой или создание защитного слоя из воды	Опилки; песок; камышовые, соломенные или иные маты; мешковина; поролон или иные влагоемкие материалы; вода
Укрытие пароводонепроницаемым рулонным материалом	Укрытие бетонной конструкции пленкой с созданием вокруг нее замкнутого объема	Полимерные пленки, брезент и другие рулонные материалы
Обработка поверхности пленкообразующими составами	Нанесение жидкости на поверхность бетона	Растворы, суспензии, эмульсии
Пропитка гидрофобными композициями	Нанесение на свежееуложенный бетон и его пропитка гидрофобными жидкостями	Гидрофобные композиции
Твердение бетона под инвентарными устройствами типа шатров, навесов и т. д.	Временное устройство над бетонной конструкцией	Тенеобразующие укрытия; брезент; синтетические ткани
Защита термоизоляционными покрытиями	Укладка термоизоляционного материала и его закрепление	Полимерные пленки, инвентарные и произвольные термо- (влаго-) изоляционные покрытия
Тепловое воздействие на твердеющий бетон	Форсированный парозлектропрогрев бетонной смеси и термосное выдерживание под влиянием теплоты окружающего пространства. Импульсный нагрев поверхностного слоя бетона и др.	Солнечная энергия пар, электроэнергия, рулонный материал (пленки, ткани) для временного укрытия бетона

Таблица 1.7

**Ориентировочная область применения приемов ухода за монолитными бетонными и железобетонными конструкциями**

Конструкции	Вариант ухода за бетоном
Фундаменты ленточные и столбчатые, ростверки. Подготовка под полы и фундаменты. Колонны, ригели, прогоны, балки	Укрытие пароводонепроницаемым рулонным материалом: применение инвентарных устройств. Укладка на бетон гидрофильных материалов с постоянным их увлажнением, укрытие готовыми полимерными пленками или термоизоляционными покрытиями
Плиты покрытий и перекрытий. Тонкостенные пространственные покрытия (оболочки, купол, своды, висячие покрытия)	Защита термоизоляционным покрытием, укрытие гидрофильным материалом с постоянным увлажнением, или пароводонепроницаемыми рулонными пленками
Дорожные и аэродромные покрытия, облицовки оросительных каналов, полы и площадки промышленных зданий	Обработка поверхности пленкообразующими составами, полимерными саморазрушающимися пенами, укрытие полимерными пленками

Одновременно реализация этого приема ухода за твердеющим бетоном сопряжена с существенными дополнительными затратами, трудоемка и осуществима для ограниченного типажа строительных конструкций. Создание «бассейна» требует либо увеличенной по высоте (относительно типоразмера возводимых (устраиваемых) конструкций) опалубки, либо устройство дополнительных герметичных приспособлений на требуемую высоту. Необходима организация подачи и поддержания уровня воды в бассейне, а также контроль за ее температурой (примерное равенство с температурой твердеющего бетона для исключения перепада). В целом этот вариант ухода за твердеющим бетоном наиболее целесообразен для конструкции плитной конфигурации со значительными неопалубленными поверхностями и в случаях, когда к бетону предъявляют повышенные требования по плотности, непроницаемости, долговечности (по водопоглощению, водонепроницаемости, морозо- и солестойкости и др.) и прочности, в частности, для аэродромных, дорожных плит покрытий, конструкций и изделий специ-

ального и гидротехнического строительства. В общестроительном производстве данный вариант ухода применим ограниченно.

*Непрерывное орошение* (дождевание) реализуется постоянным распылением воды с помощью специальных механических устройств или эжектированием с помощью сжатого воздуха. Обязательными условиями являются начальная прочность бетона, предотвращающая размыв его поверхности в начале ухода и в дальнейшем, и непрерывное распыление воды, исключающее высыхание поверхности бетона конструкций. Существенными недостатками являются необходимость предварительной выдержки бетона перед началом ухода и неконтролируемых в этот период потери им влаги, а также необходимость сбора и отвода собирающейся при таком уходе воды.

*Периодическое увлажнение* поверхности водой, т. е. полив бетоном водой характеризуется теми же недостатками, что и непрерывное орошение. При этом недопустимо, особенно для конструкций со значительными неопалубленными поверхностями и повышенными требованиями к бетону по эксплуатационным характеристикам (водопоглощению, водонепроницаемости, морозостойкости и др.), периодическое чередование увлажнения-высыхания его поверхности. В таком случае периодический полив водой (особенно имеющей температуру ниже температуры бетона) может сопровождаться обратным эффектом – ухудшением качества (структуры) бетона.

С позиций обеспечения качественного ухода за твердеющим бетоном методом полива целесообразно сочетать его с укрытием поверхности гидроизолирующими материалами (пленками). Применение его индивидуально в современных условиях строительства не рационально, а в большинстве случаев – недопустимо.

*Укрытие гидрофильными материалами* с последующим постоянным увлажнением его водой также требует предварительной выдержки бетона до набора достаточной прочности для выполнения работ по уходу. В целом этот прием создает в дальнейшем (особенно при наличии рулонных пористых гидрофильных материалов) благоприятные условия для твердения бетона (при регулярном увлажнении защитного слоя), однако характеризуется значительным объемом дополнительных работ, в том числе и по очистке защищаемой поверхности бетона по окончании ухода. В этой связи



ограниченно применим для ухода за конструкциями со скрытыми в процессе эксплуатации поверхностями категории «А-7», или устройстве подготовок под основания и т. п.

*Укрытие пароводонепроницаемыми материалами* (рулонированными) – достаточно эффективный прием при выполнении герметичного укрытия конструкций (неопалубленных поверхностей). В противном случае создается видимость защиты, что может привести к ухудшению качества бетона.

Эффективность этого приема существенно различается при использовании брезента (или подобных материалов) и пароводонепроницаемых полиэтиленовых и иных) пленок. Для синтетических материалов характерно создание «парникового эффекта» внутри объема, что сопровождается интенсивным ростом в нем (и бетоне) температуры. Разогрев бетона (включая эффект от экзотермии цемента) может быть очень значительным и достигать 50 °С и более. В ряде случаев это явление, способствующее повышению темпа роста прочности бетона, является положительным фактором и целенаправленно используется. Однако при этом следует учитывать трудноконтролируемый процесс испарения воды затвердения из разогретого бетона, т. к. и полностью герметизировать объем рулонными материалами практически не представляется возможным.

В случаях строительства с использованием высокопрочных бетонов, характеризующихся низким начальным водосодержанием, или при повышенных требованиях к нему в части водо-, морозо- и солестойкости, разогрев бетона до температуры более 40 °С недопустим, т. к. приводит к недобору прочности бетона в проектном возрасте (и в дальнейшем) и росту его пористости.

*Уход с помощью пленкообразующих составов* – один из наиболее надежных и малотрудоемких вариантов создания защиты твердеющего бетона.

Нанесение защитных жидких составов с помощью сжатого воздуха (напылением) возможно для любых конфигураций разнообразных конструкций. Формирующаяся пароводонепроницаемая (или труднопроницаемая) пленка на поверхности бетона практически полностью исключает или чрезвычайно затрудняет испарение влаги из защищаемого бетона. Коэффициент влагозащиты у большинства применяемых составов превышает  $K_3 \geq 0,9$  при нормирова-

мом значении  $K_3 \geq 0,7$ . В качестве пленкообразующих материалов предложено к использованию [75–77; 80; 83] в разных странах за период с 80-х годов XX века множество составов, которые готовят в виде органических растворов или водных дисперсий и эмульсий высокомолекулярных веществ (поливинилацетата, эпоксидных смол и латексов (искусственных и натуральных), парафинов (твердых, мягких и жидких), нефтеполимерных смол, битумов и др.).

К недостаткам этого, в целом универсального и легкоосуществимого метода защиты бетона, следует отнести, во-первых, провоцируемый образующейся пленкой саморазогрев бетона, во-вторых, ухудшение сцепления его «старых» и «новых» слоев при бетонировании монолитных конструкций (или отделки к бетону), а также то, что самые дешевые и доступные из них (на битумах и нефтеполимерных смолах) окрашены в темные тона, что усугубляет эффект неконтролируемого разогрева бетона.

С целью снижения термического эффекта пленкообразующие составы делают осветленными или светоотражающими (например, поморолы ПМ-86, ПМ-100А, ПМ-100АМ) либо вынужденно устраивают по нанесенным на бетон составам дополнительные теплоизолирующие или тенеобразующие укрытия, что естественно усложняет и удорожает уход за бетоном.

С целью устранения отрицательного эффекта от ухудшения сцепления слоев бетона (или бетона с отделкой) предложены самораспадающиеся со временем составы для защиты бетона, которые, однако, не гарантируют полного эффекта исчезновения пленки, особенно при высоких темпах ведения бетонных работ.

Вариант защиты твердеющего бетона путем *пропитки гидрофобными композициями* также близок к отраженной в настоящей монографии технологии защиты его уплотняющими структуру веществами. Однако он характеризуется сопутствующим отрицательным эффектом воздействия на внешний (защищаемый) слой бетона (как это будет показано далее). В частности, гидрофобизирующие вещества, проникая в объем цементного камня, замедляют реакции гидролиза-гидратации цемента, что сопровождается замедлением темпа роста прочности бетона контактного слоя и существенно снижает ее как в начальные сроки твердения, так и к проектному возрасту. По этой причине и из-за неоднородных свойств обработки-

ваемой поверхности ухудшается сцепление между слоями «старого» и последующего слоя бетона.

Варианты защиты твердеющего бетона под *тенеобразующими* дополнительными устройствами и под *термоизолирующими* покрытиями фактически должны применяться с приемами гидроизоляции неопалубленных поверхностей бетона тем или иным способом, которые рассмотрены ранее. В противном случае потери воды затворения из бетона и ухудшение его физико-технических свойств неизбежны. Эти меры защиты твердеющего бетона могут быть эффективными только дополняя основные и рассмотренные ранее приемы.

Следует учитывать, что негерметичные опалубки (особенно выполненные из негидрофобизированного дерева), не являются надежной защитой твердеющего бетона от испарения воды затворения.

*Тепловое воздействие на твердеющий бетон*, как прием его защиты от потери влаги в сухой и жаркой среде последующего твердения и эксплуатации, основывается на ускорении процесса гидратации цемента и химического связывания им значительной части воды затворения в процессе прогрева. Как известно и уже отмечалось ранее (п. 1.1.3) повышение температуры реагирующей системы «цемент-вода» сопровождается ускорением процессов структурообразования цементного камня и бетона. С одной стороны, это действительно способствует ускоренному переходу части воды затворения в химически связанное состояние, упрочнению структуры материала и, таким образом, понижает возможность и затрудняет развитие процесса испарения воды из бетона в дальнейшем. Но, с другой стороны, повышение температуры твердения цементного бетона сопровождается ростом объема капиллярной пористости и его проницаемости, а также требует дополнительных энергетических, трудовых и материальных затрат. В связи с изложенным прием прогрева бетона за счет дополнительного подвода тепла (см. табл. 1.6) в монолитном строительстве в летний период практического применения не получил. В большей степени (там, где это не приводит к ухудшению свойств бетона) используют ранее рассмотренные приемы ухода, сопровождающиеся его «саморазогревом» за

счет солнечной энергии, парникового эффекта от пленок (рулонных и пленкообразующих составов) и экзотермии цемента.

### **1.3. Анализ эффективности и технологичности приемов первичной защиты твердеющего бетона, направление исследований**

Оценка рассмотренных в предыдущем разделе методов и приемов ухода за твердеющим бетоном показывает, что каждый из них характеризуется определенными достоинствами в сочетании с недостатками, связанными как с возможностью их реализации (т. е. характеризуются технологичностью реализации и наличием рациональной области применения), так и с влиянием на формирующуюся структуру и свойства защищаемого бетона. Метода ухода, который был бы универсальным и применимым по всему (чрезвычайно широкому) спектру строительных конструкций даже общестроительного назначения (не затрагивая специальные виды строительства) не предложено. Вероятно, что его просто не может быть. Однако также очевидно, что существует объективная необходимость совершенствования методов и приемов защиты твердеющего бетона с целью упрощения работ по ее осуществлению и обеспечению качественных характеристик этого материала, включая качество сцепления его «старых» и «новых» слоев в процессе строительства и при последующей отделке поверхностей различных строительных конструкций.

Среди практических приемов ухода за твердеющим бетоном критерию обеспечения его качества в наибольшей мере соответствуют варианты «влажностной» защиты (ухода), № 1 и № 3 по табл. 1.6, то есть твердение при постоянном контакте с водой неопалубленных поверхностей конструкций в течение расчетного времени. Как отмечалось в п. 1.2 при подробном рассмотрении этих методов защиты, они ограниченно применимы из-за возможности реализации для определенного «плитного» типа конструкций, бетонируемых на уровне «земля – 1-й этаж». Таким образом, затруднена или не представляется возможность ухаживать за наклонными, вертикальными поверхностями конструкций после съема опалубки.

Это же относится к варианту ухода за твердеющим бетоном методом орошения и периодического полива (№ 2, табл. 1.6). Постоянное орошение предполагает использование непрерывно работающего соответствующего оборудования, использования значительного количества воды, т. к. сбор «отработанной», во-первых, затруднен, а, во-вторых, она требует предварительной очистки перед повторным (многократным) использованием. Прием «периодического полива» практически должен осуществляться без высыхания поверхности бетона, т. к. в противном случае (см. п. 1.2) может быть получен обратный эффект – ухудшение его качества. Периодический полив может быть полезен в сочетании с укрытием конструкций пароводонепроницаемыми рулонными материалами (№ 4, табл. 1.6), особенно при уходе за бетоном после снятия опалубки.

Однако существенной особенностью ухода за бетоном с помощью рулонных (пленочных и иных) материалов (и его недостатком) является необходимость обеспечения герметичности укрытия. Нарушение герметичности приводит к развитию процесса испарения влаги в местах «разгерметизации» при постепенно нарастающем вовлечении в этот процесс окружающих объемов бетона, а как следствие – к ухудшению и неоднородности его качественных характеристик. Этот отрицательный эффект может усиливаться за счет значительного повышения температуры бетона под рулонными материалами, аккумулирующими (накапливающими) теплоту солнечной радиации (парниковый эффект) и тепло от экзотермии цемента.

В жарком климате (а также в летний период в Беларуси) температура саморазогрева бетона под пленочными укрытиями может достигать 50 °С и более, что практически соответствует варианту ухода за ним тепловым воздействием в начальный период (№ 9, табл. 1.6). Следует учитывать (см. п. 1.2), что тепловое воздействие, с одной стороны, способствует повышению темпа роста прочности бетона (ускоряется оборот опалубки), а с другой – сопровождается ростом объема (и сечений) капиллярной пористости бетона, что снижает его качество. В этой связи уход за бетоном «тепловым воздействием» под влиянием естественного (солнечная энергия) или подводимого от дополнительных источников тепла допустим с ограничениями, связанными с требованиями к свойствам бетона по

водопоглощению, водонепроницаемости, морозостойкости и защитной способности по отношению к стальной арматуре (для железобетонных конструкций).

Понижение эффекта саморазогрева бетона возможно за счет использования инвентарных термоизоляционных покрытий (№ 8, табл. 1.6). Однако данный вариант защиты ограниченно применим в основном для простых по конфигурации защищаемых поверхностей конструктивных элементов зданий по свежееуложенному бетону и ограниченно может быть реализован после съема опалубки. Как и дополнительно устраиваемые тенеобразующие приспособления, (№ 7, табл. 1.6) которые затрудняют дальнейшее производство работ (зачастую – невозможны). Кроме этого, использование теплоизолирующих материалов, способных сорбировать влагу и (или) паропроницаемых, требует предварительной гидроизоляции защищаемой поверхности бетона рулонными материалами или пленкообразующими составами. Такой же предварительной защиты испаряющей поверхности требует вариант № 7, т. е. устройство временных (инвентарных) тенеобразующих навесов, шатров и т. п.

Как уже отмечалось ранее, наиболее близок к планируемому к разработке варианту защиты твердеющего в сухой воздушной среде бетону метод пропитки гидрофобными композициями (№ 6, табл. 1.6). Нанесенные на обрабатываемую (защищаемую) поверхность бетона вещества, обладающие гидрофобным эффектом, диффундируют на некоторую глубину, благодаря чему создают защитный «барьер» по внешней кромке поверхности бетона. В результате затрудняется миграция воды в зону испарения и обеспечивается эффект защиты твердеющего бетона.

Однако одновременно гидрофобные вещества, молекулы которых в водной среде концентрируются у поверхности частиц цемента, частично блокируют доступ молекул воды к его поверхности. В результате замедляются реакции взаимодействия вяжущего с водой в слое цементного камня в бетоне, доступном для проникновения гидрофобизирующего вещества. Как следствие, обработанный ими бетон характеризуется наличием внешнего медленно твердеющего и набирающего прочность слоя, что ухудшает (ослабляет) сцепление «старого» и «нового» бетона в процессе строительства. Кроме того, гидрофобизация поверхности конструкций ухудшает условия

работ при последующей отделке их, а то и вовсе устраняет сцепление такой поверхности с материалами отделки.

Таким образом, оценка применяемых в строительной практике методов и приемов защиты твердеющего в воздушно-сухих условиях конструкционного бетона показывает необходимость их совершенствования и развития.

При этом наиболее технологичны и менее трудоемки приемы нанесения на обрабатываемую поверхность бетона (свежеуложенного или после снятия опалубки) защитных составов (веществ) методом распыления, например, сжатым воздухом. В этом случае возможна организация ухода за бетоном независимо от конфигурации конструкций и ориентации в пространстве защищаемых поверхностей.

На основании изложенного можно сделать вывод, что разработка предлагаемого и отраженного в монографии метода защиты бетона путем нанесения на его поверхность химических веществ, способствующих ускоренному уплотнению цементного камня внешнего слоя, перспективна и актуальна. Такой вариант защиты не тормозит, а наоборот – ускоряет процесс твердения цемента во внешнем (защищаемом) слое бетона (в отличие от использования гидрофобизирующих веществ), и не ухудшает качества сцепления «старых – новых» слоев бетона (и бетона с отделкой), как это имеет место при использовании гидрофобизирующих и пленкообразующих составов. Прием уплотнения структуры защищаемого слоя бетона позволяет ухаживать как за свежеуложенным бетоном, так и после снятия опалубки, используя вариант нанесения защитных составов методом напыления, т. к. при этом планируется использовать водорастворимые химические реагенты. Очевидно, что отсутствуют препятствия для совместного использования разрабатываемого приема защиты бетона в сочетании, например, с укрытием поверхности разнообразными пленками для создания парникового эффекта и тепловой интенсификации роста прочности бетона или в сочетании с влажностными методами ухода по табл. 1.6.

С учетом изложенного реализованной в исследованиях и отраженной в настоящей монографии целью работы являлась разработка технологии первичной защиты твердеющего бетона составами, ограничивающими или предотвращающими испарение воды затво-

рения за счет воздействия на структуру (уплотнения) его поверхностных слоев.

Для достижения поставленной цели выполнены и отражены в монографии исследования и их результаты по направлениям: разработка теоретических основ фильтрационно-диффузионной защиты твердеющего бетона с поверхности; выбор и оценка эффективности химических реагентов для ухода за бетоном; приготовление и приемы нанесения их растворов на защищаемую поверхность; влияние различных веществ на процесс их проникновения в бетон; влияние на процесс испарения влаги из бетона, а также на состояние обрабатываемой ими поверхности бетона; оценка физико-технических свойств бетона, включая качество сцепления слоев «старого – свежего» бетона и ряд других исследовательских работ, которые в совокупности составили содержание настоящей монографии.



## 2. МЕТОДОЛОГИЯ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1. Общая методология исследований

Методологический подход к реализации исследований с целью разработки оригинального метода и технологии первичной защиты твердеющего в воздушно-сухих условиях конструкционного тяжелого бетона заключался в следующем.

На начальном этапе работ выполнено теоретическое обоснование причин, обеспечивающих возможность фильтрационно-диффузионного проникновения вещества защитного состава, растворимого в воде, с поверхности вглубь твердеющего цементного камня и бетона. Показано, что развитие этого процесса основывается на известном факте появления эффекта разрежения (вакуума) в объеме твердеющего цементного камня и бетона, как следствия реакций гидратации, становления структуры и контракции в системе «цемент-вода».

На этом основании разработали расчетные зависимости для оценки глубины проникновения вещества защитного состава в твердеющий цементный камень выполнили их экспериментальную проверку, подтвердившую соответствие расчетных и экспериментально выявленных данных, т. е. подтвердившую возможность использования полученных зависимостей для практических расчетов.

На следующем этапе исследований разработали основы технологии применения защитного состава на основе водного раствора сульфата алюминия ( $Al_2(SO_4)_3$ ), во-первых, в сопоставлении с вариантом-аналогом защиты бетона с использованием гидрофобизирующего вещества, а во-вторых, с учетом влияния на эффективность его использования различных факторов. В процессе исследований выявили рациональную концентрацию раствора  $Al_2(SO_4)_3$ , способ его нанесения и расхода вещества, а также влияние параметров воздушно-сухой среды твердения в вариантах защиты как поверхности свежееотформованного бетона, так и при уходе за ним после снятия опалубки, т. е. бетона, характеризующегося достаточным для выполнения этой технологической операции уровнем прочности, но продолжающим твердеть.

На основании полученных результатов исследовали закономерности влияния разрабатываемого защитного состава на физико-механические (прочность, прочность сцепления слоев «старый – свежий» бетон, упругодеформативные, усадку) характеристики тяжелого конструкционного бетона и его эксплуатационные свойства: водопоглощение, водонепроницаемость, соле-, морозостойкость защитную способность по отношению к стальной арматуре, истираемость.

На завершающем этапе исследований разработали технологический регламент на применение сульфата алюминия в качестве запатентованного в Республике Беларусь (патент ВУ 19821) защитного состава твердеющего цементного бетона и осуществили производственную апробацию разработки, подтвердившую результаты выполненных исследований.

## **2.2. Материалы для исследований**

В исследованиях использованы материалы для бетона, химические вещества для защитных составов, характеристики которых приведены далее в настоящем разделе работы. Данные об особенностях методик исследований и испытаний, а также о химических реагентах, использованных при испытаниях образцов бетона (цементного камня), приведены в соответствующих разделах работы, также как отдельные характеристики материалов для бетона, отличающиеся от приведенных в настоящей главе.

### **2.2.1. Вяжущие вещества**

В качестве вяжущего в основном использованы портландцементы двух отечественных заводов (ПРУП «Кричевцементношифер» и ОАО «Красносельскстройматериалы») холдинга «Белорусская цементная компания» с характеристиками, приведенными в табл. 2.1, соответствующие требованиям ГОСТ 101787-85 [89] (СТБ EN 197-1-2015) и определенным по ГОСТ 310-0-5-81 [90]. Характеристики отличающихся вяжущих, примененных в экспериментах, приведены в особенностях методик их проведения.

Таблица 2.1

## Физико-технические характеристики цемента

Завод-изготовитель	Марка цемента	Активность цемента, МПа	Группа эффективности при пропаривании	Минералогический состав, %				НГ, %	Сроки схватыва- ния, ч; мин	
				C <sub>3</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>2</sub> S	C <sub>4</sub> AF		начало	конец
1. Красно-сельск-стройматериалы	M500-Д0 (СЕМ 1 42,5 N)*	52,5	2	53	2,3	23	15,7	26	2 <sup>35</sup>	3 <sup>53</sup>
2. Кричев-цементношифер	M500-Д20 (СЕМ 11/А-S 42,5 N)*	49	2	54	5	21	16	28	2 <sup>50</sup>	4 <sup>15</sup>
3. То же	M400-Д20 (СЕМ 11/А-S 32,5 N)*	42	3	51	4,5	26	15	28	3 <sup>30</sup>	5 <sup>10</sup>

\* *Примечание:* по СТБ EN 197-1-2015.

### 2.2.2. Заполнители для бетона

В качестве крупного заполнителя для бетона использован щебень гранитный (РУПП «Гранит», Брестской области) с характеристиками, приведенными в табл. 2.2, соответствующий требованиям ГОСТ 8267-93 [91], определенным по ГОСТ 8269-87 [92].

В качестве мелкого заполнителя для цементно-песчаного раствора (мелкозернистого бетона) и бетона использован природный песок (карьер – Крапужино) с характеристиками, приведенными в табл. 2.3, соответствующий требованиям ГОСТ 8736-93 [93], определенным по ГОСТ 8735-88 [94].

Таблица 2.2

## Физико-технические характеристики щебня

Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>		Плотность зерен $\rho^{\text{зщ}}$ кг/м <sup>3</sup>	Зерновой состав (частные остатки на ситах с круглыми отверстиями) в %				Пустотность в виброуплотненном состоянии $P_{\text{щ}}$ , доли ед.
В рыхло-насыпном состоянии $\rho^{\text{ощ}}$	В виброуплотненном $\rho^{\text{вщ}}$		<5	5-10	10-20	>20	
1420	1640	2670	2,5	31,7	61,4	4,5	0,394

Таблица 2.3

## Физико-технические характеристики песка

Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>		Плотность зерен $\rho^{\text{зп}}$ кг/м <sup>3</sup>	Зерновой состав (частные остатки, %) на ситах:						Модуль крупности $M_k$	$P_b$ , доли ед.
в рыхло-насыпном состоянии $\rho^{\text{оп}}$	в виброуплотненном $\rho^{\text{вп}}$		<0,14	0,14	0,315	0,63	1,25	2,5		
1540	1790	2650	2,5	18,0	28,0	25,0	15,0	11,5	2,66	0,32

В исследованиях использовали воду для приготовления цементного теста, раствора (мелкозернистого бетона), бетона, защитных составов, испытательных сред по СТБ 1114-98 [95].

### 2.2.3. Защитные вещества и составы

В качестве защитных веществ и составов для твердеющего и содержащего крупный заполнитель тяжелого бетона, цементного камня, мелкозернистого (цементно-песчаного) бетона использованы далее охарактеризованные моновещества, а также их композиции (составы которых указаны в разделах, относящихся к соответствующим экспериментам) и вещества известных, представленных на рынке «фирменных» составов под названиями производителей, т. е. без указаний их химического состава («Помороль», «Пенетрон» и др):

- сульфат алюминия ( $Al_2(SO_4)_3$ ) по ГОСТ 12966-85;
- состав Шматова (БНТУ);
- гексафторсиликат магния ( $MgSiF_6$ ) по ТУ ВУ 100354659.058-2006;
- состав «Пенетрон»;
- пленкообразующий состав «Помороль-86»;
- гидрофобизирующая жидкость 136-41 (ГКЖ-94) по ГОСТ 10834-76\*.

### **2.3. Методики исследований, изготовления и испытаний образцов**

*Методика экспериментальных исследований* преследовала цель дать оценку изменений качественных характеристик цементного камня и бетона (прочности, упругости, водопоглощения, водонепроницаемости, водо-, соле- и морозостойкости, а также истираемости и защитной способности по отношению к стальной арматуре), защищаемого в процессе воздушно-сухого твердения уплотняющим составом, который разработан и определен как наиболее рациональный по итогам исследований, выполненных и отраженных в настоящей монографии.

В процессе исследований применен методологический прием последовательного рассмотрения технологических приемов ухода за твердеющим бетоном, включая теоретические аспекты процесса диффузии (распространения вглубь) водорастворимых веществ, защитных составов, наносимых на поверхность образцов свежетоформованного, а также схватывающегося и частично затвердевшего (имитация обработки после снятия опалубки) бетона и экспериментальной оценки глубины проникновения этих веществ в цементный камень.

На этом основании, приняв за основные критерии изменение потерь воды затворения и прочности цементного камня, была оценена эффективность ряда химических веществ и защитных составов в сравнительном варианте «при прочих равных условиях».

Используя наиболее эффективное вещество, способствующее обеспечению приемлемых условий твердения цементного камня в сухой воздушной среде, исследовали влияние различных факторов

(период времени и количество раз (расход) нанесения материала; температуры; скорости движения воздуха (ветра) и др.) на защитную способность разрабатываемого состава. Результаты этих экспериментов обеспечили возможность сформулировать основные положения технологии его применения.

На этом основании экспериментально определили закономерности изменений в кинетике роста прочности под влиянием ухода за твердеющим цементным камнем, мелкозернистым бетоном и бетоном с крупным заполнителем с помощью разрабатываемого защитного состава (критерий – прочность бетона), а также наиболее рациональные режимы ухода за бетоном с помощью разрабатываемого состава. Экспериментально определили его прочностные и эксплуатационные характеристики и их изменение, в сопоставлении разрабатываемого варианта ухода за бетоном в процессе твердения со стандартизированными и воздушно-сухими условиями твердения.

Особенности методик осуществления конкретных экспериментов приведены в соответствующих разделах монографии.

*Методика изготовления и испытаний образцов.* Образцы цементного камня (размерами 20 x 20 x 20 мм) готовили из теста нормальной густоты (или с указанием конкретной величины водоцементного отношения) перетиранием в творильной чаше по методике ГОСТ 310.0-5-81, а затем укладывали и уплотняли вибрированием со стандартными для бетона параметрами (амплитуда:  $A \sim 0,5$  мм; частота  $f \sim 50$  Гц) в многоячейковых формах. Условия твердения и дополнительной обработки образцов защитными составами (веществами) здесь и далее указаны в описании конкретных экспериментов. Испытания образцов цементного камня (прочность на сжатие) осуществляли на прессе с диапазоном нагрузки до 50 кН.

Образцы (размеры: 40 x 40 x 160 мм) мелкозернистого бетона (цементно-песчаного раствора) готовили из состава: Ц : П = 1 : 3, на многофракционном песке по табл. 2.3 при водоцементном отношении: В : Ц = 0,43...0,45 и консистенции, соответствовавшей условию ГОСТ 310.0-5-81. Испытания образцов-балочек на прочность при изгибе и их половинок на сжатие производили по ГОСТ 310.0-5-81.

Образцы (кубы с ребром 70 и 100 мм) бетона готовили из стандартизованного состава (для соблюдения правила «прочих равных условий»), принятого по ГОСТ 30459-96 [96], а именно: цемента – 350 кг, щебня гранитного фракции 5–20 мм – 1150 кг, песка – 675 кг, воды – 175 л, подвижность марки «П1», кроме случаев, оговоренных в соответствующих разделах работы при выполнении отдельных экспериментов; укладка и уплотнение бетона – вибрированием со стандартными параметрами. Испытания образцов-кубов и обработку их результатов осуществляли в соответствии с правилами ГОСТ 10180-2012 [97] и ГОСТ 18105-2010 [98].

## 2.4. Методики определения свойств цементного камня и бетона

В исследованиях использованы стандартизованные, общепризнанные и оригинальные авторские методики испытаний образцов цементного камня и бетона (мелкозернистого и с крупным заполнителем).

В частности, по стандартизованным методикам определяли прочностные характеристики образцов (ГОСТ 10180-2012 [97]), а также водопоглощение и водонепроницаемость (ГОСТ 12730.0-5-84 [99]), морозостойкость (ГОСТ 10060.0-5 2012 [100]), истираемость (ГОСТ 13087-81 [101]), защитную способность бетона по отношению к стальной арматуре (СТБ 1168-99 [102]).

По общепризнанной методике [103] оценена *коррозионная устойчивость* бетона в среде хлоридов (NaCl).

Для оценки *упруго-деформативных свойств* на примере мелкозернистого бетона использована методика испытаний, соответствующая оснащению испытательного комплекса фирмы «Zwic» (Германия).

Определение *качества сцепления слоев* «старого» (ранее уложенного) и отформованного по нему бетона (с целью установления закономерности изменения этого показателя при различных вариантах защиты «старого» бетона, включая разрабатываемый) осуществляли с использованием авторской методики путем раскалывания образцов по плоскости стыка «старого» и «свежего» бетона. Методика таких испытаний кубовидных образцов бетона на основе осевого растяжения при их раскалывании обоснована И. Н. Ахвердо-

вым и С. М. Ицковичем [104]. Ее сущность заключается в том, что в случае приложения к образцу сжимающей нагрузки через два лежащих в одной плоскости «ножа» (или стержня  $\varnothing$  5–6 мм, см. п. 5.1.1) в поперечном этой плоскости направлении возникает растягивающее усилие и соответствующие напряжения, приложенные в противоположные стороны по плоскости сечения между «ножами». То есть, образец по этой плоскости подвержен осевому растяжению. Для реализации нашей задачи по оценке качества сцепления «старого» и «свежего» бетона в зоне стыка изготавливали образцы (70 x 70 x 70 мм) из бетона со щебнем за два приема. Вначале формовали его половину по высоте в 35 мм (старый бетон), а через 24 часа воздушно-сухого твердения этого слоя (при вариантах: «без защиты»; нанесение защитного пленкообразующего состава «Помороль-86»; уплотняющего структуру состава «Пенетрон»; под слоем воды и нанесение разрабатываемого состава) формовали второй слой образца – «свежий» бетон. До испытаний (в возрасте: 3, 7, 14 и 28 суток) образцы твердели в воздушно-сухих условиях:  $t \sim 20 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\phi \sim 65 \dots 70 \%$ .

*Степень гидратации цемента* является количественным показателем развития процесса взаимодействия вяжущего с водой (физико-химических процессов) и представляет собой отношение массы гидратированной части к исходной массе вяжущего. В настоящее время существует множество методов для оценки и определения степени гидратации вяжущего: рентгенографический, термовесовой, калориметрический, химический, метод световой микроскопии и т. д. Одним из наиболее простых является метод определения степени гидратации по количеству гидратной или химически связанной воды («ХСВ» или  $W$ ), количество которой определяют прокаливанием предварительно высушенной при  $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  навески цементного камня:  $W = (m - m_0) / m_0$ , где:  $m$  – навеска затвердевшего цементного камня, высушенная до постоянной массы при температуре  $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , г.;  $m_0$  – то же после прокалывания, г.

Температура, при которой прокалывают навеску цементного камня, по различным данным составляет от 600 до 900  $^\circ\text{C}$ . При проведении опытов по определению количества гидратной воды в наших исследованиях была принята температура прокалывания 700  $^\circ\text{C}$ , при времени прокалывания – 4 часа.



Определяя по изложенной выше методике количество гидратной воды в цементном камне рассчитывали степень гидратации вяжущего по следующей формуле:  $\alpha = W/W_0$ , где:  $W_0$  – количество воды, которое связывается при полной гидратации вяжущего и которое на основании данных работы [1] может быть принято 0,227 или приблизительно 23 % от массы вяжущего.

*Для установления зависимости изменений прочности бетона (цементного камня) и потерь им влаги под влиянием факторов: температура – скорость ветра (движения воздуха), была собрана установка, включающая «трубу – корпус» (300 х 300 х 1000 мм) для размещения форм с образцами; электрокалорифер и вентилятор, обеспечивавшие диапазон температуры воздуха в 20–40 °С и скорость его движения (фиксированную) – 0 м/с (вентилятор выключен), а также: 5 и 7 м/с.*

*Для оценки разброса значений прочности бетона внутри серий испытанных образцов рассчитывали внутрисерийный коэффициент вариации, значения которого приведены в соответствующих разделах исследований. Средние значения прочности, по которым строили графические зависимости, получены по правилам обработки результатов испытаний серий образцов по действующим на данный вид испытаний нормативным документам (ГОСТ 18105), с соответствующей ссылкой в тексте монографии.*

Особенности методик проведения конкретных экспериментов приведены в соответствующих разделах монографии.

### **3. ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОНИКНОВЕНИЯ ЗАЩИТНОГО СОСТАВА В ТВЕРДЕЮЩИЙ БЕТОН**

Технология и организация выполнения работ по уходу за твердеющим бетоном в воздушно-сухих условиях по существу представляет собой комплекс мероприятий, направленных на защиту неопалубленных поверхностей строительных конструкций (изделий) от неконтролируемого испарения воды затворения бетона, ухудшения его структурных характеристик и взаимосвязанных с ними физико-механических свойств, что достаточно подробно отражено в первой главе монографии. В зависимости от метода ухода за бетоном различаются и организационно-технологические мероприятия по его осуществлению (см. п.п. 1.2; 1.3). Как уже отмечалось, наиболее прост и эффективен прием нанесения защитных составов эжекцией, т. е. распылением их водных растворов (эмульсий, дисперсий) по защищаемой поверхности с помощью сжатого воздуха. В экспериментах настоящей главы применен как основной этот вариант нанесения защитных составов на поверхность бетона и далее рассмотрены теоретические аспекты и экспериментальное подтверждение диффузионно-фильтрационного проникновения их вещества внутрь бетона, что обеспечивает защиту его от испарения влаги за счет уплотнения структуры и роста непроницаемости обрабатываемой поверхности бетона открытых поверхностей.

#### **3.1. Теоретические основы фильтрационно-диффузионного проникновения защитного состава в твердеющий бетон с поверхности**

##### **3.1.1. Физико-химические предпосылки развития процесса массопереноса в твердеющем цементном камне**

Процесс твердения цементного бетона, приготовленного из пластичной бетонной смеси (что характерно для монолитного строительства и для большинства технологий производства сборного железобетона) сопровождается постепенным переходом (трансформацией) цементного теста из пластичного в твердофазное состояние

цементного камня в затвердевшем бетоне. Этот процесс сопровождается постоянным перераспределением жидкой фазы в объеме бетона, а в бетоне на заполнителях из плотных горных пород (являющемся предметом настоящих исследований) – воды затворения в объеме цементного теста, трансформирующегося в цементный камень.

На начальной стадии взаимодействия цемента с водой (при условии качественной укладки и уплотнения бетона, сведения к минимуму связанных с этим и с воздухововлечением дефектов структуры), жидкость образует пространственную систему, заполняющую объем межзерновой пустотности частиц (флокул) цемента и включающую сольватные оболочки частиц твердой фазы (цемента, заполнителей, пылевидных фракций, поступивших в бетон вместе с ними).

Развитие гидролизно-гидратационного процесса взаимодействия клинкерных минералов цемента с водой, начинающегося с момента их взаимного контакта, сопровождается физико-химическим связыванием жидкости. Не вникая в сущность происходящих при этом химических реакций отметим, что в этой реагирующей системе постоянно уменьшается количество свободной жидкой фазы, а занимаемый ею первоначальный объем постепенно заполняется продуктами гидратации цемента. Формирующиеся кристаллогидраты алюминатов, ферратов и силикатов исходного цемента характеризуются плотностью значительно большей, чем плотность замещаемой ими воды и, соответственно, меньшим объемом. Развитие процесса их формирования проявляется в эффекте контракции [1; 2; 7; 18; 22], а в реагирующей системе «цемент-вода» возникает явление «внутреннего» вакуума.

Существенную роль в развитии этого явления, на наш взгляд, могут играть объемы воды, адсорбирующейся на поверхности зерен заполнителей. Ведь в бетоне на плотных заполнителях удерживается в начальный период до 40–50 л воды [50; 51]. Отличительной особенностью процесса заполнения продуктами гидратации цемента занимаемых ей объемов является то, что он развивается односторонне, т. е. со стороны цементных зерен (флокул), контактирующих с поверхностью заполнителя через прослойки жидкости. В исследованиях, относящихся к оценке структурно-морфологических осо-

бенностей контактных слоев цементного камня у поверхности зерен заполнителей [52–55], отмечается общая тенденция снижения плотности цементного камня контактной зоны, в сравнении с его «глубинными» объемами, с указанием на неравномерность пористости по «глубине» контактного слоя – с ее ростом непосредственно у поверхности заполнителя. При этом здесь же установлено повышенное содержание в продуктах гидратации цемента наибольших по размерам и, одновременно, наименее прочных среди кристаллов портландита ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Оценка пористости контактного слоя на глубину  $\sim 50$  мкм показала, что у поверхности заполнителя она в два раза превышает величину пористости на 30 микрометровом удалении от нее [52].

Изложенное свидетельствует о том, что процесс взаимодействия цемента с водой в объемах зоны контакта с заполнителем протекает в условиях, характеризующихся более высоким водоцементным отношением, чем в объеме цементного камня. Можно ожидать, что и эффект диффузии уплотняющих структуру бетона веществ за этот счет будет проявляться и поддерживаться более длительный период времени благодаря наличию свободной жидкости.

Для разрабатываемой технологии защиты твердеющего бетона (ухода за ним) эти аспекты важны, т. к. ее эффективность непосредственно зависит от глубины проникновения молекул (ионов) используемых веществ в бетон. Путем, по которому они способны диффундировать вглубь, является вода, а ускорить процесс позволяет наличие разрежения в объеме твердеющего бетона. Следует ожидать, что водорастворимые вещества уплотняющих структуру бетона добавок, проникая вглубь по объемам «свободной» (не связанной) воды в свежееотформованном бетоне, будут вступать в обменные реакции (или реакции присоединения) с продуктами гидролиза клинкерных минералов цемента, в результате которых возрастут темп формирования и плотность формирующейся структуры цементного камня на некоторую глубину слоя защищаемого бетона. За этот счет усложнятся условия миграции жидкой фазы из объема бетона к поверхности испарения. Кроме того, такая уплотняющая структуру бетона добавка, как сульфат алюминия ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), обладает эффектом ускорения схватывания цемента и, в некоторой мере, ускорением твердения бетона. Последний эффект может быть уси-

лен введением в защитный состав родственного сульфату алюминия вещества – сульфата натрия ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). В результате может быть интенсифицирован рост прочности и плотности обрабатываемого слоя бетона, что планируется использовать наряду с применением моно вещества сульфата алюминия.

Несколько иной «механизм» взаимодействия представляет собой вариант обработки бетона уплотняющим его структуру веществом гексафторсиликатом магния ( $\text{MgSiF}_6$ ). По данным авторов разработки [84] это вещество обеспечивает эффект уплотнения за счет реакции с гидроксидом кальция с образованием соединений значительно большего объема, чем вступившие в реакцию вещества. Производственная апробация состава при обработке затвердевшего бетона подтвердила эффективность данной разработки [84], что явилось основанием для экспериментальной проверки возможности ее использования в качестве защитного состава по свежееотформованному твердеющему бетону в настоящих исследованиях.

Физико-химические предпосылки для использования гидрофобизирующих добавок (веществ) в качестве защитных составов свежееотформованного твердеющего бетона взаимосвязаны как с их использованием в качестве добавок в бетон с целью снижения его водопоглощения и роста водонепроницаемости (СНВ; СДО; ГКЖ и др.) [56; 58], так и в варианте гидрофобизаторов по затвердевшему бетону (ГКЖ). Обработка наружного слоя бетона этими веществами, характеризующимися водоотталкивающим эффектом, может создать препятствие для миграции воды к испаряющей поверхности за счет их присутствия во внешнем слое бетона.

Следует отметить, что процесс диффузии (проникновения) вещества различных добавок (составов) определяется как способностью бетона (фильтрационной среды) сорбировать их (за счет наличия свободной воды, явления вакуума и капиллярного подсоса по мере становления структуры и формирования капиллярной пористости), так и свойств водных растворов (эмульсий, дисперсий), характеризующих свойства «фильтрата» (вязкость, плотность, способность растворяться в воде, зависимость этих характеристик от температуры).

### **3.1.2. Разработка расчетных зависимостей для оценки глубины проникновения вещества защитного состава в бетон**

Физико-химические основы разрабатываемой технологии первичной защиты бетона базируются на физических явлениях массо-, влагопереноса, сопровождающих начальный период твердения цементного бетона, а также на химическом взаимодействии наносимых на защищаемую поверхность веществ с продуктами гидролиза и гидратации клинкерных минералов цемента, в результате которого образуются новые соединения, уплотняющие структуру камня на некоторую глубину. Как следствие – сужаются или коагулируются (закупориваются) «каналы» движения жидкости [76; 78; 79, 81; 83; 84], а в результате уменьшаются потери на испарение воды затворения, что обеспечивает условия, благоприятные для твердения цемента и, соответственно, для формирования более плотной и непроницаемой структуры цементного камня и бетона в целом.

Свежеотформованный бетон представляет собой систему твердофазных частиц разной крупности, разделенных прослойками жидкой фазы. Ее проницаемость для химических реагентов связана с объемом воды затворения и в частности, той ее части, которая образует пленку некоторой толщины на поверхности бетона в первоначальный период после его укладки. Данное явление связано как с избыточным количеством жидкости по условиям формования, так и с развитием контракционно-седиментационных эффектов во времени [1; 10; 25; 31; 50; 51]. Как было показано в предыдущем разделе на основании широко известных исследований, контракционные явления сопровождаются проявлением разрежения в объеме бетона. Кроме того, процесс формирования структуры цементного камня в твердеющем бетоне сопровождается постоянным перераспределением и перемещением жидкой фазы и приводит к появлению системы, сообщающиеся пор, обладающих способностью сорбировать (капиллярный подсос) контактирующую с поверхностью бетона жидкость. Все это в целом создает необходимые и достаточные условия для реализации приема защиты твердеющего бетона путем нанесения соответствующих химических реагентов в виде водных растворов на открытые поверхности конструкций. Проникновение их вещества в объем формирующейся структуры внешнего слоя це-

ментного камня (бетона) очевидно связано как с диффузией ионов молекул растворенных в воде веществ, так и с массопереносом раствора в пористой среде, которую представляет собой цементное тесто, трансформирующееся в цементный камень.

Механизм «диффузионного» проникновения ионов уплотняющего структуру цементного камня (и бетона в целом) вещества (являющегося «истинным» электролитом) неизбежно будет сопровождать этот процесс на всем его протяжении во времени. Однако диффузия реализуется медленно [40] и на малых расстояниях, особенно в перманентно изменяющихся условиях ее развития в реагирующей системе «цемент-вода» при постоянно нарастающем дефиците жидкой фазы (из-за физико-химического связывания ее в ходе реакций), что вызывает постоянное движение – массоперенос жидкости внутри системы. В результате диффузионный процесс перемещения ионов вещества уплотняющей структуру добавки будет как бы включен (вовлечен) в более масштабный процесс массопереноса ее раствора. На этом основании (принимая важность диффузионного процесса для развития реакций, обеспечивающих уплотнение структуры цементного камня и бетона в целом) его влиянием на массоперенос раствора уплотняющей добавки можно пренебречь. Особенно с учетом того обстоятельства, что введение в цементное тесто уплотняющей добавки (в частности – сульфата алюминия) сопровождается ускорением его схватывания. Поэтому количественную оценку глубины и времени проникновения защитного состава в бетон (с достаточной, на наш взгляд, для инженерных расчетов точностью) можно дать с учетом фундаментальных представлений о процессе фильтрации жидкостей в пористых средах [105–110], а на этом основании обеспечить разработку режимов ухода за бетоном: время нанесения защитных составов, расход вещества, периодичность нанесения в зависимости от условий твердения и др.

*Теоретические основы процесса фильтрации жидкости в пористых средах* были заложены в начале 19 в. работами Пуазейля и Хагена, установившими закономерность течения жидкости в тонких трубках в виде:

$$Q = K(dP/L), \quad (3.1)$$

где  $Q$  – расход жидкости в единицу времени;

$K$  – коэффициент пропорциональности;

$dP$  – разность напоров (давления);

$dP/L$  – градиенты напора (давления);

$L$  – длина трубы.

На этом основании Дарси в середине 19-го века предложил зависимость, отражающую фундаментальную закономерность фильтрации воды через пески, а фактически – в целом, через пористые среды. Результатами его экспериментов была подтверждена прямолинейная связь между фильтрационным расходом и градиентом напора (давления) при фильтрации:

$$Q = K_{\phi} F(dP/L), \quad (3.2)$$

где  $K_{\phi}$  – коэффициент пропорциональности, названный коэффициентом фильтрации;

$F$  – площадь поперечного сечения образца;

$dP$  – перепад на длине участка фильтрационной среды  $L$ .

Установлением этой закономерности, названной впоследствии «линейным законом Дарси», было положено начало развитию новой отрасли знаний – подземной гидравлике. Закон Дарси устанавливает линейную зависимость между расходом жидкости или газа и гидравлическим градиентом (уклоном, перепадом давления) в пористых средах. Он адекватно описывает характер движения поровой жидкости при относительно малых градиентах давления, в том числе при фильтрации воды через грунт.

Формула, выражающая линейный закон Дарси и используемая в современной фильтрационной гидравлике, имеет вид:

$$V_{\phi} \approx \frac{K_{\phi}}{\rho_{жс}} \cdot \frac{dP}{dl}, \quad (3.3)$$

для фильтрации жидкости в горизонтальном направлении, и, в случае вертикального направления фильтрации:



$$V_{\phi} \approx \frac{K_{\phi}}{\rho_{жс}} \cdot \frac{d(P \pm \rho_{жс} \cdot h)}{dh}, \quad (3.4)$$

где  $V_{\phi}$  – скорость фильтрации жидкости или газа;

$K_{\phi}$  – коэффициент проницаемости среды (коэффициент фильтрации);

$\rho_{ж}$  – плотность жидкости или газа;

$dP$  – перепад давления на длине участка фильтрационной среды (L) или его высоте (h).

Закон Дарси описывает процессы фильтрации жидкости в ламинарном режиме, т. е. интерпретируются линейные характеристики этого процесса при сравнительно небольших скоростях потока.

Коэффициент фильтрации  $K_{\phi}$ , представляет собой скорость фильтрации при гидравлическом уклоне, равном 1, то есть когда имеет место потеря единицы давления на единицу длины, имеет размерность скорости (м/с) и зависит от свойств фильтрационной среды и фильтрующей жидкости.

В работах [49; 111] фундаментальные представления теории фильтрации жидкостей были привлечены для получения зависимости, с помощью которой можно рассчитать время или глубину «пропитки» сухих бетонных смесей (как пористой среды) при насыщении их водой, водными растворами химических добавок и водяным паром.

Для расчетов применена формула коэффициента фильтрации «по Козени», широко используемая в фильтрационной гидравлике [105]:

$$K_{\phi} = \beta \cdot \frac{d^2}{\mu_g} \cdot \frac{m^3}{(1-m)^2} \quad (3.5)$$

где  $\beta$  – размерный эмпирический коэффициент Н/м<sup>3</sup>, принимаемый для фильтрации воды в зернистой среде (песок) по Козени равным

8,2, а по данным работы [49; 111] для цементосодержащих бетонных смесей:  $\beta \sim 11,4$ ;

$d_3$  – эффективный (усредненный) диаметр частиц твердой фазы, слагающих фильтрационную среду, м;

$\mu_0$  – динамическая вязкость фильтрующей жидкости, Н с/м<sup>2</sup>;

$m_3$  – эффективная пористость фильтрационной среды, доли единицы.

Следует отметить, что в формуле Козени приведена истинная пористость фильтрационной среды « $m$ » в сухом состоянии твердой фазы. Академик Лейбензон [105] обосновал необходимость учета ее уменьшения до некоторого значения « $m_3$ » (эффективная пористость фильтрационной среды) за счет адсорбционных слоев жидкости, остающихся неподвижными в процессе ее фильтрации, и «застойных» областей (или объемов) высоковязких жидкостей (например, нефти), располагающихся с обратной стороны (по ходу движения жидкости) частиц твердой фазы, слагающих фильтрационную среду.

С учетом того обстоятельства, что в бетонной смеси и, соответственно, в свежесушеном бетоне цементное тесто представляет собой систему «мицелл», т. е. частиц (флокулов) цемента в водных сольватных оболочках (а в бетоне – и зерна заполнителей «укутаны» адсорбировавшейся на них пленкой жидкости) для рассматриваемого нами случая в дальнейшем будем использовать подход Лейбензона к оценке пористости фильтрационной среды как «эффективной».

В работах [49; 111], вводя значение коэффициента фильтрации (3.5) в формулу (3.3), получено следующее выражение скорости фильтрации:

$$V_{\phi} = \beta \cdot \frac{d_3^2}{\rho_{жс} \cdot \mu_0} \cdot \frac{m_3^3}{(1 - m_3)^2} \cdot \frac{dP}{dl} \quad (3.6)$$

Далее, используя положения из теории фильтрации [105] о зависимости между пористостью среды « $m$ », скоростью фильтрации « $V_{\phi}$ » и средней скоростью движения жидкости в порах « $W$ » в виде

$$W = V_{\phi} / m \quad (3.7)$$

определили скорость движения жидкости в порах  $W$ , подставив выражение скорости фильтрации (3.6) в зависимость (3.7):

$$W_{\phi} = \beta \cdot \frac{d_{\text{э}}^2}{\rho_{\text{жс}} \cdot \mu_{\text{д}}} \frac{m_{\text{э}}^2}{(1-m)^2} \cdot \frac{dP}{dl} \quad (3.8)$$

Для нашего случая «безнапорной фильтрации» с поверхности, с учетом, того обстоятельства, что для фильтрации жидкости *без искусственно создаваемого избыточного давления*, как это имеет место при сорбции твердеющим цементом раствора реагентов в виде уплотняющих структуру добавок, градиент ( $dP/dl$ ) будет зависеть от эффекта контракции и возникающего при этом разрежения в объеме цементного теста в бетоне. В общем случае обозначим его « $P_c$ » (давление, создаваемое силами сорбции). Тогда зависимость (3.8) может быть записана в виде:

$$W_{\phi} = \beta \cdot \frac{P_c \cdot d_{\text{э}}^2}{\rho_{\text{жс}} \cdot \mu_{\text{д}} \cdot \ell} \cdot \left[ \frac{m_{\text{э}}}{1-m_{\text{э}}} \right]^2 \quad (3.9)$$

Приняв условие, при котором раствор реагента, нанесенный на поверхность бетона, при средней скорости движения в порах « $W$ » будет проникать на глубину « $l$ » за время « $\tau$ », то есть:  $\tau = l/W$ . Тогда, подставив выражение (3.9) в эту зависимость вместо « $W$ », и выразив плотность жидкости (раствора) через силу тяжести, т. е. в размерности –  $\rho_{\text{ж}}$ , Н/м<sup>3</sup>, получим:

$$\tau = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\rho_{\text{жс}} \cdot \mu_{\text{д}} \cdot \ell^2}{P_c \cdot d_{\text{э}}^2} \cdot \left( \frac{1-m_{\text{э}}}{m_{\text{э}}} \right)^2, \text{ с} \quad \text{или:} \quad (3.10)$$

$$\ell = \frac{m_{\text{э}} \cdot d_{\text{э}}}{1-m_{\text{э}}} \cdot \sqrt{\frac{\beta \cdot P_c \cdot \tau}{\rho_{\text{жс}} \cdot \mu_{\text{д}}}}, \text{ м.} \quad (3.11)$$

Полученные формулы учитывают взаимосвязь времени и «глубины» проникновения фильтра в зависимости от его свойств (вязкости и плотности) и характеристик фильтрационной среды (пористости и дисперсности (крупности) ее частиц) и могут быть основой для оценки процесса массопереноса при обработке поверхности бетона растворами уплотняющих его структуру химических добавок после их упрощения.

### 3.1.3. Экспериментально-теоретическое обоснование расчетных зависимостей

Основываясь на общих закономерностях фильтрации раствора уплотняющих структуру бетона реагентов, отражаемых зависимостями (3.10) и (3.11), попытаемся упростить их до удобного для ведения инженерных расчетов вида. Так, в частности, отношение:  $m_3 / 1 - m_3$ , есть не что иное, как отношение объема пор к объему твердой фазы в единице их суммарного объема и соответствует понятию *коэффициента пористости цементного теста* « $\epsilon_{цт}$ », детально рассмотренному и установленному в работах И. Н. Ахвердова [51; 112] для широкого диапазона  $K_{цт}$  цемента в зависимости от водоцементного отношения цементного теста.

Для практического использования формул (3.10) и (3.11) значение эффективного (усредненного) размера (диаметра) цементных частиц (флокул) на основании данных работ [48; 49; 113; 114] может быть приведено к некоторому *фиксированному среднему расчетному значению*  $d_э$ . Так, по данным [48] с учетом коэффициента шероховатости поверхности зерен цемента  $K_{ш}$  для известной удельной поверхности шарообразных частиц, диаметром  $d_э$ :

$S_{уд,расч.} = 6 / d_э \cdot \rho_{ц}$ ,  $M^2/г$ , эффективный диаметр будет равен:

$$d_э = \frac{0,006 K_{ш}}{S_{уд} \cdot \rho_{ц}}, \text{ м}, \quad (3.12)$$

где  $\rho_{ц}$  – плотность цемента,  $кг/м^3$ .

Оценка формулы (3.12) в работе [49] по известным (установленным экспериментально) данным о фракционном составе цемента и его удельной поверхности (по прибору «ПСХ») позволила установить величину коэффициента  $K_{ш} = 1,75$ , что подтвердило аналогичные данные, приведенные в исследованиях [48], где  $K_{ш} \sim 1,76$ , а для массово выпускаемых цементов, которые характеризуются удельной поверхностью  $S_{уд.} \sim 2800\text{--}3300 \text{ см}^2/\text{г}$  ( $0,28\text{--}0,33 \text{ м}^2/\text{г}$ ), усредненный размер «зерна» (на основании ситового анализа) составил:  $d_3 \sim 11,5 \text{ мкм}$ , что практически совпадает с оценкой, данной в работах [113; 114].

*Величина эмпирического коэффициента  $\beta$*  (размерность –  $\text{Н}/\text{м}^3$ ), введенного в фильтрационную гидравлику Козени для учета влияния дополнительных факторов, определена в исследованиях [49] экспериментально-расчетным методом (при знании всех остальных величин) по формулам (3.10) и (3.11) и составляет для цементосодержащих фильтрационных сред величину:  $\beta \sim 11,4$ .

*Расчетное значение «избыточного давления»  $P_c$* , возникающего за счет сил сорбции (вследствие перераспределения жидкой фазы и развития контракции в объеме цементного теста) и представляющего собой перепад давлений между окружающей средой (атмосферное давление) и давлением разрежения (за счет развивающейся миграции и связывания цементом воды затворения) может быть принято на основании данных исследований, выполненных в 30–50 г.г. XX века Б. Г. Скрамтаевым с сотрудниками, С. В. Шестоперовым с сотрудниками, П. А. Ребинером с сотрудниками, Т. С. Пауэрсом и другими исследователями при изучении явления контракции, развивающемся в процессе взаимодействия цемента с водой, как в начальный период твердения, так и в проектном (28 суток), и более позднем возрасте [115; 116].

Ими также была установлена разница в величине возникающего вакуума (в мм рт.ст.) для твердеющего цементного теста и мелкозернистого цементно-песчаного бетона, при значительно меньшей величине для последнего. Одновременно было установлено, что развитие вакуума имеет место с наибольшей интенсивностью в первые 1–3 часа, затем замедляется и снова возрастает по закономерности, приведенной на рис. 3.1 для твердеющего цементного камня [115].

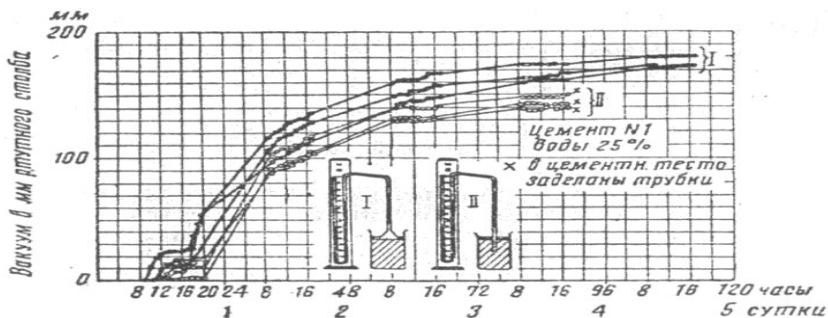


Рисунок 3.1 – Явление вакуума в твердеющем цементном камне

Очевидно, что в целом этот процесс наиболее интенсивно развивается в первые 2 суток и после 3 суток – затухает. При этом уровень разрежения в объеме цементного камня существенен и достигает 140–180 мм ртутного столба.

В случае наблюдений за мелкозернистым бетоном (цементно-песчаным раствором), например, для состава: Ц : П = 1 : 3 (при В/Ц ~ 0,5), приготовленном на портландцементе, значение вакуума оказалось ниже (очевидно, как за счет уменьшения объема цементного теста, так и за счет появившейся более пористой зоны контакта «заполнитель – цементное тесто» и роста проницаемости этой системы в сравнении с системой «цемент – вода»). Так, в первые 2–6 часов величина вакуума в растворе в среднем составила 3,0–6,0 мм рт. ст., а через 24–48 часов, соответственно, 9,0–11,5 мм рт. ст. [116].

Следует отметить, что приведенные результаты (данных и иных подобных) экспериментов получены исследователями на герметично изолированных образцах (объемах) твердеющего цементного камня или раствора (бетона). В реальных строительных конструкциях полной герметизации объема бетона достичь невозможно, если только не представить «герметиком» (в некоторой степени) наносимый на обрабатываемую поверхность защитный состав и

иницируемое его веществом образование слоя цементного камня с уплотненной структурой.

*Расчетный период времени* ( $\tau$ ) наиболее интенсивного развития процесса проникновения вещества уплотняющей добавки в бетон может быть установлен с учетом следующего. Применительно к решению рассматриваемых в нашем случае задач по уходу за твердеющим бетоном наиболее значимы два временных отрезка: первые несколько часов ухода за свежесуложенным бетоном, а также 24–48 часовой период, в пределах которого обычно снимают опалубку и появляется необходимость ухода за открывающимися поверхностями строительных конструкций. Оценка точного расчетного периода времени с учетом развития химических реакций между веществом защитного состава и продуктами гидролиза-гидратации цемента по существу невозможна, так как этот процесс невозможно проконтролировать. Вместе с тем, возможно допустить, что процесс «фильтрации-диффузии» вводимого в бетон вещества будет наиболее интенсивно развиваться в первые 24 часа после обработки защищаемой поверхности. Этот вывод базируется на цитированных и более широко представленных данных в работах [115; 116], а также на авторских экспериментальных данных о толщине видоизмененного (уплотненного) слоя цементного камня, приведенных далее в разделе 3.2 настоящей монографии в зависимости от продолжительности твердения образцов. В частности, не установлено существенного роста толщины, определяемого по изменению (уплотнению) структуры слоя цементного камня, твердевшего в течение 28 суток в сравнении с результатами определения через 24 часа как при уходе за свежесформованным, так и после распалубки образцов цементного камня.

На этом основании для упрощения формулы (3.11) целесообразно принять расчетную величину времени «активного воздействия» вещества защитного состава постоянной и равной:  $\tau = 24$  часа или, с учетом принятой в формулах (3.10) и (3.11) размерности, равной 86–400 секунд.

Возможная погрешность такого допущения может быть компенсирована (что далее подтверждено совпадением расчетных и многих фактических значений «глубины» проникновения, т. е. толщины уплотненного слоя) *величиной поправочного эмпирического ко-*

ээффициента  $\beta$ , учитывающего особенности фильтрационной среды, в которой развивается процесс фильтрации. В частности, отличия в развитии этого процесса для свежеуложенного и частично затвердевшего бетона при нанесении защитного состава после снятия опалубки. Естественно, что в первом случае миграция вводимого вещества облегчена за счет большего объема «свободной» жидкой фазы в сравнении с условиями, складывающимися при обработке уже частично затвердевшего и «структурировавшегося» цементного камня в бетоне после снятия опалубки, что отражается в глубине его проникновения и толщине структурно измененного (уплотненного) слоя цементного камня. В последнем случае сужается база для реакций вещества уплотняющей структуру добавки с продуктами гидролиза-гидратации цемента, так как эти реакции за период твердения бетона до снятия опалубки уже частично реализовались. То есть, изменяются условия фильтрации, что может быть учтено величиной поправочного коэффициента  $\beta$  при принятом равенстве времени проникновения защитного состава в бетон.

Для оценки *величины разрежения и возникающего перепада давления* ( $P_c$ ) по отношению к атмосферному в наружных слоях твердеющего бетона строительных конструкций воспользуемся данными [115; 116], полученными для цементно-песчаного (или мелкозернистого) бетона. Основанием для этого является экспериментально установленная незначительная глубина проникновения и преобразования (уплотнения) структуры обрабатываемых слоев бетона, фактически относящихся к его растворной части. Оценка результатов экспериментов, приведенных в работе [116] и относящихся к условиям полной герметизации испытываемых образцов твердеющего раствора, показывает значительно меньший рост «вакуума» во времени, чем у образцов твердеющего цементного камня [115]. Применительно к внешним (особенно неопалубленным, открытым) слоям бетона следует ожидать, что он будет минимальным, так как этот слой граничит с атмосферой. На этом основании для расчетов воспользуемся минимальными из установленных для цементно-песчаного раствора [116] значения степени разрежения через 24 часа твердения:  $\sim 9,0$  мм ртутного столба, переводя его в систему «СИ», то есть:

$$P_c = 9,0 / 760 \times 1,013 \times 10^5 = 1199,6 \sim 1200 \text{ Па.}$$



На основании изложенного и ранее приведенных данных, приняв (с достаточной для практических расчетов точностью) величину расчетного эффективного «диаметра» зерна цемента:  $d_3 \sim 11,5 \cdot 10^{-6}$  м и введя величину давления вакуума:  $P_c$ , Па ( $\text{Н/м}^2$ ), плотность используемого раствора:  $\rho_{ж}$ ,  $\text{Н/м}^3$ , а его вязкость:  $\mu_0$ ,  $\text{Н с/м}^2$ , а также коэффициент пористости цементного теста:

$\varepsilon_{ц.т.} = m_3 / (1 - m_3)$ , доли ед. и значение поправочного коэффициента  $\beta$ ,  $\text{Н/м}^3$ , формула (3.11) в общем случае при размерности – м, приобретает вид:

$$\ell = 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{\beta} \cdot \varepsilon_{ц.т.} \cdot \sqrt{\frac{P_c \cdot \tau}{\rho_{ж} \cdot \mu_0}}, \text{ м}, \quad (3.13)$$

или в размерности «мм»:

$$\ell = 11,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\beta} \cdot \varepsilon_{ц.т.} \cdot \sqrt{\frac{P_c \cdot \tau}{\rho_{ж} \cdot \mu_0}}, \text{ мм}. \quad (3.14)$$

В частности, при минимальном значимом давлении:  $P_c \sim 1200$  Па, для обработки свежееотформованного бетона при поправочном коэффициенте  $\beta_{св}$ ,  $\text{Н/м}^3$ , и для ухода за ним после снятия опалубки (бортоснастки) при поправочном коэффициенте  $\beta_{он}$ ,  $\text{Н/м}^3$ , при  $\tau = 86\,400$  с (24 часа) зависимость (3.14), соответственно преобразуется в вид:

$$\ell_{св} = 117 \sqrt{\beta_{св}} \cdot \varepsilon_{ц.т.} \cdot \sqrt{1 / \rho_{ж} \cdot \mu_0}, \text{ мм}. \quad (3.15)$$

$$\ell_{он} = 117 \sqrt{\beta_{он}} \cdot \varepsilon_{ц.т.} \cdot \sqrt{1 / \rho_{ж} \cdot \mu_0}, \text{ мм}. \quad (3.16)$$

Значения входящего в формулы (3.15) и (3.16) эмпирического (поправочного) размерного коэффициента  $\beta$ ,  $\text{Н/м}^3$ , который характеризует особенности фильтрационной среды следовало уточнить

для рассматриваемого нами частного варианта фильтрации. Его особенностью является, с одной стороны, весьма низкое давление, инициирующее процесс массопереноса, и практически непредсказуемое влияние химического взаимодействия вводимого вещества с продуктами гидролиза-гидратации цемента.

На основании накопленных экспериментальных данных по формулам (3.15) и (3.16), при всех известных (кроме  $\beta$ ) значениях входящих в эти зависимости других факторов, определено, что для обработки свежееотформованного бетона коэффициент  $\beta^{1/2}_{\text{св}} \sim 2,42 \cdot 10^{-2}$ , а при уходе за бетоном после снятия опалубки  $\beta^{1/2}_{\text{оп}} \sim 1,36 \cdot 10^{-2}$ . В результате после введения этих значений коэффициента  $\beta$  в формулы (3.15) и (3.16) для случая ухода за свежееотформованным бетоном уплотняющими структуру веществами (растворами, характеризующимися известными  $\rho_{\text{ж}}$  и  $\mu_{\text{г}}$ ) или после снятия опалубки, соответственно, они упрощаются до вида:

$$\ell_{\text{св}} = 2,83 \cdot \varepsilon_{\text{ц.т.}} \cdot \sqrt{1 / \rho_{\text{ж}} \cdot \mu_0} \quad , \text{ мм}, \quad (3.17)$$

$$\ell_{\text{оп}} = 1,59 \cdot \varepsilon_{\text{ц.т.}} \cdot \sqrt{1 / \rho_{\text{жс}} \cdot \mu_0} \quad , \text{ м} \quad (3.18)$$

Сопоставление значений коэффициента  $\beta$ , полученных в настоящих исследованиях, с приведенным в работах по исследованиям в области напорной фильтрационной гидравлики [105] или при водонасыщении сухих смесей под давлением [49; 111], на наш взгляд, реально отражает ухудшение (усложнение) условий массопереноса в рассматриваемых нами случаях. Согласно полученным (с учетом сделанных допущений и упрощений) зависимостям (3.17) и (3.18) глубина проникновения вещества уплотняющей добавки вглубь объема цементного теста в бетоне связана прямой зависимостью с коэффициентом его пористости и обратной – с плотностью и динамической вязкостью раствора-фильтрата, что не противоречит физико-химической сути явления массопереноса.

Для практических расчетов по формулам (3.17) и (3.18) по конкретным данным о составе бетона расчетное значение коэффициента «пористости» цементного теста в тяжелом бетоне на заполнителях из плотных горных пород может быть принято по табл. 3.1. Эти

данные получены профессором И. Н. Ахвердовым и приведены в работе [112, с. 126]. Для удобства пользования значение водоцементного отношения цементного теста:  $V/C = X \cdot K_{нт}$ , при  $X = 1,0-1,65$  (по Ахвердову), приведены после пересчета и даны в табл. 3.1.

С целью упрощения расчетов определение значений коэффициента пористости цементного теста может быть осуществлено интерполяцией на основе данных табл. 3.1.

Таблица 3.1

Значения коэффициента пористости  $\epsilon_{ц.т}$  от (В/Ц) и  $K_{нт}$  цемента

Значения $K_{нт}$ цемента, равн.ед.	Параметры	Значения $\epsilon_{ц.т}$ (доли ед.) в зависимости от (В/Ц) цементного теста и $K_{нт}$ цемента							
		В/Ц	0,24	0,26	0,288	0,312	0,336	0,360	0,384
0,24	В/Ц	0,240	0,264	0,288	0,312	0,336	0,360	0,384	0,400
	$\epsilon_{ц.т}$	0,470	0,535	0,600	0,660	0,734	0,800	0,864	0,900
0,25	В/Ц	0,250	0,275	0,300	0,355	0,350	0,375	0,400	0,412
	$\epsilon_{ц.т}$	0,475	0,542	0,610	0,683	0,745	0,808	0,876	0,975
0,26	В/Ц	0,260	0,286	0,312	0,338	0,364	0,390	0,416	0,430
	$\epsilon_{ц.т}$	0,486	0,557	0,625	0,695	0,763	0,831	0,895	0,934
7	В/Ц	0,270	0,297	0,324	0,351	0,378	0,405	0,432	0,446
	$\epsilon_{ц.т}$	0,504	0,570	0,645	0,720	0,785	0,855	0,900	0,970
0,28	В/Ц	0,280	0,308	0,336	0,364	0,392	0,420	0,448	0,462
	$\epsilon_{ц.т}$	0,514	0,585	0,660	0,732	0,805	0,875	0,945	0,985
0,29	В/Ц	0,290	0,319	0,348	0,377	0,406	0,435	0,464	0,480
	$\epsilon_{ц.т}$	0,520	0,593	0,665	0,740	0,815	0,886	0,960	1,000
0,30	В/Ц	0,300	0,330	0,360	0,390	0,420	0,450	0,480	0,500
	$\epsilon_{ц.т}$	0,524	0,602	0,677	0,750	0,823	0,892	0,970	1,020

Например:

а) для  $K_{нт} = 0,26$  и значений (В/Ц) = 0,26–0,43 и более величины  $\epsilon_{ц.т} = 0,486-0,934$ , соответственно;

б) для  $K_{нт} = 0,27$  и значений (В/Ц) = 0,27–0,45 и более величины  $\epsilon_{ц.т} = 0,504-0,97$ , соответственно;

в) для  $K_{нт} = 0,28$  и значений (В/Ц) = 0,28–0,46 и более величины  $\epsilon_{ц.т} = 0,514-0,985$ , соответственно, и т. д.

Далее приведено экспериментальное подтверждение справедливости полученных эмпирико-теоретических зависимостей, адекватно отражающих влияние характеристик «пористости» цементного теста, времени и свойств фильтрата на глубину проникновения химических реагентов, наносимых в виде водного раствора на защищаемые поверхности цементного теста и цементного камня.

### **3.2. Экспериментальная проверка расчетных зависимостей**

Для оценки соответствия расчетных данных о глубине проникновения вещества уплотняющих структуру составов фактическим был осуществлен эксперимент (кроме наблюдений за этими результатами на протяжении всего периода исследований), результаты которого отражают данные табл. 3.2 и иллюстрируют фотографии образцов цементного камня (размеры 20 x 20 x 20 мм), представленные на рис. 3.2.

Уплотняющие структуру бетона вещества наносили на поверхность образцов распылением сжатым воздухом. Во всех случаях при уходе за «свежеотформованным бетоном» защитный состав наносили на поверхность образцов сразу после формования и заглаживания поверхности.

В случае моделирования ухода за бетоном после снятия опалубки (т. е. после распалубки образцов) защитный состав наносили на грани образцов, до этого находившиеся в контакте с металлом форм. Время нанесения составляло: через 12 и 24 часа от момента изготовления образцов, как наиболее реальный для распалубки монолитных конструкций период времени.

Таблица 3.2

Расчетная и экспериментальная толщины «измененного» слоя  
цементного камня

Способ обработки поверхности и расчетная формула	Расчетная толщина слоя, мм	Экспериментальные данные о толщине* слоя цементного камня, (мм) через период времени, сут:			
		1	3	7	28
По свежеотформованной; формула (3.17)	2,25	2,231	2,283	2,338	2,369
		2,205	2,261	2,316	2,345
		2,229	2,295	2,339	2,377
		2,277	2,309	2,388	2,398
		2,306	2,320	2,348	2,369
		2,218	2,290	2,355	2,389
		2,245**	2,293**	2,347**	2,375**
После распалубки; формула (3.18)	1,26	1,240	1,325	1,363	1,375
		1,282	1,316	1,359	1,368
		1,247	1,295	1,339	1,359
		1,219	1,275	1,309	1,333
		1,283	1,339	1,336	1,366
		1,280	1,320	1,353	1,383
		1,258**	1,312**	1,343**	1,362**

*Примечания:*

\* Среднее значение по 2-м минимальных и 2-м максимальным замерам толщины слоя с округлением до 1 мкм.

\*\* Среднее значение толщины слоя по 6 образцам с округлением до 1 мкм.

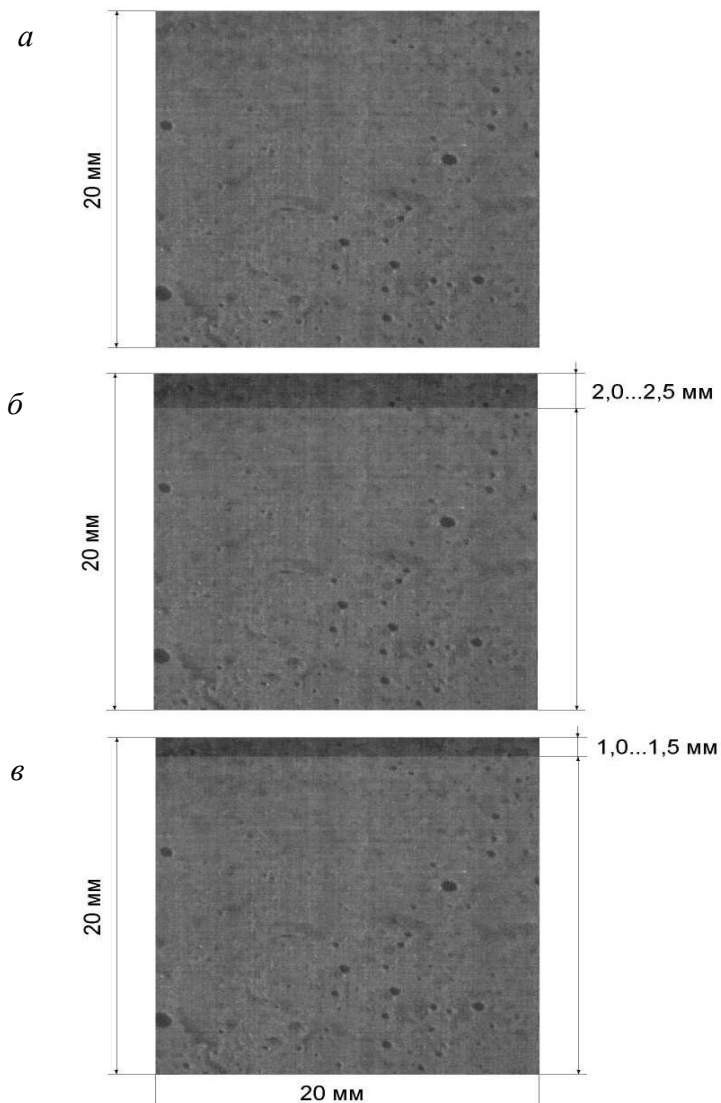


Рисунок 3.2 – Образцы цементного камня: *а* – без обработки; *б* – обработка по свежееотформованному цементному тесту; *в* – обработка после распалубки

Оценка глубины проникновения вещества защитного состава в начальный период после нанесения (особенно свежееотформованного цементного теста, а в последующих экспериментах – раствора и

бетона) оказалась практически невозможной, включая попытку окрашивать бесцветные растворы испытуемых защитных составов. В этой связи оценку глубины проникновения в цементный камень вещества предлагаемого защитного состава осуществляли через 24 часа после нанесения, а затем через 3, 7 и 28 суток с помощью трубы-микрометра с ценой деления 0,5 мкм. Для «оцвечивания» вещества  $Al_2(SO_4)_3$  (а точнее – иона  $Al^{+3}$ , через 1 сутки твердения) использовали раствор вещества «Ализарин», нанося его на поверхность образца перед замером. После 3-х, 7-ми и 28 суток твердения оценивали толщину слоя с уплотненной структурой, имеющего более темный цвет (рис. 3.2).

Во всех случаях защитный состав наносился на обрабатываемую поверхность дважды (что наиболее эффективно, как это будет показано далее см. п. 4.2.2). При этом второе нанесение состава осуществляли после «высыхания» обрабатываемой поверхности (матовая поверхность без блеска пленки жидкости на ней). Для свежетоформованного бетона повторное нанесение осуществляли через ~ 20–30 мин, а для распалубленного – через ~ 10–15 минут.

В качестве защитного состава для данной серии экспериментов использовали 5 %-й водный раствор  $Al_2(SO_4)_3$ , характеризующийся при температуре 20 °С общеизвестными справочными данными о плотности и динамической вязкости, составляющими для указанной концентрации и температуры:  $\rho_{ж} \sim 1051 \text{ Н/м}^3$ ;  $\mu_{\partial} \sim 0,001416 \text{ Н}\cdot\text{с/м}^2$ , что необходимо для теоретического расчета по формулам (17) и (18). Температура обрабатываемых образцов соответствовала ~ 20 °С ( $20 \pm 2$  °С).

На основании данных табл. 3.2 можно сделать вывод об адекватности зависимостей (3.17) и (3.18) и что они, в общем, дают возможность оценить вероятную глубину проникновения в цементный камень бетона вещества защитного состава и, соответственно, толщину формирующегося слоя цементного камня с уплотненной и менее проницаемой структурой. При этом подтверждается правомочность сделанного при выводе формул (3.17) и (3.18) допущения по расчетному времени:  $\tau_{расч} \sim 24$  часа. Очевидно, что глубина проникновения вещества защитного состава, которая достигается за первые 24 часа после обработки, в дальнейшем увеличивается незначительно, что, соответственно, отражается в незначительном из-

менении толщины слоя цементного камня с уплотненной структурой к 28 суткам твердения. Так, при обработке свежееотформованного цементного теста эта разница по средним значениям 6-ти образцов составила:  $(2,375 - 2,245) : 2,245 \cdot 100 \sim 5,8 \%$ , а при обработке распалубленной через 24 часа поверхности цементного камня:  $(1,362 - 1,258) : 1,258 \cdot 100 \sim 8,3 \%$ . А по наиболее отличающимся значениям экспериментальных данных их отклонение к 28 суткам твердения от расчетных по формулам (3.17) и (3.18) составило для свежееотформованного цементного теста:  $(2,398 - 2,25) : 2,25 \cdot 100 \sim 7 \%$  и для обработки после распалубки:  $(1,385 - 1,26) : 1,26 \cdot 100 \sim 9 \%$ . Это в целом позволяет считать возможным использование зависимостей (3.17) и (3.18) для практических оценочных расчетов.

Данный вывод подтверждают фотографии образцов цементного камня 28 суточного возраста, представленные на рис. 3.2. На этих образцах виден более темный слой со стороны обработки их защитным составом (в данном конкретном случае – 5 %-ым раствором  $Al_2(SO_4)_3$ ). В целом по множеству оцененных и испытанных образцов глубина проникновения вещества уплотняющей структуру цементного камня добавки, во-первых, для обработки свежееотформованного материала составляет 2,0–2,5 мм, а распалубленных поверхностей – 1,0–1,5 мм, а во-вторых, практически близка к стабилизации через 24 часа после обработки, существенно не увеличиваясь к 28 суткам и в более поздние сроки (оценка сделана до 180...360 суток).

### 3.3. Обобщение результатов исследований

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность защиты твердеющего бетона за счет проникновения вглубь вещества уплотняющей структуру бетона добавки  $Al_2(SO_4)_3$  при нанесении ее водного раствора на защищаемую поверхность, базирующаяся на фундаментальных закономерностях фильтрационной гидравлики и физико-химических явлениях, развивающихся в процессе реакций цемента с водой затвердения и проявляющихся в возникновении разрежения в объеме твердеющего цементного камня (бетона), благодаря чему он сорбирует наносимый на его поверхность раствор защитного состава.



На основе классических закономерностей фильтрационной гидравлики, применительно к массопереносу жидкости в пористых средах, предложена математическая зависимость (3.14), связывающая факторы давления, возникающего при возникновении и развитии разрежения в объеме бетона,  $P_c$ , н/м<sup>2</sup> (Па); времени воздействия –  $\tau$ , с; свойств наносимого раствора (фильтрата) – его динамической вязкости  $\mu_d$ , Н·с/м<sup>2</sup> и плотности  $\rho_j$ , н/м<sup>3</sup>; характеристики пористости фильтрационной среды – коэффициента пористости цементного теста  $\varepsilon_{ц.т.}$ , доли ед., и поправочного эмпирического коэффициента  $\beta$ , н/м<sup>3</sup>, которая позволяет рассчитать (оценить) глубину проникновения ( $l$ , мм) вещества защитного состава в бетон, как сквозь пористую фильтрационную среду.

С целью приближения теоретических выкладок к решению практических задач по оценке глубины «пропитки» бетона защищаемых строительных конструкций предложены упрощающие формулу (3.14) эмпирические математические зависимости (3.17) и (3.18) для ведения (при необходимости) инженерных расчетов, полученные на основе результатов экспериментального определения значений поправочного эмпирического коэффициента  $\beta$  для случая ухода за свежееотформованным бетоном ( $\beta_{св} \sim 2,42 \cdot 10^{-2}$  Н/м<sup>3</sup>) и после распалубки изделий (конструкций) –  $\beta_{оп} \sim 1,36 \cdot 10^{-2}$  Н/м<sup>3</sup>.

Выполнены предваряющие основную часть исследований эксперименты по оценке глубины проникновения в твердеющий цементный камень вещества сульфата алюминия с целью оценки применимости теоретически полученных математических зависимостей для отражения данного процесса.

Получено экспериментальное подтверждение достоверности расчетов по зависимостям (3.17) и (3.18), свидетельствующее о возможности их практического использования для оценки глубины проникновения вещества защитного состава (на примере 5 % раствора  $Al_2(SO_4)_3$ ) как при обработке свежееотформованного бетона, так и в случае обработки поверхности бетона после распалубки. Выявлено, что отклонение между расчетными и экспериментально установленными значениями составляет  $\leq 9$  %, т. е. обеспечивается достаточная для оценочных расчетов точность.

## **4. ТЕХНОЛОГИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАЩИТЫ ТВЕРДЕЮЩЕГО БЕТОНА**

Разрабатываемая технология защиты твердеющего и характеризующегося наличием разрежения в его объеме бетона от потерь влаги (высыхания) принципиально может базироваться на использовании гидрофобизирующих и уплотняющих структуру цементного камня (бетона) веществ [117; 118]. Для обоснованного выбора конкретных материалов осуществили сравнительные моменты (возраста) испытаний образцы твердели в многоячейковых разборных формах. Защитные составы (вещества конкретных составов указаны в соответствующих разделах) в виде растворов 5 %-ой концентрации (ее обоснование приведено далее) наносили распылением сжатым воздухом на поверхность свежееотформованного цементного теста нормальной густоты (цемент № 2 табл. 2.1;  $K_{нт} = 0,28$ ; ПЦ М500 – Д20) и второй раз – через 15 минут. Во всех случаях расход раствора составил примерно 200 грамм на 1 м<sup>2</sup> обрабатываемой поверхности (предварительно определено по изменению массы образца-эталона в виде плоской формы, размерами: 0,1–0,4 м, размещенной на электронных весах).

Для сравнения изготавливали три контрольные серии образцов-аналогов, которые твердели в различных условиях: в воздушно-сухих (ВСУ) вместе с образцами основных серий, но без обработки защитными составами (серия «КБ»), либо герметично укрытыми полиэтиленовой пленкой (серия «КП»), а также в нормально-влажностных условиях (НВУ;  $t \sim 20 \pm 3$  °С;  $\phi \geq 90$  %; серия образцов «К»).

### **4.1. Оценка эффективности гидрофобизирующих и уплотняющих структуру веществ**

В качестве гидрофобизирующего защитного состава использовали водную эмульсию этилгидросилоксана (гидрофобизирующая жидкость 136–41 или ГКЖ–94), приготовленную по рекомендациям, изложенным в пособиях [56; 58] – серия образцов «ГФ».

В качестве уплотняющих структуру цементного камня веществ использовали разработанный [119–121] в Белорусском государ-

ственном технологическом университете защитный состав «СИФ-ТОМ» ( $MgSiF_6$ ; серии образцов – «С»), а также разработанный [122] в БНТУ (состав А. А. Шматова) защитный многокомпонентный состав для уплотнения и упрочнения металлических поверхностей с целью повышения их износоустойчивости (без расшифровки состава разработчиками, серии образцов – «N») и химическую добавку в бетон [56–58], характеризующуюся эффектом уплотнения структуры цементного камня – сульфат алюминия ( $Al_2(SO_4)_3$ ; серии образцов «СА»), информация о которых приведена в п. 2.1.3. Решение об использовании сульфата алюминия в качестве реагента для сравнительных испытаний (и в дальнейшем) принято с учетом того, что другие входящие в группу неорганических уплотняющих структуру бетона веществ  $FeCl_3$ ;  $Ca(NO_3)_2$  и др., во-первых, характеризуются побочными эффектами воздействия, в частности, на стальную арматуру, а кроме того, значительно дороже и менее доступны (не производятся в Беларуси). Сульфат алюминия доступен, дешев и производится в Беларуси (г. Гомель). Поэтому было логично опробовать именно это вещество для решения поставленных задач исследований, а уже первые полученные результаты пробных экспериментов по контролю за потерями влаги твердеющим бетоном подтвердили правильность такого выбора (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Изменения массы и прочности образцов цементного камня

Условия твердения образцов	Обозначение серии образцов	Потери массы в граммах в возрасте, суток:				Изменения прочности в возрасте, суток:			
		3	7	28		3	7	28	
				Г	%			МПа	%
НВУ	К	0	1,3	2,8	0,8	31,6	46,8	58,5	142
ВСУ	КП	2,7	3,6	4,2	1,2	42,0	52,9	55,3	134
ВСУ	КБ	11,7	17,3	19,25	5,5	36,3	39,8	41,1	100
ВСУ	СА	3,8	5,3	6,3	1,8	40,2	47,7	51,4	125
ВСУ	С	3,6	5,05	5,95	1,7	42,8	46,6	43,2	105
ВСУ	N	3,1	4,9	5,25	1,5	43,6	47,5	44,4	108
ВСУ	ГФ	3,9	6,2	8,05	2,3	39,9	38,9	38,6	94

*Примечание:* изменение массы оценивали по изменению веса форм с образцами (затем испытанными на прочность в указанном возрасте), отнесенному к общей массе образцов после формования.

В табл. 4.1 приведены данные экспериментов (средние значения не менее, чем по 6-ти образцам в серии), отражающие изменение массы (потери влаги) цементного камня в процессе твердения и прочности образцов.

Особенностями приготовления водных растворов указанных веществ было то, что вещества  $Al_2(SO_4)_3$  и «СИФТОМа» в достаточной мере растворимы для продолжительного хранения растворов повышенной концентрации (до 20 %), а многокомпонентный защитный состав серии «N» необходимо было перемешивать дополнительно перед применением (из-за нерастворимости ряда микроэлементов).

Оценка результатов данного эксперимента показала, что даже в камере с относительной влажностью не менее 90 % твердеющий цементный камень к 28 суткам незначительно (0,8 %) теряет влагу в соответствии с положениями, изложенными в разделе 1.1.3 и базирующиеся на выводах [12; 13] о взаимозависимости этого явления с формированием пор определенного размера сечений.

При твердении в воздушно-сухих условиях с открытой верхней гранью образцы закономерно теряют влагу. По данным эксперимента: незащищенные – более 5 % (~ 25 % от количества воды затворения); при укрытии полиэтиленовой пленкой – 1,2 % ~ 5,5 %; с использованием проверяемых защитных составов – 1,5–1,8 % или ~ 7–8 % от количества воды затворения и при использовании гидрофобизирующей добавки – 2,3 % ~ 10–11 % воды затворения).

Очевиден эффект защиты поверхности образцов цементного камня как уплотняющими структуру поверхностного слоя веществами, так и гидрофобизирующей добавкой по критерию снижения потерь воды затворения. Одновременно было зафиксировано снижение прочности образцов цементного камня к 28-ми суточному возрасту при его обработке «СИФТОМом» ( $MgSiF_6$ ), многокомпонентным составом (серии образцов «С» и «N») и, особенно, кремнийорганической жидкостью ГКЖ-94. При этом в возрасте 3-х суток прочность образцов, обработанных первыми из перечисленных веществ, возрастала интенсивнее, чем при обработке их поверхности раствором сульфата алюминия ( $Al_2(SO_4)_3$ ).

Особенностью разрушения под нагрузкой образцов серий «С», «N» и «ГФ» было начало деструкции со стороны, обработанной

данными веществами. Оценка твердости этих поверхностей (царапание стальной иглой) показала, что она ниже, чем у необработанных граней этих же образцов цементного камня (особенно серии «ГФ»), после чего эту добавку сняли с испытаний.

Для уточнения установленного явления и выбора вещества для последующих исследований были выполнены дополнительные сравнительные экспериментальные испытания этих веществ по общей методике, изложенной ранее для воздушно-сухих условий твердения образцов ( $t \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\phi \sim 50 \%$ ), а также в вариантах твердения при температуре воздуха  $t = 40\text{--}50 \text{ }^\circ\text{C}$ . После подтверждения факта снижения прочности цементного камня при повышении температуры среды твердения к возрасту 28 суток и более (до возраста в 14 суток включительно прочность, как показано далее, возрастала относительно контрольных образцов) при обработке многокомпонентным составом (серия «N») и, в несколько меньшей мере, раствором «СИФТОМ» ( $\text{MgSiF}_6$ ), были выполнены эксперименты с обработкой всей поверхности образцов этими веществами, включая вариант с предварительным разогревом растворов. Цель этих экспериментов – ускорить фильтрационно-диффузионный процесс и увеличить глубину проникновения раствора для подтверждения (или опровержения) факта отрицательного воздействия компонентов этих веществ на прочность цементного камня с течением времени. Одновременно для этих условий испытывали и раствор  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , уточняя направление дальнейших исследований.

В табл. 4.2 представлены данные экспериментов с образцами ( $20 \times 20 \times 20 \text{ мм}$ ) цементного камня (из теста нормальной густоты; ПЦ М500 – Д20;  $K_{\text{ит}} \sim 0,28$ ) с оценкой изменений прочности на сжатие. Условия обозначения серий образцов ( $\geq 6$  штук в серии) приняты: «КБ» – контрольные (поверхность не обрабатывали); «СА» – обработка раствором сульфата алюминия; «С» – раствор «СИФТОМ»; «N» – раствор-дисперсия состава А. А. Шматова. Относительная прочность в 28 суток, выраженная в «%», принята за 100 % для контрольных (без защиты) образцов.

В данном случае образцы цементного камня твердели первые 24 часа в формах при температурных условиях, указанных в табл. 4.2. Поверхность после формования защищалась соответствующими составами (или не защищалась – серия «КБ»), а после распулочки в

2 слоя наносили соответствующий защитный состав по всем граням образцов, которые затем твердели в воздушно-сухой среде при  $t = 30, 40$  и  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 2, 6 и 13 суток; от 14 суток до возраста 28 суток – в помещении лаборатории ( $t \sim 20 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi \sim 65\text{--}70\%$ ).

Таблица 4.2

Изменение прочности цементного камня в воздушно-сухих  
условиях твердения

Температура среды, $^{\circ}\text{C}$	Обозначение серии образцов	Прочность цементного камня на сжатие в возрасте, суток:				
		3, МПа	7, МПа	14, МПа	28	
					МПа	%
30	КБ	35,4	38,8	39,3	39,5	100
	СА	38,4	42,5	43,6	43,9	111
	С	38,8	40,6	40,0	39,1	99
	Н	41,2	41,5	39,5	38,4	97
40	КБ	38,8	39,5	39,8	40,0	100
	СА	42,3	43,1	43,0	43,4	110
	С	43,5	43,9	41,9	39,2	98
	Н	43,6	44,0	38,2	37,5	94
50	КБ	39,2	40,1	39,0	39,0	100
	СА	41,7	42,6	42,8	43,6	110
	С	42,5	42,0	41,6	38,2	97
	Н	42,7	42,0	41,1	36,6	94
30*	СА-30	42,0	43,5	43,9	45,0	100
	С-30	42,9	42,9	41,8	39,5	88
	Н-30	43,8	43,0	41,4	38,3	85
	СА-50	44,4	44,7	44,7	46,2	100
	С-50	45,6	44,3	42,0	38,8	84
	Н-50	45,5	45,6	41,1	37,6	81

\* *Примечание:* твердение до 14 суток при  $t \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  после обработки поверхности составами, подогретыми до  $t = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Данные экспериментов свидетельствуют о неоднозначности эффектов при обработке поверхности образцов испытываемыми составами с течением времени.

Устойчивым эффектом повышения прочности обработанных защитным составом образцов цементного камня над необработанными, при прочих равных условиях, характеризовался раствор  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ .

При этом до возраста 3–7 суток он уступал в эффективности веществам обоих других защитных составов, а после 14 суток твердения ситуация изменялась и к 28 суткам прочность образцов цементного камня обработанных ими (после формования – по верхней грани; через 24 часа и распалубки – по всем остальным) снизилась. Как видно, прочность снизилась не только относительно образцов, обработанных раствором  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , но и контрольных (без обработки) образцов цементного камня. Данный отрицательный эффект к возрасту 28 суток значительно проявился при обработке поверхности образцов подогретыми до 30–50 °С защитными составами.

Анализ отмеченного явления относительно вещества  $\text{MgSiF}_6$  показывает следующее. На начальной стадии взаимодействия ионы этого вещества вступают в обменные реакции и реакции присоединения с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , выделяемой при гидролизе-гидратации силикатных клинкерных минералов цементом и другими продуктами его гидратации, образуя труднорастворимые соединения, уплотняющие структуру цементного камня как это показано разработчиками данного вещества [84; 119–121]. В результате ограничивается испарение воды из цементного камня, что способствует развитию реакций цемента с водой и росту его прочности. Однако содержащиеся в «СИФТОМе» ионы фтора (и в достаточно большом количестве) начинают проявлять собственную реакционную активность, что и приводит к снижению прочности цементного камня за счет взаимодействия образуемой им кислоты как на затвердевший камень, так и на дальнейшее развитие процесса гидратации цемента и упрочнение камня. Поскольку в рассматриваемом случае эти процессы развиваются с поверхности вглубь образцов, то отрицательный эффект воздействия фтора прогрессирует со временем.

Аналогичное влияние на изменение прочности цементного камня оказало вещество многокомпонентного защитного состава по разработке А. А. Шматова. Следует отметить, что оно хорошо зарекомендовало себя при обработке «мягких» металлов и придании им повышенной износоустойчивости [122]. Так же, как и «СИФТОМ»,

но при обработке поверхностей затвердевшего бетона [119; 121]. В нашем случае, то есть при защите твердеющего бетона, вещества, содержащиеся в этих составах, проявили неоднозначный эффект, так, обеспечивая рост плотности твердеющего цементного камня на начальном этапе они вызывали эффект снижения его прочности к проектному возрасту. С учетом результатов этих экспериментов в дальнейшем основная работа велась с использованием вещества  $Al_2(SO_4)_3$ ; использование «СИФТОМа» и «Флюата» А. А. Шматова ограничивали экспериментами сравнения [123].

#### **4.2. Защита свежетоформованного бетона раствором сульфата алюминия**

Отработка технологии первичной защиты свежетоформованного бетона [124; 125] включала экспериментальную оценку влияния концентрации вещества  $Al_2(SO_4)_3$  в растворе, способа нанесения (смачивание поверхности (поролоновым тампоном, валиком, кистью и т. п.) и распыление сжатым воздухом), количества раз нанесения, времени начала обработки после формирования при твердении в естественных воздушно-сухих условиях ( $t \sim 20 \pm 3$  °С;  $\phi \sim 60\text{--}70$  % и при повышенной до 30, 40 и 50 °С температуре в вариантах прогрева образцов в формах в течение 24 ч и твердения после распалубки до 14–28 суток. Относительная влажность воздуха при повышенной температуре составляла:  $\phi \sim 50\text{--}55$  %; скорость ветра  $V_b = 0$  м/с.

Кроме указанного оценивали влияние скорости ветра (движения воздуха) в диапазоне:  $V_b \sim 0\text{--}10$  м/с (при расчетном значении  $V_b = 7$  м/с, практикуемом для расчетов режимов твердения бетона в зимний период [126–128]).

Основной объем экспериментов выполнили с использованием образцов (20 x 20 x 20 мм) цементного камня (ПЩ М500 – Д20;  $K_{нт} = 0,28$ ), а их важнейшие результаты апробировали на образцах-балочках (160 x 40 x 40 мм) из мелкозернистого бетона и образцах-кубах с ребром 100 мм тяжелого бетона. Составы мелкозернистого и обычного тяжелого бетона указаны в п. 2.3.

Особенности методик отдельных экспериментов приведены далее в соответствующих разделах работы.



#### 4.2.1. Установление рациональной концентрации раствора и расхода вещества

Рациональная концентрация рабочего раствора вещества уплотняющей структуру бетона добавки взаимосвязана с оптимальным расходом его по критерию обеспечения защитных свойств, то есть снижения потерь влаги (особенно в начальный период твердения) и прочности бетона. Кроме этого, рекомендуемая дозировка уплотняющих структуру бетона добавок, включая  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , по действующим нормативам [58], соответствует до 3 % при общем ограничении количества химических добавок, вводимых в бетон – 5 % от массы цемента [129; 130].

Исходя из этого, а также учитывая приведенные в п. 3.1.4 данные о глубине проникновения в цементный камень при обработке свежетоформованного бетона, соответствующей 2–2,5 мм, определим расход вещества добавки на  $1 \text{ м}^2$  обрабатываемой поверхности.

Тяжелый конструкционный бетон, используемый в дальнейших исследованиях характеризовался (см. п. 2.3) расходом цемента:  $\text{Ц} = 350 \text{ кг/м}^3$ . При толщине «пропитанного» слоя бетона в 2–2,5 мм, его удельный объем составит:  $1,0 \times 1,0 \times 0,002 (0,0025) \sim 0,002 \text{ м}^3$  и  $0,0025 \text{ м}^3$ .

При содержании в  $1 \text{ м}^3$  бетона цемента  $\text{Ц} = 350 \text{ кг}$ , в объеме «пропитанного» слоя будет:  $350\,000 \cdot 0,002 = 700 \text{ г}$  и  $350\,000 \cdot 0,0025 = 875 \text{ г}$  цемента.

Установлено, что при одинаковом режиме обработки 5 %-ым раствором  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  поверхности металлической плиты (размеры  $100 \times 100 \times 400 \text{ мм}$ ) его расход на один слой при нанесении распылением составил  $200 \pm 15 \text{ г/м}^2$ , то есть в среднем  $200 \text{ г/м}^2$ . В таком количестве раствора указанной концентрации содержится вещества  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 - 200 \cdot 0,005 = 10 \text{ г}$ . Дальнейшими исследованиями будет показано (п. 4.2.2), что рационально нанесение защитного состава не менее 2 раз, то есть в два слоя с перерывом между ними. С учетом этого расход вещества  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  на  $1 \text{ м}^2$  поверхности составит примерно 20 г.

На этом основании «дозировка» вещества  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  в слое толщиной 2–2,5 мм при содержании в его объеме цемента:  $\text{Ц}_1 \sim 700 \text{ г}$  и  $\text{Ц}_2 \sim 875 \text{ г}$ , составит:  $\text{Д}_1 \sim (20 : 700) \cdot 100 \sim 2,9 \%$  и  $\text{Д}_2 \sim (20 : 875) \cdot$

· 100 ~ 2,3 % от массы вяжущего по сухому веществу, что удовлетворяет требованиям (ограничениям) нормативных документов [58; 129; 130].

На рис. 4.1 (*a* и *б*) показана экспериментально определенная тенденция изменения потерь воды (рис. 4.1, *a*) и прочности на сжатие (рис. 4.1, *б*) образцами (20 x 20 x 20 мм) цементного камня (серия – 18 образцов; средние значения – по 12 образцам после исключения – по 3 максимальных и минимальных значений), которые прогревали в воздушно-сухих условиях в течение 24 часов при температуре 50 °С ( $\phi \sim 50\%$ ). Расход защитного состава регулировали количеством раз нанесения (из расчета 200 г/м<sup>2</sup> за 1 раз) через: 0 (после формования), 10, 20 и 30 мин. Для обеспечения ускоренного «впитывания» состава работали с подогретыми до 30–35 °С цементным тестом и формами.

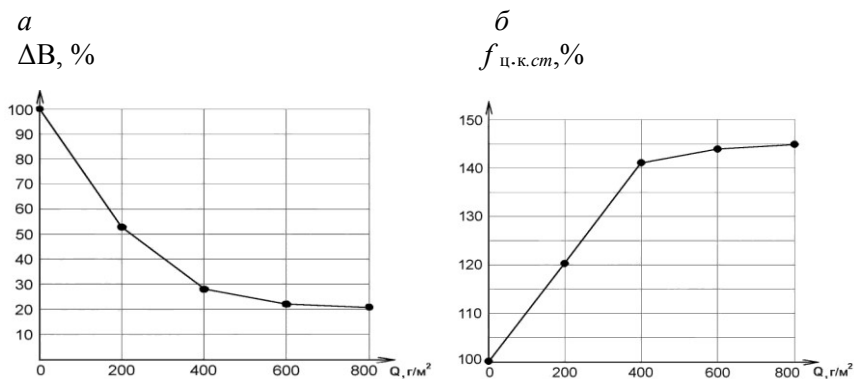


Рисунок 4.1 – Тенденция изменений потерь воды (*a*) и прочности образцов (*б*) в зависимости от расхода защитного состава (за 100 % приняты потери воды и прочность незащищенных образцов)

При оценке потерь воды затворения (рис. 4.1, *a*) за 100 % принято снижение массы формы с образцами без защиты (по абсолютной величине  $\Delta B \sim 21\text{--}25\%$  от воды затворения); при контроле прочности за 100 % принята прочность образцов без защиты. Необходимо отметить, что внутрисерийный коэффициент вариации прочности на сжатие образцов цементного камня, обработанных раствором  $Al_2(SO_4)_3$  и рассчитанный по методике ГОСТ 18105, составил менее

12 %, что свидетельствует о достаточной степени достоверности определения прочностного показателя цементного камня.

Из тенденции, отраженной графиками рис. 4.1, следует, что расход защитного состава в виде 5 %-го раствора  $Al_2(SO_4)_3$  более 400 г на 1 м<sup>2</sup> обрабатываемой поверхности нецелесообразен. Как снижение потерь влаги, так и рост прочности образцов цементного камня стабилизируются при таком «расходе», мало изменяясь с его увеличением. На наш взгляд это можно объяснить тем, что сверх 2–3 %-го (относительно массы цемента) количества вещества  $Al_2(SO_4)_3$  не может в тонком слое связаться продуктами гидролиза-гидратации цемента. При этом развитие реакций взаимодействия сульфата алюминия с ними, начинающихся с момента начала обработки, сопровождается перманентным уплотнением и снижением проницаемости обработанного слоя цементного камня, затрудняя диффузию вещества вглубь. Изложенное подтверждает наличие на поверхности образцов высолов из вещества  $Al_2(SO_4)_3$  (в данном эксперименте – незначительно при 400 г/м<sup>2</sup>, увеличивающихся количественно для расходов в 600 и 800 г/м<sup>2</sup>).

Оптимальная концентрация рабочего раствора взаимосвязана с расходом уплотняющей структуру цементного камня (бетона) добавки и соответствует (при двухслойном нанесении) примерно:  $C_p \sim 5$  %, что одновременно обеспечивает рациональный расход  $Al_2(SO_4)_3$ , соответствующий  $\sim 400$  г защитного состава на 1 м<sup>2</sup> обрабатываемой поверхности.

#### **4.2.2. Обоснование способа нанесения раствора, влияние температуры, времени начала обработки и количества раз нанесения раствора защитного состава**

В существующей производственной практике нанесения жидких веществ на смазываемые, увлажняемые, гидрофобизируемые и т. д. поверхности, наиболее рационален способ их распыления под давлением (с образованием «факела» за счет специальных устройств – форсунок), либо эжекцией жидкости сжатым газом (преимущественно – воздухом), что также обеспечивается использованием специальных камер – форсунок для образования «факела». Приемы нанесения рабочих растворов (эмульсий, дисперсий) иными сред-

ствами (валики, щетки, кисти и т. д.) менее производительны и существенно (в 1,5–2 раза) увеличивают расход используемого материала.

При уходе за свежесформованным бетоном (особенно из высокопластичных и литых смесей) нанесение защитного состава методами без распыления возможно только после полного исчезновения капельно-жидкой влаги с обрабатываемой поверхности, т. е. после выдержки некоторой продолжительности. Как будет показано далее в настоящем разделе исследований, увеличение времени до нанесения защитного состава в воздушно-сухих условиях твердения сопровождается увеличением потерь влаги и снижением прочности цементного камня (бетона) и, закономерно, тем больше, чем выше температура среды твердения.

В подтверждение изложенного выполнен эксперимент, результаты которого приведены в табл. 4.3. Образцы-балочки 40 x 40 x 160 мм готовили из стандартизированного состава (п. 2.3), но при В/Ц ~ 0,6 (пластичная растворная смесь). Условия твердения для серий защищаемых образцов и без защиты – «сухой» прогрев в формах (3-х гнездных) при  $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 24 часов при нанесении 5 % раствора  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  сразу после формования и через 30 минут, а раствора 10 % и 15 % концентрации – за 1 прием сразу после формования. Серия образцов с нанесением защитного состава валиком – твердение в сушильном шкафу вместе с остальными образцами (включая образцы защищаемой напылением серии после нанесения 1-го слоя) до потери капельно-жидкой влаги на поверхности (~ 40–60 мин). Затем на них наносили защитный состав из расчета  $600\text{ г/м}^2$  (определено по массе до и после нанесения) и образцы твердели до 24 часов в сушильном шкафу.

В табл. 4.3 приведены данные о потерях воды затворения, изменениях прочности при изгибе и на сжатие трех серий образцов (средние значения по 9 в серии), из которых следует, что наиболее эффективен вариант защиты свежесформованного бетона непосредственно после формования.

Таблица 4.3

## Результаты сравнительных испытаний

Серия и способ защиты поверхности	Потери влаги за 24 часа на форму в:		Прочность образцов			
			при изгибе		на сжатие	
	г	%	МПа	%	МПа	%
1. Образцы без защиты	54,05	23,5	2,11	100	26,5	100
2. Нанесение состава за 2 приема напылением; расход – 400 г/м <sup>2</sup>	17,94	7,8	3,02	143	36,8	139
3. Нанесение состава валиком; расход – 600 г/м <sup>2</sup>	29,67	12,9	2,76	131	33,9	128
4. Нанесение состава за 1 прием напылением; концентрация 10 % расход – 400 г/м <sup>2</sup>	20,6	9,0	2,85	135	33,0	125
5. Нанесение состава за 1 прием напылением; концентрация 15 % расход – 600 г/м <sup>2</sup>	19,18	8,3	2,96	140	34,8	131

Очевидно, что нанесение защитного состава (при этом с увеличенным в 1,5 раза расходом) валиком и вынужденное ожидание в этом случае «высыхания» обрабатываемой поверхности для свежеотформованного бетона неэффективно. Целесообразность такого приема нанесения защитного состава для ухода за бетоном после снятия опалубки также должна оцениваться с учетом увеличения расхода защитного состава.

В условиях выполненного эксперимента, когда образцы сразу после формирования попадали в воздушно-сухие условия при  $t \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $\phi \sim 55 \%$ , незащищенная поверхность являлась поверхностью испарения и интенсивно отдавала влагу.

Нанесение защитного состава через  $\geq 40$  минут (по условию возможности выполнения этой операции валиком) фактически стабилизирует ситуацию уже после испарения части воды затвердения, перемещение которой в зону испарения оставляет за собой фильтрационные каналы (поры), создавая «основы» капиллярной пористости. Увеличенная дозировка вещества  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  не «компенсирует», как это видно из результатов эксперимента, «эффекта» от роста пористости.

В случае немедленного после формирования нанесения раствора защитного состава в процесс испарения в первую очередь вовлекается привнесенная им вода. Движение жидкости из внутренних слоев бетона в зону испарения ограничивается и, одновременно, в цементное тесто мигрирует вещество  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  и начинаются реакции его с продуктами гидролиза клинкерных минералов цемента. В совокупности этим обуславливается снижение потерь влаги бетоном (уменьшение объема пор), а в результате создания более благоприятных условий формируется более плотная структура и растет прочность бетона.

Результаты данного эксперимента показали, что более рационально двукратное нанесение защитного состава 5 %-ой концентрации, чем за один прием 10 % и 15 % концентрации раствора  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . Очевидно, это связано с более глубоким проникновением раствора (соответственно и ионов  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  в случае, когда по мере впитывания наносимого раствора и «высыхания» поверхности через 15–30 минут наносится вторая порция защитного состава. Можно предположить, что концентрированные растворы, содержащие в 2–3 раза больше реагента в виде ионов алюминия и сульфата, вызывают ускоренное развитие реакций и замедляя их продвижение вглубь бетона. Этот вывод подтверждает увеличивающийся с ростом концентрации раствора эффект появления высолов на обрабатываемой поверхности бетона.

*Влияние температуры среды, оптимальное время и количество раз нанесения защитного состава* частично обоснованы предыдущими экспериментами. Воздушно-сухие условия твердения бетона в регионах Беларуси фактически характеризуются температурой среды, не превышающей 30–35 °С при влажности  $\varphi \geq 70$  %. Для ряда регионов Республики Иран (родина Саназ Эгбалник) температура может превысить 40 °С при влажности  $\varphi \geq 50$  %, т. е. условия твердения существенно более жесткие.

Кроме того, как отмечалось в обзоре литературных источников (п. 1.1.3), воздушно-сухие условия твердения характерны для тепловой обработки сборных бетонных и железобетонных изделий при использовании электромагнитных (индукционных) камер, сухих теплоносителей (преимущественно топочные газы) и подвода тепла по закрытым трактам (регистрам).

В этой связи были выполнены дополнительные эксперименты с целью обоснования наиболее рационального времени начала работ по первичной защите твердеющего бетона и режима ухода – оптимального количества раз нанесения состава и интервалов между ними, при температуре среды:  $t = 30, 40$  и  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , создаваемой в объеме сушильного шкафа (скорость ветра  $V_{\text{в}} = 0\text{--}7,0\text{ м/с}$ ).

Основной объем экспериментов выполнен на образцах (20 x 20 x 20 мм) цементного камня, изготовленных из теста нормальной густоты (вяжущее № 1 по табл. 2.1; ПЦ М 500 – Д0;  $K_{\text{нт}} \sim 0,26$ ; активность (стандартизированная) – 52,5 МПа), а также на образцах – кубах (ребро 100 мм) из бетона стандартизованного состава (п. 2.3), приготовленного на указанном цементе при В/Ц = 0,5 (прочность образцов-аналогов нормально-влажностного твердения в 28 суток –  $f_{\text{cm}28} \sim 44,5\text{ МПа}$ ). Внутрисерийный коэффициент вариации прочности бетона на сжатие (серий с обработкой  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) не превышал:  $V_{\text{ш}} \leq 8\%$ , что свидетельствует о высокой степени достоверности результатов экспериментов.

На рис. 4.2 (а и б) и 4.3 (а и б) результаты экспериментов приведены в виде графических зависимостей потерь влаги и изменения прочности на сжатие образцов цементного камня (среднее – по 12 из 18 результатов, исключая по 3 минимальных и максимальных значения) в возрасте 28 суток при температуре среды твердения 30, 40 и  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

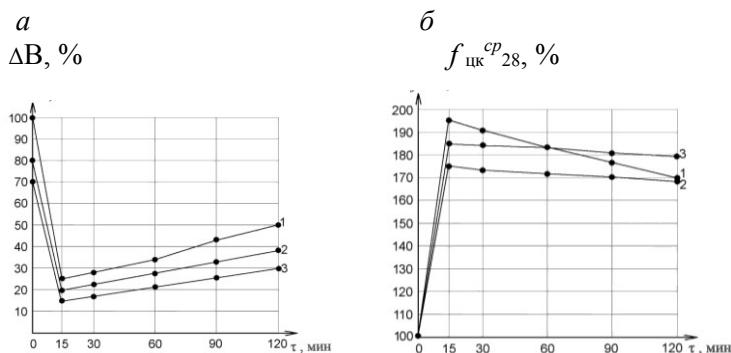


Рисунок 4.2 – Изменение относительных потерь влаги образцами цементного камня (а) и изменение их прочности (б): 1, 2 и 3 – при температуре среды 50, 40 и  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответственно;  $\tau = 0$  – образцы без защиты

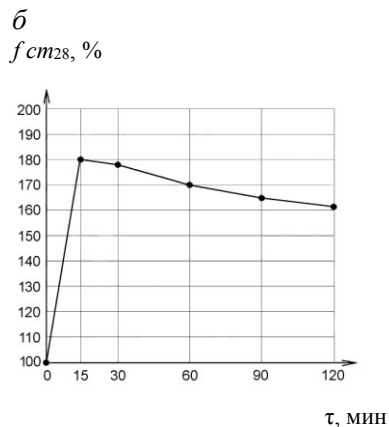
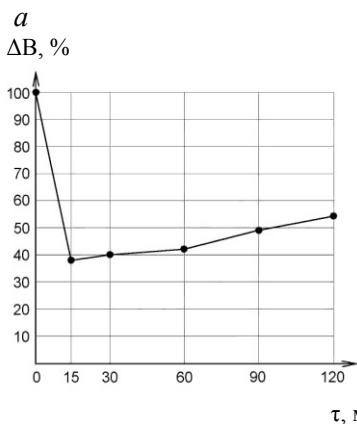


Рисунок 4.3 – Изменение относительных потерь влаги бетоном (*a*) и прочности образцов (*б*); за 100 % приняты значения для образцов без защиты поверхности

На рис. 4.4 (*a* и *б*) и 4.5 (*a* и *б*) приведены результаты экспериментов с образцами тяжелого бетона (среднее по 4 наибольших из 6 значений).

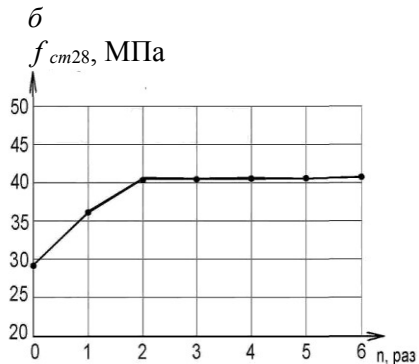
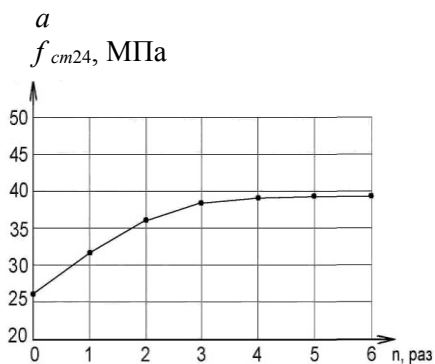


Рисунок 4.4 – Зависимость прочности бетона в возрасте 24 часа (*a*) и через 28 суток (*б*) от количества раз нанесения защитного состава



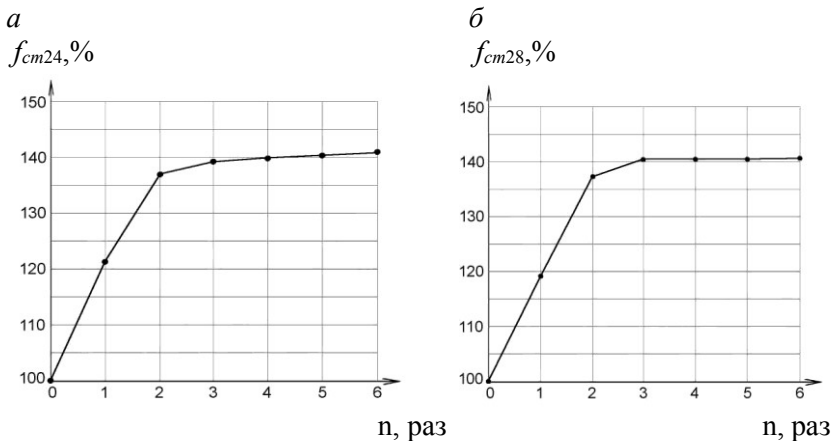


Рисунок 4.5 – Изменение относительной прочности бетона в возрасте 24 часа (а) и через 28 суток (б) в зависимости от количества раз нанесения защитного состава

При обобщении во всех этих случаях экспериментальных данных по потере воды ( $\Delta B, \%$ ) образцами за 100 % принято снижение массы форм с ними *без защиты* поверхности ( $\tau = 0$ , мин) при температуре среды:  $t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

При оценке изменений прочности на сжатие в возрасте 28 суток за 100 % принята прочность образцов без защиты ( $\tau = 0$ , мин), твердевших в среде с  $t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  (№ 1);  $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  (№ 2) и  $t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  (№ 3).

По горизонтальной оси (рис. 4.2, 4.3) отложено время ( $\tau$ , мин.) начала обработки нанесением 1-го слоя защитного состава, начиная с  $\tau = 15$  мин.; во всех случаях 2-ой слой наносили через 30 минут. При этом формы с образцами сразу после формования помещали в сушильный шкаф (среда – по указанной температуре), т. е. создавали условия, приближенные к практическим ведением работ в летний период, либо в сухом и жарком климате, как таковые.

Данные эксперимента с цементным камнем (рис. 4.2, а и б) подтверждают наибольшую эффективность начала ухода сразу после формования ( $\tau \leq 15$  мин, что снижает потери влаги и способствует росту прочности бетона при твердении в диапазоне температур:  $t \sim 30\text{--}50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Наибольший эффект закономерно проявляется с по-

вышением температуры среды твердения. В целом эти результаты, полученные для «ПЦ М500 – Д0», корреспондируются с подобными экспериментами на «ПЦ М500 – Д20» (табл. 4.3 и рис. 4.1), отражая общие закономерности.

В равной степени это относится к результатам экспериментов с бетоном, отраженных графическими зависимостями рис. 4.3, *а* (для потерь воды) и рис. 4.3, *б* (изменение прочности) для среды твердения при:  $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в зависимости от времени начала ухода.

Обобщая полученные данные, можно сделать вывод, что период времени до нанесения защитного состава должен быть минимальным и наиболее целесообразно наносить первый слой непосредственно после формования и отделки (заглаживания) поверхности изделий или конструкций, т. е. в течение первых до 15–20 минут после формования.

Экспериментальное *установление оптимального количества слоев* (или раз) наносимого защитного состава 5 %-го раствора  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  осуществили с учетом ранее полученных данных (см. рис. 4.1) о влиянии расхода материала на эффективность защиты бетона. Эксперимент осуществили на образцах-кубах с ребром 100 мм из бетона стандартизированного (п. 2.3) состава, твердевших в течение 28 суток от момента изготовления при температуре  $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi \sim 55\%$ . Серии образцов – по 4 штуки, средние значения прочности на сжатие – по 3-м наибольшим (по ГОСТ 10180-90). Защитный состав (5 % раствор  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) наносили распылением сжатым воздухом сразу после формования, формы помещали в разогретый сушильный шкаф, извлекая для нанесения последующих слоев. Каждый последующий слой наносили через 15 минут от момента нанесения предыдущего слоя. Здесь следует отметить, что, несмотря на постоянное повышение температуры форм и бетона (помещали в сушильный шкаф сразу после формования), начиная с 3–4-го слоев «впитывание» нанесенного на поверхность бетона раствора замедлялось.

На рис. 4.4 представлены результаты эксперимента в виде изменений прочности на сжатие образцов бетона через 24 часа и в возрасте 28 суток в зависимости от количества раз нанесения защитного состава на их открытую поверхность; на рис. 4.5 эти данные интерпретированы в варианте относительной прочности (в %). За «0»

для рис. 4.4 и 4.5 приняты, соответственно, прочность (МПа) и относительная прочность (%) образцов, твердевших в формах без защиты поверхности, которая через 24 часа составила:  $f_{ct24} = 27,0$  МПа, а к 28 суткам  $-f_{ct28} = 29,5$  МПа (при прочности бетона образцов-аналогов, твердевших в стандартизированных нормально-влажностных условиях,  $-f_{ct28}^{cp} = 44,5$  МПа).

Анализ графиков на рис. 4.4 и 4.5 показывает, что данные этого эксперимента корреспондируются в целом с ранее полученными данными (рис. 4.1) о необходимости нанесения не менее 2-х слоев защитного состава на бетон в виде 5 % раствора  $Al_2(SO_4)_3$ . Очевидно, что общий примерный расход раствора, соответствующий  $\sim 400$  г/м<sup>2</sup> для 2-х разового нанесения раствора указанной концентрации близок к оптимальному. Вместе с тем фактическая «стабилизация» роста прочности получаемого бетона наступает при дополнительном нанесении 3-го слоя раствора. Оценка ситуации по режиму ухода за бетоном, включая количество раз нанесения состава, требует дополнительных данных с учетом изменения температуры среды твердения и скорости ветра, т. к. выполненные эксперименты осуществляли при  $V_v = 0$  м/с, что характерно для условий заводского производства, но не вполне соответствует условиям строительной площадки и открытым полигонам предприятий [131].

#### **4.2.3. Влияние скорости движения воздуха и температуры на режим ухода за бетоном и расход защитного состава**

Для оценки влияния скорости движения воздуха (скорости ветра,  $V_v$ , м/с) на процесс испарения влаги с защищаемой поверхности и прочность твердеющего бетона были выполнены эксперименты с образцами (20 x 20 x 20 мм) цементного камня и образцами-кубами (ребро – 70 мм) тяжелого бетона стандартизированного состава (п. 2.2) на цементе ПЦ М400 – Д20 (п. 2.1.1).

Их осуществили с использованием специально подготовленного приспособления в виде «трубы-корпуса» прямоугольного сечения (300 x 300 мм) 1000 миллиметровой длины с возможностью расположения до шести 18-ти гнездных форм с образцами цементного камня, с просветами между ними по высоте «штабеля» из форм. На входе «трубы-корпуса» фиксировался электрокалориферный нагре-

ватель, позволявший обеспечивать регулируемый поток воздуха с температурой  $t \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$  (без включения нагревателя) и  $t = 30$  и  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  с включением соответствующих диапазонов нагревателя. Вентилятор устройства был откорректирован на две позиции по скорости движения воздуха в начале «трубы-корпуса» –  $V_v \sim 5,0$  и  $7,0 \text{ м/с}$  ( $V_v \sim 0 \text{ м/с}$  при выключенном вентиляторе).

За один прием устройство позволяло разместить до 6-ти форм с образцами цементного камня и до 4-х трехгнездных форм с образцами бетона (кубы с ребром 70 мм).

Влияние скорости движения воздуха (далее – скорости ветра,  $V_v$ , м/с) на прочность бетона (на образцах цементного камня) из-за потерь им влажности и провоцируемого роста пористости оценивали в варианте сравнения при соблюдении правила равенства прочих условий.

В частности, изменяли скорость ветра ( $V_v \sim 0\text{--}7,0 \text{ м/с}$ ) при одинаковой температуре и одновременном испытании сопоставляемых образцов, с различным количеством нанесенных слоев защитного состава. Задача и цель эксперимента – возможная корректировка ранее установленного (при  $V_v = 0 \text{ м/с}$ ) оптимума расхода защитного состава, соответствующего двухслойному покрытию бетона 5 %-ым раствором  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . В особенности это относилось к условиям твердения при  $t \geq 30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

В настоящем эксперименте не практиковалось сопоставление с незащищенным бетоном, как бесперспективное. Сравнительный «базовый» вариант – двухслойное защитное покрытие поверхности (т. е. расход раствора  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  5 %-ой концентрации  $\sim 400 \text{ г/м}^2$ ), с нанесением 1-го слоя сразу после формования, как и во всех вариантах (до 4-х слоев) эксперимента. Последующие слои наносили с интервалами между ними в 15 минут. По нанесении последнего слоя все формы исследуемых вариантов помещали в устройство и подвергали испытаниям с фиксированной для каждого эксперимента скоростью ветра:  $V_v \sim 0; 5,0; 7,0 \text{ м/с}$  и температурой: 20, 30 и  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Время непрерывной подачи воздуха по условиям работ в лаборатории кафедры «Технология бетона и строительные материалы» было ограничено: первые трое суток твердения образцов – непрерывно, а затем (до 7 и 14 суток) в пределах от  $9^{00}$  до  $18^{00}$ . После 14

суток образцы в формах твердели при температуре, соответствующей данному эксперименту в сушильном шкафу ( $V_{\text{в}} = 0$  м/с). С учетом этого обстоятельства абсолютные значения результатов эксперимента не обладают превалярующим значением. Более важны и показательны данные сопоставления, позволившие установить рациональный расход защитного состава в зависимости от соотношения факторов: скорость ветра – температура среды.

Результаты экспериментов представлены данными табл. 4.4 и частично интерпретированы графическими зависимостями рис. 4.6 (см. далее). Каждое единичное значение прочности – средняя величина результатов испытаний не менее 6-ти образцов.

Анализируя результаты экспериментов с защищенными образцами цементного камня приходим к выводу, что существенных изменений в виде снижения их прочности не зафиксировано как с ростом температуры от 20 °С до 40 °С, так и при воздействии подвижного воздуха, включая одновременный рост температуры до 40 °С и скорости ветра до 7,0 м/с. Можно отметить больший разброс значений прочности образцов в возрасте 3-х суток, фактически наиболее интенсивного периода ее роста. К семи суткам твердения прочность образцов достигает уровня (причем практически по всему объему эксперимента), который на 2–4 % ниже прочности в проектном возрасте. Очевидно также, что увеличение расхода раствора  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  в 1,5–2 раза над 400 г/м<sup>2</sup> (два слоя покрытия) эффекта не дает. Незначительный рост прочности образцов в 3-х суточном возрасте не сопровождается таковым в более поздние сроки твердения, включая 28 суток. В целом, полученные результаты об изменениях прочности цементного камня коррелируются с ранее приведенными в разрабатываемом разделе данными, включая приведенные на рис. 4.1 и рис. 4.2 закономерности потерь влаги цементным камнем. Выявлено, что они стабилизируются после 3–7 суток твердения защищенных раствором  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  образцов. В определенной мере с этим связано явление стабилизации прочности цементного камня при твердении в воздушно-сухой среде с температурой  $\geq 30$  °С.

Таблица 4.4

Влияние скорости ветра, температуры и расхода защитного состава на изменение прочности цементного камня

Температура воздуха, °С	Скорость ветра, м/с	Количество раз нанесения состава	Расход 5 %-го раствора $Al_2(SO_4)_3$ , г/м <sup>2</sup>	Прочность на сжатие цементного камня (МПа) в возрасте, сут:			
				3	7	14	28
20	0	2	400	34,0	44,2	44,0	45,0
20	5,0	2	400	36,5	43,8	43,9	44,4
20	5,0	3	600	35,9	43,5	44,0	45,1
20	7,0	2	400	35,4	43,9	44,2	44,2
20	7,0	3	600	35,6	44,2	44,7	45,8
30	0	2	400	39,5	41,8	44,5	45,5
30	5,0	2	400	40,5	43,3	43,9	44,0
30	5,0	3	600	41,1	44,7	45,0	45,8
30	7,0	2	400	40,0	41,9	43,3	44,6
30	7,0	3	600	42,5	44,1	43,2	45,2
30	7,0	4	800	41,8	43,3	44,2	45,0
40	0	2	400	40,6	42,0	42,7	43,0
40	5,0	2	400	42,0	42,0	42,7	42,9
40	5,0	3	600	41,8	42,7	42,8	43,6
40	5,0	4	800	41,2	44,4	42,6	42,5
40	7,0	2	400	40,0	42,1	41,9	41,5
40	7,0	3	600	40,8	40,6	40,6	40,8
40	7,0	4	800	41,0	41,7	41,5	42,2

В целом, результаты этих экспериментов подтвердили достаточность расхода 5 %-го раствора  $Al_2(SO_4)_3$  в 400 г/м<sup>2</sup> защищаемой поверхности свежееотформованного цементного камня при его двухслойном нанесении.

### 4.3. Защита твердеющего бетона после распалубки

Как было показано в п. 1.2 первой главы монографии, практически необходимая продолжительность ухода за твердеющим в воздушно-сухой среде бетоном с целью минимизации потерь прочности к проектному возрасту (< 10 %) достигает 6–7 суток. Это значительный период времени, который требуется для набора цементным бетоном прочности  $\geq 70$  % от проектной.

Данный уровень прочности есть отражение развития глубинных процессов взаимодействия цемента с водой, зарождения и формирования структуры кристаллогидратных новообразований в объеме цементного камня в бетоне. По общепризнанным данным [1; 2; 7; 71; 126; 132–135] степень гидратации цемента в бетоне к этому моменту может существенно различаться (в зависимости от множества факторов: водоцементного отношения, состава и тонкости помола цемента, температуры и влажности среды и др.) и составлять порядка 50–70 % от степени его гидратации в бетоне проектного возраста. Чем выше степень гидратации цемента к моменту прекращения ухода за бетоном, тем большее количество воды в нем перешло в химически и физико-химически связанное состояние. В результате сужается база для потерь влаги бетоном при последующем его твердении в воздушно-сухих условиях, что составляет основу для дальнейшего роста прочности бетона.

В случае ухода за твердеющим бетоном с помощью уплотняющих структуру веществ (в частности, раствором  $Al_2(SO_4)_3$ ) неопалубленные поверхности защищают сразу после формирования, а поверхности, открывающиеся после снятия опалубки или бортоснасти – непосредственно после этой операции. В результате время прямого контакта открытых поверхностей изделий или конструкций с воздушно-сухой средой сведено к необходимому для ведения работ минимуму. При соблюдении этого условия бетон (сразу после формирования и после распалубки) контактирует со средой твердения через слой, пропитанный защитным составом с перманентно изменяющейся (уплотняющейся) структурой при нарастающей во времени непроницаемостью этого внешнего слоя.

Под его защитой формируются благоприятные условия для взаимодействия цемента с водой, что может быть оценено по изменению количества химически связываемой вяжущим воды и степени его гидратации в различающихся температурных условиях твердения.

#### 4.3.1. Влияние защитного состава на количество химически связанной воды и степень гидратации цемента

Эксперименты выполнены с использованием образцов цементного камня (из теста нормальной густоты; ПЦ М 500 – Д0;  $K_{нт} = 0,26$ ) размерами 20 x 20 x 20 мм. При отборе проб для оценки количества химически связанной воды цементом (далее – «ХСВ») использовали «сердцевинную» часть образцов, чтобы исключить возможное влияние на этот показатель вещества защитного состава  $Al_2(SO_4)_3$ .

Во всех случаях 5 %-й раствор  $Al_2(SO_4)_3$  наносили на защищаемую поверхность в два слоя: через «0» и 30 минут после формования, а также сразу после распалубки и через 15 минут по граням «из-под металла» форм (по 18 образцов в форме).

Воздушно-сухие условия твердения характеризовались:  $t \sim 20 \pm 2$  °С;  $\phi \sim 70 \pm 5$  % – помещение лаборатории;  $t \sim 30$  и  $40$  °С при  $\phi \sim 50$ – $55$  % – сушильный шкаф. Во всех случаях образцы в формах после нанесения защитного состава твердели при указанной температуре до распалубки (через 24 часа) и затем (после нанесения защитного состава на грани из-под металла) до момента отбора проб и испытаний. Каждая проба составлялась из центральной части 3-х образцов и усреднялась при измельчении до порошкообразного состояния. Время твердения в указанных условиях образцов цементного камня составляло 3, 7 и 28 суток.

Методика определения «ХСВ» соответствовала приведенной в главе 2 (п. 2.3). Результаты экспериментов сведены в табл. 4.5. Их анализ показывает, с одной стороны, очевидную эффективность защиты твердеющего в воздушно-сухих условиях цементного камня уплотняющей структурой добавкой, т. е. веществом  $Al_2(SO_4)_3$ , а с другой – наличие разницы в степени гидратации цемента, твердеющего в нормально-влажностных и воздушно-сухих условиях.



Таблица 4.5

Количество химически связанной воды и степень гидратации цемента для различных условий твердения (уход после снятия опалубки)

Среда твердения $t, ^\circ\text{C};$ $\varphi, \%$	№ пробы	Количество химически связанной воды цементом (%) в возрасте, суток:			Степень гидратации цемента $\alpha, \%$ , в возрасте, суток:		
		3	7	28	3	7	28
20 $^\circ\text{C};$ 70 $\pm$ 5 % (образцы без защиты)	1	9,3	9,7	9,8	–	–	–
	2	9,7	9,8	10,0	–	–	–
	3	9,2	9,3	9,3	–	–	–
	Среднее	9,4	9,6	9,7	41,4	42,4	43,0
20 $^\circ\text{C};$ 70 $\pm$ 5 % (обработаны $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ )	1	9,5	12,9	12,9	–	–	–
	2	10,1	12,8	13,1	–	–	–
	3	9,5	12,6	13,6	–	–	–
	Среднее	9,7	12,5	13,2	42,7	55,1	58,1
30 $^\circ\text{C};$ 50–55 % (обработаны $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ )	1	9,9	11,8	12,8	–	–	–
	2	10,3	12,5	12,6	–	–	–
	3	10,4	12,3	13,3	–	–	–
	Среднее	10,2	12,2	12,9	44,9	53,7	56,8
40 $^\circ\text{C};$ 50–55 % (обработаны $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ )	1	10,9	11,6	12,2	–	–	–
	2	9,8	11,8	12,0	–	–	–
	3	11,1	12,3	13,0	–	–	–
	Среднее	10,6	11,9	12,4	46,7	52,4	54,6
Нормально-влажные условия; 20 $^\circ\text{C};$ 90–95 %	1	10,4	12,6	14,1	–	–	–
	2	11,2	13,7	14,2	–	–	–
	3	10,8	13,9	14,6	–	–	–
	Среднее	10,8	13,4	14,3	47,6	59,0	63,0

В частности, количество химически связанной воды цементом и степень его гидратации к 28 суткам твердения, принятые за 100 % для нормально-влажных условий, составляют к этому времени для образцов без защиты – 68 %, и с защитой 5 % раствором  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  – 92,3 %; 90,2 % и 86,7 %, для температуры среды твердения в 20; 30 и 40  $^\circ\text{C}$  соответственно.

Следует отметить, что в начальные сроки твердения (3 суток) «промежуточные» значения степени гидратации цемента были выше для  $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , чем у камня, твердевшего при  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Затем ситуация изменилась, что связано с ускорением развития гидролизно-гидратационного процесса с повышением температуры с одной стороны, а с другой – с нарастанием потерь влаги при росте температуры воздушно-сухой среды.

На рис. 4.6 приведены (в виде графиков) зависимости роста прочности образцов цементного камня, из которых после испытаний отбирали пробы на определение «ХСВ» и степени гидратации ( $\alpha$ , %).

Очевидна непосредственная и прямая связь между данными табл. 4.5 и рис. 4.6 – снижение количества химически связанной воды и степени гидратации цемента сопровождается снижением прочности образцов цементного камня. В особой мере это относится к образцам, твердевшим без защиты поверхности (график № 3).

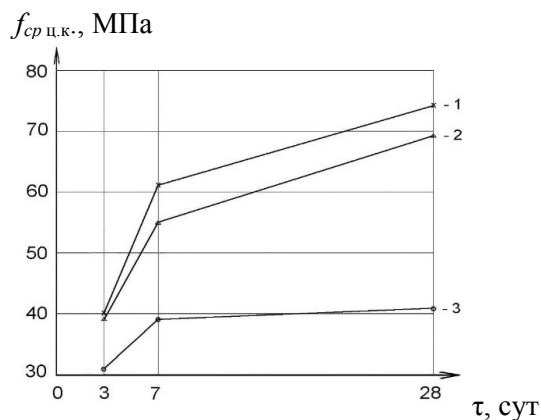


Рисунок 4.6 – Тенденция изменения прочности цементного камня, твердевшего при  $t \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ : 1 – нормально-влажные условия; 2 – воздушно-сухие с защитой поверхности; 3 – то же, без защиты

Оценивая полученные результаты в целом приходим к выводу, что уход за твердеющим бетоном с помощью уплотняющего его структуру вещества  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  в достаточной мере эффективен и

обеспечивает удовлетворительные условия для развития процессов взаимодействия цемента с водой и формирования достаточно плотной структуры цементного камня и бетона строительных изделий (конструкций) при твердении в воздушно-сухой среде. Этот вывод подтверждается тем, что снижение прочности образцов защищаемого цементного камня к 28 суткам воздушно-сухого твердения составило:  $(74 - 69) : 74 \sim 0,0676$ , или  $\sim 6,8\%$  от прочности образцов, твердевших в стандартизованных нормально-влажностных условиях.

#### **4.3.2. Кинетика твердения защищаемого после распалубки бетона в зависимости от температуры, скорости ветра и удельного расхода защитного состава**

Основными факторами, воздействующими на частично затвердевший бетон после распалубки изделий или конструкций являются температура воздушной среды и скорость движения воздуха (ветра). Дополнительным фактором является относительная влажность воздуха, которая в летний период работ в Беларуси преимущественно не опускается ниже 70–75 %. С учетом этого обстоятельства, а также из-за чрезвычайной сложности перманентного контроля этого фактора для подвижной воздушной массы в последующих исследованиях его влияние учитывали косвенно, в совокупности с влиянием температуры и скорости движения воздуха (ветра), не выделяя в отдельный эксперимент.

Рост прочности бетона (стандартизированного состава на ПЦ М500 – Д20: п. 2, главы 2) оценивали на образцах-кубах с ребром 70 мм, первые 24 часа твердевших в формах, а после распалубки – расположенных на металлических подкладках так, чтобы воздушный поток в «трубе-корпусе» соприкасался с их поверхностью по максимально возможной площади.

Защитный состав: 5 %-ый раствор  $(Al_2(SO_4)_3)$  наносили в два слоя по свежееотформованной поверхности, а после распалубки – по всем граням из-под металла по методике, приведенной в п. 3.2.3.1. Отличие касалось только случая при  $t = 40\text{ }^\circ\text{C}$  и скорости ветра  $V_v = 7,0$  м/с, для которого защитный состав наносили по 2 раза ( $\sim 400$  г/м<sup>2</sup> расход раствора) и по три раза ( $\sim 600$  г/м<sup>2</sup> расход раствора).

Температурный режим твердения разных серий образцов соответствовал 20 °С; 30 °С и 40 °С при скорости ветра  $V_{\text{в}} = 0; 5,0$  и 7,0 м/с с продолжительностью воздействия по п. 4.2.3.

Серия образцов соответствовала 12 штукам (4 формы по 3 образца). Их подвергали воздействию воздушно-сухой среды с указанной температурой и скоростью ветра сразу после формования (нанесения 1-го защитного слоя), продолжая после распалубки и нанесения защитного состава на поверхность образцов.

Образцы испытывали на прочность на сжатие (табл. 4.6) в соответствии с ГОСТ 10180-2012 [97] с учетом поправочного масштабного коэффициента  $\alpha = 0,85$  при среднем значении единичных испытаний, принятом по двум наибольшим результатам серии из 3-х образцов. Прочность контрольных образцов в 28 суток нормально-влажностного твердения составила  $\sim 42$  МПа. Результаты экспериментов, отражающих кинетику роста прочности бетона при различных режимах твердения в воздушно-сухих условиях представлены в табл. 4.6 и частично интерпретированы графическими зависимостями рис. 4.7.

В целом данные, полученные на образцах бетона, согласуются в общих тенденциях с ранее установленными закономерностями роста прочности образцов цементного камня в рамках экспериментов с изменением температуры и скорости движения воздуха (п. 4.2.3).

Особенностью полученных результатов является закономерное повышение темпа роста прочности образцов бетона в ранние сроки твердения (до 3 суток) с повышением температуры среды. Одновременно форсированный рост прочности при  $t = 40$  °С приводит к ее стабилизации к 7 суткам твердения и сопровождается «недобором» (относительно образцов, твердевших при  $t = 20$  °С) на 2–4 % к проектному возрасту.

Таблица 4.6

Кинетика роста прочности бетона при различных режимах твердения в воздушно-сухих условиях

Температура среды твердения, °С	Скорость ветра $V_B$ , м/с	Прочность бетона на сжатие, МПа, в возрасте, суток:				Относительная прочность бетона в возрасте 28 сут, %
		1	3	7	28	
20 (образцы не защищены)	0	7,6	22,0	23,3	24,5	60,5
20	0	6,2	21,1	30,8	40,8	100
20	5	6,5	21,8	31,0	40,0	98
20	7	6,7	22,9	30,6	39,6	97
30	0	11,3	30,2	38,8	40,0	98
30	5	12,0	31,6	38,9	39,6	97
30	7	12,2	32,5	37,7	39,2	96
40	0	18,2	36,5	37,0	39,5	97
40	5	18,8	35,2	37,0	39,3	97
40	7	19,5	36,1	39,0	38,6	95
40*	0	18,9	35,5	38,4	40,0	98
40*	5	19,0	35,3	38,9	39,4	97
40*	7	20,1	36,3	39,0	39,3	97

\*Примечание: раствор  $Al_2(SO_4)_3$  наносили 3 раза (расход  $\sim 600$  г/м<sup>2</sup>).

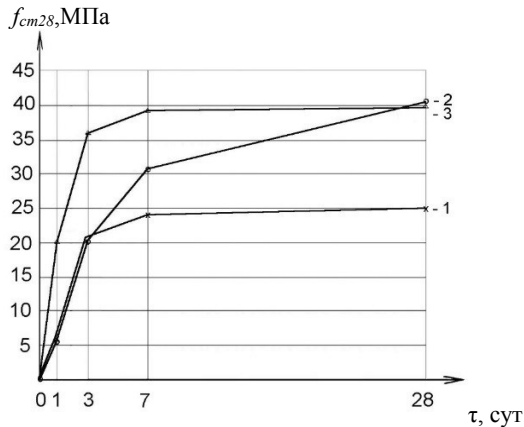


Рисунок 4.7 – Тенденция роста прочности бетона в зависимости от температуры и скорости ветра:

№ 1 – образцы без защиты,  $V_B = 0$  м/с,  $t = 20$  °С;

№ 2 – защищенные образцы,  $V_B = 0$  м/с,  $t = 20$  °С;

№ 3 – защищенные образцы,  $V_B = 7$  м/с,  $t = 40$  °С

На рис. 4.8 показана тенденция роста прочности образцов бетона, твердевших в нормально-влажностных условиях (график № 1) и при  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  на воздухе (помещение лаборатории) с защитой свежеотформованной поверхности и после распалубки образцов двумя наносимыми распылением слоями 5 % раствора  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  (график 2) в более поздние сроки – 56 и 112 суток. Из экспериментальных данных видно, что образцы защищенного бетона к 56 суткам воздушно-сухого твердения в рамках выполненного эксперимента достигает прочности бетона проектного возраста (т. е. 28 суток), твердевшего в стандартных нормально-влажностных условиях. Это, с одной стороны, свидетельствует о сохранении защитного эффекта нанесенного состава во времени, а с другой, позволяет не прибегать к повышению проектной прочности защищаемого бетона с учетом ее последующего роста.

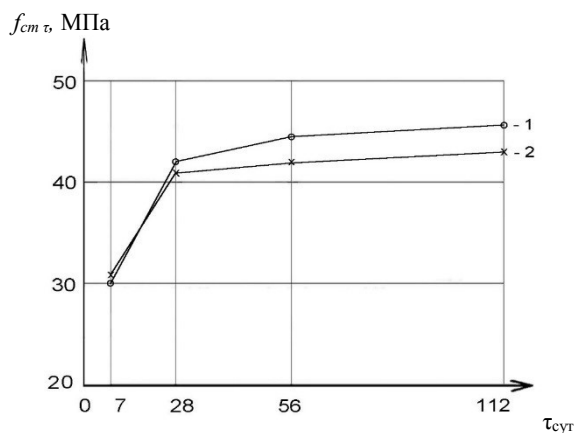


Рисунок 4.8 – Тенденция роста прочности бетона с течением времени:  
 № 1 – нормально-влажностные условия; № 2 – воздушно-сухие с защитой поверхности образцов

Обобщая данные, полученные в пределах эксперимента, можно сделать ряд выводов. Очевидно, что основным фактором, влияющим на кинетику твердения (темп роста прочности) защищенного бетона является температура. Ее повышение с  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  спо-

собствует примерно 3-х кратному росту прочности за первые сутки твердения, сохранению высокого темпа роста до 3–7 суток. Как уже отмечалось, это сопровождается понижением прочности к 28 суткам на 2–4 %.

Фактор скорости ветра (в пределах данного эксперимента до  $V_v \leq 7$  м/с) не имеет решающего значения для *защищенного* бетона. Можно предположить, что ускорение теплообмена между движущимся воздухом с повышенной температурой и поверхностью образцов защищенного бетона является причиной некоторого повышения прочности с ростом скорости ветра для  $t = 30$  °С и 40 °С в пределах 1–3 суток твердения. В целом же к проектному возрасту в этом случае влияние ветра отразилось, примерно, 2 %-ым снижением прочности, а для среды при  $t = 20$  °С – 2–3 %-ым, т. е. примерно одного уровня. Это в целом незначительное снижение прочности защищенного бетона из-за роста скорости ветра следует отнести за счет усиливающегося эффекта испарения воды (возросло на 1,5–2,5 % в рамках данного эксперимента).

Результаты экспериментов подтверждают абсолютную необходимость защиты твердеющего в воздушно-сухих условиях после съема опалубки бетона. Так, прочность к 28 суткам твердения незащищенных образцов снизилась, в сравнении с защищенными, на:  $(40 - 26) : 40 = 0,35$ , или на 35 %, что недопустимо для конструкционного материала.

Одновременно полученные данные свидетельствуют о достаточной для практического использования эффективности защитного состава на основе уплотняющего структуру бетона вещества –  $Al_2(SO_4)_3$ . При этом подтверждено ранее установленное положение о достаточности нанесения на защищаемую поверхность 2-х напыляемых слоев 5 %-го раствора  $Al_2(SO_4)_3$ . Увеличение расхода от  $\sim 400$  г/м<sup>2</sup> до  $\sim 600$  г/м<sup>2</sup> (нанесение 3-х слоев, образцы серии «40\*» по табл. 4.6) заметного эффекта не подтвердило, при незначительной общей положительной тенденции влияния на прочность (см. соотношение прочностей образцов серий «40» и «40\*»).

#### 4.4. Итоги результатов исследований

При выполнении теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку основ технологии первичной защиты твердеющего бетона, получены следующие результаты.

Разработаны общие положения технологии первичной защиты твердеющего бетона, включающие режимы ухода за свежеотформованным бетоном и частично затвердевшим бетоном после распалубки изделий (конструкций). Экспериментально оценено влияние основных факторов: вида применяемого вещества; времени нанесения; расхода защитного состава; температуры и влажности среды твердения; скорости ветра и их сочетаний, на потери влаги бетоном в процессе воздушно-сухого твердения и рост его прочности [136].

Результатами сравнительных экспериментов о влиянии на потери влаги и прочность бетона различных видов веществ (гидрофобизирующей жидкости 136–41 (ГКЖ – 94), кольматирующей добавки «СИФТОМ» ( $MgSiF_6$ ), упрочняющего металлические поверхности состава А. А. Шматова и уплотняющего структуру бетона вещества – сульфата алюминия ( $Al_2(SO_4)_3$ ), выявлено, что вещество  $Al_2(SO_4)_3$  характеризуется наибольшей эффективностью и его растворы приняты для дальнейших исследований.

Разработаны режимы ухода за свежеотформованным бетоном и после снятия опалубки (распалубки) растворами  $Al_2(SO_4)_3$ , включающие способ и время нанесения защитного состава, концентрацию раствора или его удельный расход, количество раз нанесения для изменяющихся параметров: температуры воздуха  $t \sim 20\text{--}50$  °С, относительной влажности  $\phi \sim 50\text{--}95$  % и скорости движения воздуха  $V_v \sim 0\text{--}7$  м/с.

Установлено, что рациональной является концентрация рабочего раствора  $Al_2(SO_4)_3$  в 5 %, обеспечивающая при двукратном нанесении состава распылением содержание в обрабатываемом поверхностном слое бетона вещества  $Al_2(SO_4)_3$  порядка 3 % от массы цемента. Этого количества уплотняющей структуру добавки достаточно для формирования плотного и малопроницаемого слоя цементного камня в 2–2,5 мм при обработке свежеотформованного бетона и 1–1,5 мм – после распалубки. Удельный расход 5 % раствора  $Al_2(SO_4)_3$  составляет при этом  $\sim 400$  г/м<sup>2</sup>.



Выявлено, что время до нанесения первого слоя защитного состава должно быть минимально необходимым по условиям ведения работ как для свежеотформованного бетона, так и для его защиты после распалубки. Время повторного нанесения защитного состава определяется конкретикой ведения работ, температурой (влажностью, скоростью ветра) воздушной среды при рекомендуемом – 15–30 минут для свежеотформованного бетона и 10–20 минут после распалубки.

Определено (по потерям влаги бетоном и росту его прочности), что рационален удельный расход 5 %-го раствора  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  соответствующий 400 г/м<sup>2</sup> обрабатываемой поверхности. Для особо жестких условий твердения бетона ( $t \geq 40$  °С;  $V_{\text{в}} \geq 7$  м/с) расход состава может быть повышен до 600 г/м<sup>2</sup> (3-х разовое нанесение распылением) необходимость этого следует предварительно оценивать строительной лаборатории для конкретных условий ведения работ.

Установлено для условий выполненного эксперимента: твердение 28 суток в воздушно-сухих условиях при температуре ( $t \sim 20, 30$  и 40 °С) и относительной влажности ( $\phi \sim 50\text{--}95$  %), с наличием защиты (двухслойное нанесение 5 % раствора  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) и без нее, что степень гидратации цемента «с защитой» составляет 87–92 %, а без защиты – 68 %, от принятой за 100 % степени гидратации образцов, твердевших в нормально-влажностных условиях. В соответствии с этим прочность образцов цементного камня «с защитой» составила 60–74 МПа, а без защиты – 40–42 МПа, что подтверждает эффективность защиты твердеющего цементного бетона веществом  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ .

Исследованиями кинетики твердения (рост прочности в 1–28 суток) бетона в воздушно-сухих условиях при температуре в диапазоне  $t = 20\text{--}40$  °С и совместным воздействием скорости ветра ( $V_{\text{в}} = 0\text{--}7$  м/с) подтверждена эффективность защиты поверхности бетона после распалубки двухразовым нанесением 5 %-го раствора  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  (расход  $\sim 400$  г/м<sup>2</sup>). Показано, что прочность образцов бетона к 28 суткам твердения при  $t = 40$  °С и скорости ветра 7 м/с снизилась на 2–5 %, в сравнении с твердением при температуре  $t = 20$  °С и скорости ветра  $V_{\text{в}} = 0$  м/с.

Одновременно подтверждена известная закономерность повышения темпа роста прочности защищенного бетона в первые 1–3 (7)

суток с повышением температуры воздуха от 20 °С до 30 °С и, особенно, до 40 °С. В последнем случае ее рост даже для «защищенных» образцов практически прекратился после 7 суток твердения и к 28 суткам их прочность была на:  $(39,6 : 40,8) \cdot 100 = 97 \%$ , т. е. на 3 % ниже прочности образцов-аналогов, твердевших при 20 °С, без перспектив существенного роста в дальнейшем (в воздушно-сухих условиях твердения), судя по динамике графических зависимостей (рис. 4.8).

В совокупности результаты выполненных экспериментальных исследований обеспечили обоснование режимов ухода за твердеющим бетоном (свежеотформованного и после распалубки) с помощью уплотняющего структуру вещества  $Al_2(SO_4)_3$  с целью обеспечения требуемых физико-механических свойств и характеристик конструкционного тяжелого бетона [136; 137].

## **5. ВЛИЯНИЕ ЗАЩИТНОГО СОСТАВА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА БЕТОНА**

Испытания образцов мелкозернистого бетона и тяжелого бетона с крупным заполнителем (составы «стандартизированные», приведенные в п. 2.2 на прочность (сцепление слоев «старый бетон – свежий бетон», сжатие, растяжение при изгибе, осевое растяжение раскалыванием), упруго-деформативные и эксплуатационные свойства (водо-, соле-, морозостойкость, истираемость, защитную способность по отношению к стальной арматуре) определили в варианте сравнения: при наличии «защиты» поверхности образцов по разрабатываемой технологии 5 %-ым раствором  $Al_2(SO_4)_3$ , либо без нее, либо в сопоставлении с иными вариантами защитных составов или приемов ухода за твердеющим в воздушно-сухих условиях бетоном. Конкретизация условий проведения экспериментов приведена в соответствующих разделах исследований. Во всех случаях образцы бетона изготавливали вибрированием на стандартной лабораторной площадке (параметры: амплитуда ~ 0,5 мм; частота ~ 50 Гц).

### **5.1. Физико-механические характеристики бетона**

#### **5.1.1. Прочность сцепления слоев «старого» и «свежего» бетона**

Проблема качества, обеспечения требуемых прочностных и иных характеристик конструкционного бетона возникает всякий раз, когда бетонные работы не могут быть осуществлены по методу непрерывного (бесшовного) бетонирования строительных конструкций. Наличие перерывов в ведении бетонных работ, обусловленных использованием переставных опалубок и ограниченными (по разным причинам) объемами устраиваемых захваток, сопровождается образованием стыков строительных конструкций. Обеспечение качественного сцепления «старого» и «свежего» бетонов, с чем связаны его прочность и несущая способность конструкций, а также проницаемость бетона и его эксплуатационные свойства, представляет собой не простую для надежного решения инженерно-

техническую задачу. С учетом того обстоятельства, что обработка бетона раствором сульфата натрия сопровождается уплотнением и упрочнением защищаемой поверхности (поверхностного слоя цементного камня бетона), можно предвидеть положительный эффект такой обработки с позиций повышения сил сцепления по плоскости контакта «старого» и «свежего» бетона.

Прочность сцепления «старого» (уложенного в форму за 24 часа до формирования 2-го слоя) и «свежего» (т. е. 2-го) слоя тяжелого бетона с крупным заполнителем (см. п. 2.3) осуществляли, оценивая величину усилия и прочность на осевое растяжение образцов при испытаниях раскалыванием. На рис. 5.1 (*а*, *б*) приведены фотографии, иллюстрирующие испытания: *а* – до приложения нагрузки; *б* – после испытаний образца. При таком варианте испытаний в образце по плоскости контакта «старый – свежий» бетон приложена сосредоточенная сжимающая нагрузка, которая вызывает появление растягивающего усилия в перпендикулярном к ней направлении. Это усилие в данном случае воспринимается контактной зоной «старого – свежего» слоев бетона, а его величина предопределяется качеством сцепления (силами сцепления) между ними.

В табл. 5.1 приведены данные о результатах испытаний серий образцов (70 x 70 x 70 мм) по 6 штук в каждой. Внутрисерийный коэффициент вариации оцениваемой прочности на осевое растяжение посредством раскалывания образцов, рассчитанной по нижеприведенной формуле (5.1) [104],

$$f_{ctm} = K_{cm} \cdot 2P / \pi \cdot a^2, \text{ МПа}, \quad (5.1)$$

составил  $\leq 12,8$  % для серий № 1, № 3 и № 4 и  $\leq 6,2$  % для серий № 2 (разрабатываемый защитный состав) и № 5 (твердение под слоем воды). Для расчета значений  $f_{ctm}$  по формуле Ицковича-Ахвердова (5.1) принято рекомендуемое ими для тяжелого бетона значение коэффициента смятия в зоне контакта с ним «режущих ножей» ( $\emptyset$  6 мм)  $K_{cm} = 1,1$ , при разрушающей нагрузке –  $P$ , МН, и размере ребра куба –  $a$ , м. Образцы (после формирования как 1-го (кроме серии № 5), так и 2-го слоя) твердели 28 суток в воздушно-сухих условиях помещения лаборатории ( $t \sim 18\text{--}21$  °С;

$\phi \sim 60 \pm 5 \%$ ). Для их изготовления использовали портландцемент ПРУП «Кричевцементношифер» (№ 2 по табл. 2.1).

*а*



*б*



*в*



Рисунок 5.1 – Испытания при оценке прочности «старого» и «свежего» слоев бетона раскалыванием: *а* – до испытаний; *б* – после испытаний; *в* – расколотые образцы бетона

Таблица 5.1

## Средние значения характеристик бетона серий из 6 образцов

Номер серии и вариант защитного состава (ухода за «стыком», т. е. 1-м слоем бетона)	Масса образцов и средняя плотность бетона:		Разрушающая нагрузка, Н	Прочность бетона на растяжение в зоне контакта слоев:	
	m, г	$\rho^o$ , кг/м <sup>3</sup>		МПа	%
1. Без мер защиты	862	2390	2978	0,43	100
2. Нанесение 5 %-го раствора $Al_2(SO_4)_3$ в 2 слоя	885	2405	7884	1,13	263
3. Нанесение рабочего раствора состава «Пенетрон» в 2 слоя	875	2419	5081	0,73	170
4. Нанесение рабочего раствора пленкообразующего состава «Помороль-86» в 1 слой	877	2390	3677	0,53	123
5. Твердение 1-го слоя бетона 24 часа по воде	885	2405	6931	0,99	230

Анализ данных табл. 5.1 показывает, что наибольшим качеством сцепления слоев «старого» и «свежего» бетона характеризуются образцы, обработанные по разрабатываемой технологии 5 %-ым раствором  $Al_2(SO_4)_3$ . Далее по уровню «прочности сцепления» располагаются образцы при твердении первого слоя бетона под слоем воды, которая была налита на поверхность образцов через 30 минут после формирования 1-го слоя, т. е. в одно время с нанесением 2-го защитного слоя раствора  $Al_2(SO_4)_3$  (№ 2), а также «Пенетрона» (№ 3) и пленкообразующего состава «Помороль-86».

Следует отметить практическое равенство средней плотности образцов бетона (естественное состояние) всех серий, твердевших до 28 суток в одинаковых условиях в помещении лаборатории, что свидетельствует о примерной однородности структуры бетона (одинаковом качестве формирования) и обеспечивает принцип «прочих равных условий» при проведении эксперимента.

Сопоставление данных об уровне прочности в зоне контакта «старого» и «свежего» бетона без ухода за ним (принято за 100 %) показывает, что она в разрабатываемом варианте защиты бетона обработкой раствором сульфатом алюминия возрастает в 2,6 раза

(до 263 %, т. е. больше, чем при твердении «старого» бетона за этот период под слоем воды (в 2,3 раза; 230 %). В остальных случаях качество сцепления слоев значительно хуже, особенно при обработке поверхности пленкообразующим составом «Помороль-86». Сформировавшаяся «пленка» из его вещества предсказуемо снижает силы сцепления в зоне контакта «старого» и «свежего» слоев бетона.

Эффективность защитного состава из сульфата алюминия, на наш взгляд, связана со следующим. Во-первых, имеет место уплотнение и упрочнение поверхности 1-го слоя – «старого» бетона в соответствии с ранее установленным «механизмом» взаимодействия вещества  $Al_2(SO_4)_3$  с продуктами гидролиза-гидратации цемента с образованием дополнительного количества кристаллогидратов гидросульфата алюмината кальция и иных соединений, характеризующихся большим объемом, в сравнении с исходным объемом вступающих в реакцию веществ. Во-вторых, за 24 часа воздушного твердения не все нанесенное на поверхность образцов вещество  $Al_2(SO_4)_3$  химически связывается. Та его часть, которая «оседает» на поверхности «старого» бетона, затем растворяется водой затвердения при нанесении на эту поверхность «свежего» бетона. Диффундируя («впитываясь») в контактный слой цементного камня «свежего» бетона остаток вещества  $Al_2(SO_4)_3$  вступает в реакции с продуктами гидролиза-гидратации цемента в этом слое, способствуя росту его плотности и прочности. В результате имеет место эффект «сращивания» контактирующих слоев с повышением сил их взаимодействия, что обеспечивает рост прочности в зоне их контакта, в сравнении с другими вариантами защиты бетона, включая защиту «водным бассейном».

Одновременно отметим, что, несмотря на выявленный рост сил сцепления в зоне контакта «старый» – «свежий» бетон, при его защите сульфатом алюминия уровень прочности стыка ( $f_{ctm} \sim 1,13$  МПа) все же ниже прочности на осевое растяжение собственно бетона образцов-аналогов:  $f_{ctm} \sim 3,8$  МПа, установленный в данном эксперименте, т. е. составляет  $\sim 30$  % ее величины.

### 5.1.2. Прочность тяжелого бетона (мелкозернистого и с крупным заполнителем) на сжатие, растяжение при изгибе и осевое растяжение (раскалыванием)

С целью выявления эффективности защитного состава на основе сульфата алюминия в последующих экспериментах оценивали (табл. 5.2) физико-технические характеристики тяжелого бетона (мелкозернистого и с гранитным щебнем фракции 5–20 мм) в сравнительном варианте: твердение в воздушно-сухих условиях ( $t \sim 20 \pm 3$  °С,  $\phi \sim 60 \pm 5$  %) без мер защиты поверхности образцов и с 2-х кратным (после формования и через 30 минут – верхняя грань; после распалубки и через 15 минут – остальные грани образцов) напылением 5 %-го раствора  $Al_2(SO_4)_3$ .

Таблица 5.2

Прочностные характеристики образцов тяжелого бетона

Вид бетона	Наличие защиты поверхности	Прочность на сжатие		Растяжение при изгибе		Осевое растяжение (раскалыванием)	
		МПа	%	МПа	%	МПа	%
1. Мелкозернистый бетон*	–	32,0	100	4,8	100	3,7	100
	раствор $Al_2(SO_4)_3$	48,5	152	6,9	144	5,0	136
2. Бетон с крупным заполнителем**	–	28,0	100	–	–	3,8	100
	раствор $Al_2(SO_4)_3$	40,5	145	–	–	5,2	134

*Примечание:*

\*Расход цемента – 500 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона (В/Ц) ~ 0,42.

\*\* Расход цемента – 350 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона (В/Ц) ~ 0,5.

Во всех случаях образцы распалубливали через 24 часа твердения, а испытывали – в 28 сут. (проектном) возрасте. В табл. 5.2 приведены результаты испытаний образцов (40 x 40 x 160 мм) мелкозернистого и обычного тяжелого (70 x 70 x 70 мм) бетона; (составы по п. 2.2), изготовленных вибрированием со стандартными параметрами ( $A \sim 0,5$  мм;  $f \sim 50$  Гц). Из полученных экспериментальных данных следует, что прочностные характеристики образцов бетона (мелкозернистого и с крупным заполнителем) при уходе за их поверхностью 5 %-ым раствором  $Al_2(SO_4)_3$  возрастают в 1,3–1,5 раза,



в сравнении с образцами-аналогами без защиты поверхности при твердении в воздушно-сухих условиях (скорость ветра –  $V_B = 0,7$  м/с), соответствовавших выполненным испытаниям при соблюдении правила «прочих равных условий».

Эти результаты согласуются с ранее приведенными данными о степени гидратации и количестве химически связываемой воды цементом (табл. 4.5) в образцах цементного камня, твердевших в аналогичных условиях «без» и «с защитой» раствором сульфоалюмината. Рост степени гидратации и «ХСВ» в защищенных от испарений воды образцах закономерно сопровождается ростом плотности (снижением пористости) бетона, что отражается в росте его прочностных характеристик.

### **5.1.3. Деформативность и упругие характеристики бетона**

Деформативность и упругие характеристики (соотношения нагрузка-деформации) бетона определяли в сравнительном варианте, используя образцы-балочки (40 х 40 х 160 мм), твердевшие в воздушно-сухих условиях ( $t \sim 20 \pm 3$  °С,  $\phi \sim 60 \pm 5$  %) до возраста в 28 суток «без защиты» и с защитой поверхности (свежеотформованного бетона и после распалубки) 5 %-ым раствором  $Al_2(SO_4)_3$ . То есть, целью эксперимента было выявление роли разрабатываемого варианта ухода за твердеющим бетоном с позиций его влияния на возможные изменения упругих свойств и деформативности бетона.

Размер образцов (сечение 40 х 40 мм) принят, исходя из возможностей испытательной машины универсального типа фирмы «Zwick» (Германия), обеспечивающей автоматический отсчет показаний деформаций образца бетона, приложенной к нему нагрузки и оценку упругих свойств бетона при нагрузке «F», Н, соответствующих уровню деформации образца в 0,2 % (т. е. в области упругой «работы» образца бетона).

На начальном этапе испытаний были определены призмная прочность образцов (составившая 26 МПа «без защиты» и «с защитой» – 34 МПа, а также оценена деформативность бетона («без» и «с защитой») при испытаниях образцов-балочек на изгиб. Из данных рис. 5.2 очевиден эффект защиты твердеющего бетона, отраженный в росте нагрузки к моменту разрушения образцов от ~ 1150

Н (без защиты) до  $\sim 1470$  Н, т. е. примерно на 25–30 %.

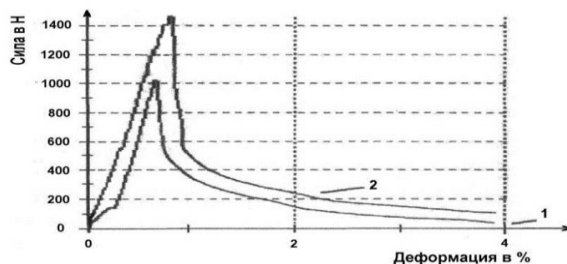


Рисунок 5.2 – Соотношение «нагрузка – деформации» образцов при изгибе:

1 – образец без защиты,

2 – образец, обработанный 5 %-ым раствором  $Al_2(SO_4)_3$

На рис. 5.3 приведены графические зависимости, отражающие развитие деформаций при испытаниях образцов-аналогов (без защиты – № 1, и с защитой 5 %-ым раствором  $Al_2(SO_4)_3$  – № 2) на сжатие. В данном случае рост величины разрушающей нагрузки составил: от  $\sim 50\,000$  Н до  $\sim 60\,000$  Н, т. е.  $\sim 20$  %.

Оценка модуля упругости, полученная путем определения уровня нагрузки в зоне упругой работы испытываемых образцов из мелкозернистого бетона (в каждой серии – 6 шт.) показала, что среднее значение  $E_{ст}$  в серии, обработанной сульфатом алюминия, примерно на  $\sim 27$  % превышает его среднюю величину для серии без обработки поверхности образцов ( $E_{ст} \sim 28$  ГПа, против 22 ГПа).

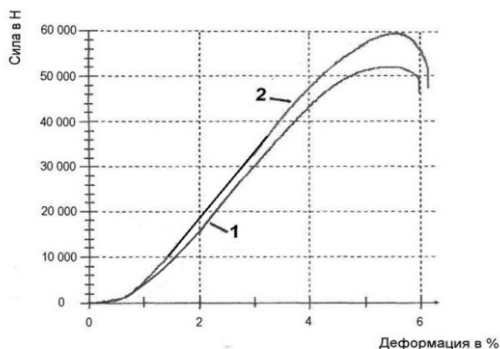


Рисунок 5.3 – Соотношение «нагрузка – деформации» образцов при сжатии:

- 1 – образец «без защиты»;
- 2 – образец, обработанный 5 % раствором  $Al_2(SO_4)_3$

Следует отметить, что полученная величина модуля упругости образцов мелкозернистого бетона –  $E_{ст} \sim 28$  ГПа практически соответствует (достаточно близка) требуемому расчетному значению модуля упругости такого бетона по СНБ 5.03.01-02 [138]. В частности, по данным этого норматива для мелкозернистого бетона класса С25/30, который обеспечивает прочность на сжатие ( $f_{cm} \sim 41$  МПа) «защищенных» образцов, по данным табл. 5.2 [138] расчетное значение модуля упругости для нашего случая составит:  $38 \times 0,85 \times 0,9 \sim 29$  ГПа, если приравнять условия твердения «защищенного» бетона на воздухе соответствующим приему пропаривания бетона. Здесь необходимо отметить, что это несколько упрощенное определение такой расчетной конструкционной характеристики как модуль упругости бетона требует уточнения по конкретным данным его состава, условий твердения, уровня прочности (класса бетона). Однако безусловным фактом является эффективность защиты твердеющего в воздушно-сухих условиях бетона разрабатываемым методом с позиций обоснования его упругодеформативных характеристик. Одним из факторов, обеспечивающих этот эффект, является снижение усадки твердеющего бетона, т. е. микротрещинообразования в его структуре, что подтверждают экспериментальные данные следующего раздела работы.

#### 5.1.4. Деформации усадки бетона

Процесс твердения бетона сопровождается изменениями его объема. Наиболее значительным является уменьшение объема при твердении в воздушно-сухих условиях и, особенно, при пониженной влажности среды, получившее название *усадки* бетона.

Усадка бетона вызывается физико-химическими процессами, происходящими в бетоне (а по существу – в цементном камне) при твердении, а также изменении его влажности. Суммарная величина деформаций усадки складывается из ряда составляющих, среди которых наиболее существенное значение имеют влажностные, контракционные и «карбонизационные» деформации, названные так по виду определяющего фактора.

*Влажностная усадка* вызывается изменением распределения, перемещением и испарением влаги в капиллярных порах структуры как твердеющего, так и затвердевшего цементного камня. Эта составляющая играет ведущую роль в суммарной усадке бетона.

*Контракционная усадка* есть следствие того, что объем новообразований цементного камня меньше объема, занимаемого веществами, вступающими в реакцию при их формировании (исключая образование гидросульфоалюмината кальция – этtringита).

В бетонах, характеризующихся повышенной плотностью и сниженным количеством воды затворения, развивается специфический вид усадки, названный «аутогенной» [1], причины которой кроются в продолжении реакций гидратации цемента и связанным с этим явлением перераспределения в объеме новообразований цементного камня воды, количество которой исходно близко к теоретически необходимому для протекания реакций между водой и вяжущим.

Усадка бетона, развивающаяся в твердеющем материале, может привести к возникновению трещин в бетоне, особенно в изделиях (конструкциях) с большой открытой поверхностью и, в особой мере, при твердении в воздушно-сухих условиях.

Величина усадки бетона также зависит от его состава и свойств использованных материалов и увеличивается при повышении содержания цемента и воды, применении высокоалюминатных и содержащих минеральные добавки (кроме зон уноса) цементов, мелкозернистых и пористых заполнителей. В особой мере опасно быстрое «высыхание» бетона, твердеющего в воздушно-сухих условиях окружающей среды, либо при прогревах сборных изделий с использованием сухих теплоносителей (или при кондуктивном обогреве изделий с большой открытой поверхностью), что приводит к значительной и неравномерной усадке (усадка поверхностных слоев материала выше) и сопровождается появлением усадочных трещин, снижающих качество и долговечность строительных изделий и конструкций.

Для испытаний по ГОСТ 24544 [139], (результаты приведены в табл. 5.3) использовали образцы-балочки размерами 40 x 40 x 160 мм, изготовленные из мелкозернистого бетона (п. 2.2). Образцы изготавливали и испытывали сериями по 3 образца и в сравнительном варианте: контрольная серия – без обработки (защиты) поверхно-

сти; основная серия – с защитой после изготовления по поверхности свежеотформованного бетона и после распалубки (через 23 часа твердения) остальных граней призм по разрабатываемой технологии 5 %-ым раствором  $Al_2(SO_4)_3$ .

Таблица 5.3

Значения усадки образцов мелкозернистого бетона с защитой  
и без защиты поверхности

Серия образцов бетона	Порядковый номер образца	Усадка образцов бетона в мкм, в возрасте, сут:								Относительные изменения усадки бетона (%) в возрасте, сут:	
		3	7	14	21	28	42	56	72	3	42
1. Контрольные (без защиты поверхности)	1	50	89	116	131	142	150	150	151	–	–
	2	51	91	120	132	145	155	155	155	–	–
	3	52	92	122	135	147	158	158	159	–	–
	среднее	51	–	–	–	–	155	–	–	100	100
2. Основные (обработанные 5 %-ым раствором $Al_2(SO_4)_3$ )	4	34	59	79	98	102	109	111	110	–	–
	5	31	58	79	93	102	108	108	108	–	–
	6	37	61	87	97	105	117	118	119	–	–
	среднее	34	–	–	–	–	111	–	–	66	72

Испытания по определению деформаций усадки начались на 3 сутки после изготовления образцов, твердевших в помещении лаборатории ( $t \sim 20 \pm 2$  °С;  $\phi \sim 65 \pm 5$  %) с периодичностью испытаний: 3; 7; 14; 21; 28; 42; 56 и 72 суток; показания индикатора округляли до микрона (мкм).

Результаты испытаний, приведенные в табл. 5.3, позволяют сделать вывод, что деформации усадки мелкозернистого бетона (к моменту их стабилизации в возрасте образцов  $\sim 42$  суток) снизились, за счет ухода за его поверхностью уплотняющей добавкой  $Al_2(SO_4)_3$ , примерно на 28 %, в сравнении с необработанными образцами контрольной серии. Следует отметить, что наиболее интенсивно деформации усадки «развивались» в первые 3–7 суток твердения образцов, достигая 30–55 % от их величины к 4272 суткам. В целом, относительные деформации к моменту их стабилизации ( $\sim 42$  сут) составили:  $154,5 / 160 = 0,965$  мкм/мм и  $111,4 / 160 = 0,696$  мкм/мм, что соответствует: 0,965 мм/м и 0,696 мм/м и нахо-

дятся в «области» общеизвестных их величин для мелкозернистого бетона.

## 5.2. Эксплуатационные свойства бетона

### 5.2.1. Водопоглощение и водонепроницаемость

Анализ работ в области морозо- и коррозионной стойкости бетона [8–11; 18; 20; 25; 35; 40–43] показывает, что основным структурным фактором повышения его способности сопротивляться внешней агрессии является снижение капиллярной (открытой, сообщающейся) пористости, которая характеризуется размерами сечений капилляров более 0,1 мкм или  $> 1000 \text{ \AA}$ . В этой связи оценка изменений величины водопоглощения бетона и его водонепроницаемости под давлением воды, которые характеризуют наличие и объем открытой (сообщающейся) пористости, что позволяет одновременно оценить эффективность разрабатываемого варианта защиты твердеющего бетона с позиций обеспечения его эксплуатационных свойств.

*Водопоглощение бетона* по массе определили (табл. 5.4) по стандартной методике ГОСТ 12730.3-84 [99] с начальным насыщением серий из 3-х образцов (куб с ребром 70 мм; возраст – 28 сут) воздушно-сухого твердения ( $t \sim 20 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\phi \sim 60 \pm 5 \%$ ) до постоянной массы при последующем высушивании до постоянной массы.

Таблица 5.4

Водопоглощение бетона по массе ( $W_m, \%$ ) и по объему ( $W_0, \%$ )

Серия образцов бетона	Порядковый № образца	$W_m, \%$	$W_0, \%$	Изменение $W_m, \text{ в } \%$
1. Контрольные (без защиты поверхности)	1	3,9	8,2	–
	2	3,6	7,6	–
	3	3,9	8,2	–
	среднее	3,8	8,0	100
2. Основные (вся поверхность обработана 5 %-ым раствором $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ )	4	3,2	6,7	–
	5	3,4	7,1	–
	6	3,1	6,5	–
	среднее	3,2	6,8	84

Водопоглощение по объему рассчитано по методике указанного стандарта с учетом  $\rho^0_{\text{бетона}}$  в сухом состоянии. Результаты испытаний, приведенные в табл. 5.4, свидетельствуют о снижении величины водопоглощения образцов бетона при обработке их поверхности защитным составом сульфоалюмината, при соблюдении правила «прочих равных условий». Учитывая, что снижение водопоглощения бетона отражает рост его плотности и непроницаемости, следует ожидать повышения устойчивости защищаемого сульфатом алюминия бетона при внешней агрессии эксплуатационной среды. В частности, при солевой агрессии, при переменном замораживании–оттаивании, а также насыщении – высушивании строительных изделий и конструкций в процессе эксплуатации.

*Водонепроницаемость бетона* определили по стандартной методике ГОСТ 127705-84 путем оценки изменений ее величины (твердение образцов в течение 28 сут, без ухода за поверхностью, к которой поступала вода под давлением в процессе испытаний, и при нанесении 2-х «слоев» 5 %-го раствора  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  по разрабатываемой технологии на эту (верхнюю) грань образцов) по величинам экспериментально установленных коэффициентов фильтрации в этих сравниваемых вариантах (табл. 5.5).

Давление воды при испытаниях увеличивали ступенями до 0,1 МПа с выдержкой в течение 1 ч. После появления фильтрата ( $Q$ , см<sup>3</sup>), как среднее значение пяти наибольших замеров (при разнице расхода воды между замерами не более 20 %) на каждом образце (при 3-х образцах в серии).

Значение  $K_f$  вычисляли по формуле:

$$K_f = \eta \frac{Q \cdot \delta}{S \cdot \tau \cdot \Delta P} \cdot K_n, \text{ см/с} \quad (5.2)$$

где  $\eta$  – коэффициент, учитывающий вязкость воды в зависимости от температуры; в наших экспериментах  $t \sim 20$  °С и  $\eta \sim 1,0$ , доли ед.;

$Q$  – расход воды (фильтрата) за время  $\tau$ , Н;

$\delta$  – толщина образца, равная 5 см;

$\tau$  – время сбора фильтрата, 1800 с (30 мин);

$\Delta P$  – разность давления на входе и выходе воды (при  $P_{\text{вых}} = 0$ ,  $\Delta P = P_{\text{изм}}$ ), Па;

$S$  – площадь образца, равная  $38,5 \text{ см}^2$ ;

$K_p$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние диаметра образца, равный  $2,8$  при  $\varnothing 80 \text{ мм}$ .

Значения коэффициента фильтрации, определенные на образцах диаметром  $\sim 80 \text{ мм}$  (поправочный коэффициент  $K = 2,8$ ) и высотой  $50 \text{ мм}$ , соответствует области допустимых по ГОСТ 12730.5-84 значений для  $W2$  при твердении бетона без защиты и  $W4$  для образцов, обработанных сульфатом алюминия.

Таблица 5.5

Данные о коэффициенте фильтрации воды водонепроницаемости бетона

Серия (5 шт) образцов бетона	Давление измерения $R_{изм}$ , Мпа	Средний расход воды, по массе, Н за $\tau$ (с)	Коэффициент фильтрации воды**, $K_f$ , см/с	Марка бетона по водонепроницаемости W
Контрольные (без защиты поверхности)	0,4	38,0*	$1,9-10^{-8}$	W2
Основные (обработанные 5 %-ым раствором $Al_2(SO_4)_3$ )	0,4	12,0*	$6,0-10^{-9}$	W4

*Примечания:*

\* Среднее значение по четырем наибольшим результатам.

\*\* Среднее значение по  $K_f$  образцов № 3 и № 4

Результаты этих экспериментов логичны и подтверждают ранее полученные данные о росте непроницаемости бетона за счет уплотнения структуры при обработке его поверхности сульфатом алюминия.

### 5.2.2. Солестойкость в среде хлоридов

Коррозия бетона представляет собой процесс его разрушения вследствие химического или физико-химического взаимодействия с агрессивной средой [40–48]. Многочисленные разновидности коррозии бетона, зависящие от совокупности факторов, характеризующих внешнюю среду и бетон, по общепризнанной классификации В. М. Москвина, могут быть разделены на три основных вида.



Коррозия первого вида объединяет все процессы взаимодействия бетона и внешней водной среды с малой временной жесткостью и сопровождается растворением и выносом растворимых компонентов цементного камня (в частности  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). К этому виду относят, например, взаимодействие бетона с пресной водой.

Коррозия второго вида объединяет все процессы взаимодействия бетона с внешней средой, содержащей химические вещества, которые, вступая в обменные реакции с составными частями цементного камня, образуют не обладающие вяжущими свойствами легкорастворимые соли или аморфную массу. К этому виду относят коррозию бетона при его взаимодействии с растворами кислот, в том числе уголекислоты, магниезальных солей, солей аммония и др.

Коррозия третьего вида объединяет все процессы взаимодействия бетона с внешней средой, которые связаны с образованием и накоплением в бетоне малорастворимых солей, характеризующихся увеличением объема при переходе в твердую фазу с образованием кристаллов, что в свою очередь вызывает внутренние напряжения и деструктивные явления в бетоне. Подобные явления могут возникать вследствие кристаллизации не только продуктов реакции, но и солей в порах бетона, поступающих извне в виде раствора. К этому виду относят коррозию при действии сульфатов за счет роста кристаллов гидросульфатоалюмината кальция, а также солей хлора.

Наиболее характерной для Беларуси агрессивной средой в процессе эксплуатации бетонных и железобетонных изделий и конструкций являются соли, содержащие ион хлора. Преимущественно – это  $\text{NaCl}$  и  $\text{KCl}$ , используемые в качестве антиобледенителей в зимний период, присутствующие в грунтовых водах и представляющие серьезную опасность с позиций обеспечения надежности и долговечности строительных конструкций. Контроль за качественными характеристиками испытательных растворов химических реагентов и вводимых в бетон добавок осуществляли с использованием данных источников [140–145].

Солестойкость бетона исследовали по изменению прочности и массы образцов в процессе испытаний (табл. 5.6). Режим одного цикла (один раз в сутки) составлял высушивание образцов при температуре в сушильном шкафу  $t \sim 60^\circ\text{C}$  в течение 7–8 часов и последующее насыщение в 5 % растворе  $\text{NaCl}$  при  $t \sim 15^\circ\text{C}$  (в ванне с

погружением образцов не менее, чем на 50 мм под уровнем раствора) в течение 16–17 часов по общепризнанной методике источника [103].

Таблица 5.6

Изменение массы образцов и прочности бетона при испытаниях на солестойкость

Серия образцов бетона	Порядковый № образца	Прирост массы образцов (г)* и прочность бетона на сжатие (МПа) после циклов:							
		0		5		10		20	
		г	МПа	г	МПа	г	МПа	г	МПа
1. Контрольные (без защиты поверхности)	1	–	29,5	25,6	31,9	29,3	33,8	32,1	27,9
	2	–	28,8	23,4	33,6	26,6	35,4	29,4	26,5
	3	–	27,9	26,2	30,8	30,5	32,6	33,5	27,0
	среднее	–	28,7	–	32,1	–	33,9	–	27,1
2. Основные (обработанные 5 %-ым раствором $Al_2(SO_4)_3$ )	4	–	34,7	19,0	37,4	22,2	38,8	23,0	38,4
	5	–	36,0	20,3	36,3	23,8	36,6	23,3	38,8
	6	–	35,6	20,8	35,2	23,0	38,0	24,2	39,2
	среднее	–	35,4	–	36,3	–	37,8	–	38,8

Образцы бетона (кубы с ребром 70 мм; состав бетона по п. 2) после изготовления твердели в воздушно-сухих условиях ( $t \sim 20 \pm 3$  °С;  $\phi \sim 60 \pm 5$  %). Поверхность образцов контрольной серии (3 шт.) не обрабатывали, а основной (3 шт.) – обрабатывали (после формования и распалубки) раствором  $Al_2(SO_4)_3$ .

Изменения массы образцов и прочность бетона определяли в насыщенном жидкостью состоянии через 5, 10 и 20 циклов испытаний. Учитывая сравнительный характер испытаний (при одинаковых условиях для обеих серий образцов) с целью ускорения процесса деструкции бетона при испытаниях на солестойкость и сокращения времени проведения эксперимента образцы бетона после высушивания не охлаждали, а помещали в раствор разогретыми. В этом случае имеет место резкое (жидкостное) охлаждение наружных слоев бетона и в них возникают значительные растягивающие усилия. Многократное повторение резкого охлаждения образцов сопровождается образованием и развитием трещин с поверхности бетона и ускорением процесса его деструкции, усиливая эффект от воздействия накапливающихся в порах бетона кристаллов соли.

Оценка данных табл. 5.5 о приросте массы образцов через 5–20 циклов испытаний свидетельствует о накоплении в объеме бетона соли и об образовании дополнительных объемов капиллярных пор, как следствия развития деструктивных процессов в бетоне. Одновременно с деструктивными «накладывается» действие благоприятных факторов.

С одной стороны – это продолжение гидратационного процесса, а кроме этого – положительный эффект от первоначального уплотнения структуры бетона за счет заполнения его крупных пор веществом (кристаллами) соли, что способствует на начальном этапе испытаний снижению пористости и отражается в росте прочности образцов бетона. Этот эффект для «защищенных» образцов основной серии относится и к испытаниям после 20 циклов насыщения в растворе соли – высушивания. Прочность же незащищенных образцов контрольной серии к 20 циклам снизилась примерно на 20 % по сравнению с 10-ю циклами и оказалась ниже начальной, после чего эксперимент был прекращен. К этому моменту среднее значение прочности образцов основной серии (т. е. обработанной раствором  $Al_2(SO_4)_3$ ) превысило таковое для контрольной серии на:  $(38,8-27,1) : 38,8 \cdot 100 \sim 30 \%$ .

### 5.2.3. Морозостойкость

Морозостойкость бетона определили с использованием ускоренного метода по ГОСТ 10060-95 [100] с насыщением, замораживанием (при  $t = -55 - +60$  °C) и оттаиванием в воде и в 5 %-ом растворе NaCl ( $t \sim 18$  °C), в варианте сравнения: серия бетонных образцов (70 x 70 x 70 мм) без защиты поверхности (контрольная) и с 2-кратным нанесением 5 %-го раствора  $Al_2(SO_4)_3$  по разрабатываемой технологии.

В табл. 5.7 приведены результаты испытаний, которые, с одной стороны, подтверждают эффективность защиты поверхности твердеющего в воздушно-сухих условиях бетона по разрабатываемой технологии, а с другой – показывает, что при этом обеспечивается уровень морозостойкости тяжелого бетона (марки F300–F350), достаточный для строительных конструкций общестроительного назначения.

Таблица 5.7

## Результаты испытаний бетона на морозостойкость

Серия образцов бетона	Испытательная среда	Изменения массы ( $\Delta m$ , %) и прочности (МПа) серий из 3-х образцов (средние значения) после количества циклов:									Марка бетона по морозостойкости
		0		3		5		10		15	
		МПа	%	МПа	%	МПа	%	МПа	%	МПа	
Контрольная (без защиты)	вода	31,0	+0,12	32,0	+0,10	29,4	-0,23	25,5	-0,68	23,0	–
	5 %-й раствор NaCl	31,5	+0,24	32,4	-0,10	29,8	-0,30	22,0	–	–	F200
Основная (обработанная 5 % раствором $Al_2(SO_4)_3$ )	вода	38,2	+0,16	39,1	+0,18	39,6	-0,13	36,9	-0,40	31,0	–
	5 %-й раствор NaCl	39,0	+0,22	40,5	+0,20	39,6	-0,10	37,5	–	–	F300-F350

*Примечания:*

1. Знак «+» означает прирост массы образцов, знак «-» – ее снижение.
2. Оценка морозостойкости бетона при  $t = 55-60$  °С для «среды-воды» не предусмотрена стандартом.

Что касается бетонов специального назначения, то показатель морозостойкости должен оцениваться по конкретным его составам с учетом конкретных требований по этому показателю к бетону строительных конструкций (изделий).

#### 5.2.4. Защитная способность по отношению к стальной арматуре

Коррозия стали в бетоне строительных конструкций не допускается, поскольку ее развитие приводит к уменьшению площади сечения арматуры и вызывает (вследствие увеличения объема продуктов коррозии стали) появление трещин в бетоне, снижение жесткости и несущей способности конструкций, которые не могут быть учтены расчетом.

Стойкость железобетонных конструкций в условиях агрессивного воздействия предопределяется надежностью совместной работы

арматуры с бетоном. Защитное действие бетона по отношению к арматуре определяется способностью цементного камня пассивировать поверхность арматуры. Нарушение прочного контакта (сцепления) арматуры и бетона, даже частичное, может способствовать развитию электрохимической коррозии стали.

Качественное уплотнение цементного бетона, создание защитного слоя необходимой толщины и благоприятных условий твердения являются лучшими средствами защиты арматуры от коррозии. При этом обеспечиваемая цементом в бетоне высокая степень щелочности воды в порах и капиллярах способствует пассивации поверхностных слоев стальной арматуры.

Пассивация поверхностных слоев арматуры обеспечивается при определенном содержании гидрата окиси кальция в жидкости пор цементного камня, характеризующимся показателем рН в бетоне или растворе не ниже 11,8. Показатель рН в бетонах может меняться в зависимости от ряда факторов.

Водородный показатель рН твердеющего цементного камня зависит от вида цемента, содержания воды в цементном тесте, условий твердения, возраста цементного камня и вида добавок. В процессе твердения цементного камня его рН изменяется. Так, например, у камня из клинкерного портландцемента стандартного помола (тесто нормальной густоты) в суточном возрасте рН  $\sim$  12,6, а к 90-суточному возрасту он повышается до 13,8. Камень из быстротвердеющего портландцемента (более тонко измолотого) в суточном возрасте имеет рН = 12,8, а к 90-суточному возрасту – до 13,5 и может снижаться со временем. При наличии минеральных добавок в цементе показатель рН возрастает до определенного возраста цементного камня, а далее снижается. Так, у цементного камня из шлакопортландцемента рост показателя рН происходит примерно в первые трое суток твердения, а далее он стабилизируется, что объясняется связыванием  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  активной минеральной добавкой. Наибольший показатель рН имеет цементный камень, твердевший в воде.

Для надежной защиты арматуры в бетоне необходимо, чтобы щелочность среды бетона, оцениваемая водородным показателем рН, была не ниже 11,8; при меньших значениях рН возможна коррозия арматуры в бетоне.

Обычная бетонная смесь на портландцементе после затворения содержит насыщенный раствор гидрата окиси кальция, что обеспечивает рН смеси не менее 12,6, а по мере твердения бетона – 13,5–13,8. В обычном бетоне нормального твердения содержание гидрата окиси кальция составляет 10–15 % от массы цемента и может пополняться за счет гидратации не полностью прогидратированных крупных (десятки микрон) зерен цемента (в обычном бетоне степень гидратации цемента достигает 70–75 %). Понижение рН среды в бетоне наблюдается при уменьшении концентрации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  вследствие выщелачивания его пресной проточной водой или в случаях использования активных минеральных добавок. Кроме этого в поверхностных (защитных) слоях бетона может наблюдаться снижение щелочности среды вследствие нейтрализации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  кислыми жидкостями и газами (карбонизации), что создает опасность коррозии арматуры. Этот отрицательный эффект прогрессирует с ростом объема и размеров сечений капиллярных пор, характерного для бетона, твердеющего на открытом воздухе без мер защиты поверхности конструкций (изделий).

Основная задача данных исследований заключалась в выявлении возможного влияния разрабатываемого приема защиты твердеющего в воздушно-сухих условиях бетона на сохранность в нем стальной арматуры, т. е. на его защитную способность по отношению к ней.

Для ее решения выполнили сравнительные испытания на сериях образцов без защиты поверхности и с 2-х разовым нанесением 5 %-го раствора

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , оценивая состояние арматуры в бетоне по методике СТБ 1168-99 [102] как для «направления 2» при циклическом насыщении-высушивании (при насыщении в 5 %-ом растворе  $\text{NaCl}$ ), т. е. путем оценки изменений защитной способности бетона при внешней агрессии эксплуатационной среды.

Состав бетона для испытаний соответствовал п. 6.12.1 СТБ 1168-99, т. е. расход цемента – 300 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона; гранитного щебня – 1150 кг; песка природного – 760 кг; В/Ц = 0,5 (воды – 150 л) при осадке конуса бетонной смеси ~ 2–4 см.

В качестве арматуры использовали стержни  $\varnothing = 10$  мм из стали Ст. 3 по ГОСТ 5781, которые были очищены, отшлифованы и обез-

жирены ацетоном и забетонированы по центральной оси образцов в соответствии с СТБ 1168-99.

В соответствии с положениями стандарта изготовили 2 партии образцов (при 3-х образцах в партии) для каждой из 2-х серий, которые твердели 28 суток в воздушно-сухих условиях ( $t \sim 20 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\phi \sim 60 \pm 5 \%$ ).

При каждом (из 20-ти) цикле «насыщение-высушивание» насыщение в 5 %-ом растворе NaCl образцов вели 24 часа по методике п. 7.10.2 СТБ 1168-99 и высушивали их за 24 часа при температуре  $40 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , т. е. каждый цикл составлял 2 суток.

Отличия от методики испытаний по СТБ 1168-99 состояло в том, что с учетом их исследовательской цели первую партию образцов обеих серий подвергли оценке на коррозионное состояние после 10 циклов, а вторую – после 20 циклов. Результаты испытаний (по 2-м большим значениям (образцам) в партии) приведены в табл. 5.8.

Из данных табл. 5.8 следует недопустимость твердения бетона без мер защиты в воздушно-сухих условиях, соответствующих выполненному эксперименту (отметим – не самых «жестких» по уровню температуры и влажности воздуха), по критерию его защитной способности по отношению к стальной арматуре при наличии внешней агрессии эксплуатационной среды.

Таблица 5.8

Результаты оценки анодных поляризационных кривых

Серия образцов бетона	Количество циклов насыщения высушивания	Плотность тока при потенциале +300 мВ по отношению к насыщенному каломельному электроду), мкА/см <sup>2</sup> , в образцах:				Характеристика коррозионного состояния арматурной стали
		1	2	3	4	
Контрольная (без защиты поверхности)	10	9,8	10,7	11,4	11,0	Неустойчивое пассивное состояние
	20	26,6	28,1	25,0	27,4	Интенсивная коррозия арматуры
Основная (обработанная 5 %-ым раствором Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	10	38,2	3,9	4,2	4,5	Устойчивое пассивное состояние
	20	39,0	7,8	7,6	8,5	Неустойчивое пассивное состояние (коррозия отсутствует)

Обработка поверхности образцов раствором  $Al_2(SO_4)_3$  существенно усилила защитную способность бетона при внешней агрессии хлорида за счет роста непроницаемости их внешнего (обработанного) контура. Уровень плотности тока « $< 10$  мкА на  $см^2$ » и отсутствие следов коррозии на стали (определено разрушением образцов) свидетельствуют о достаточности защиты бетона разрабатываемым способом в целях сохранения пассивности ненапрягаемой арматуры железобетонных конструкций. Оценка применимости этого способа защиты к напрягаемым изделиям (конструкциям) также (на наш взгляд) положительна, т. к. при их изготовлении защищается верхняя грань изделий (конструкций), а преднапрягаемая рабочая арматура располагается в нижней, находящейся в формах, зоне. С учетом того обстоятельства, что при испытаниях по СТБ 1168-99 толщина защитного слоя бетона составляет  $\sim 35$  мм ( $\varnothing$  стержня = 10 мм; размер сечения образца – 70 x 70 мм), а бетон защитного слоя изготавливаемых конструкций (изделий) твердеет в достаточно герметичных формах и более благоприятных, в сравнении с верхними слоями бетона, условиях, данный вывод можно считать обоснованным.

### 5.2.5. Истираемость

Данный вид испытаний обеспечивает прямое подтверждение роста твердости и прочности поверхностного слоя «цементный камень – бетон» (подверженного истиранию абразивным материалом) за счет уплотнения его структуры при обработке поверхности образцов сульфоалюминатом.

Истираемость образцов бетона (70 x 70 x 70 мм) определяли во всех случаях по методике ГОСТ 13087 [143] на круге истирания ЛКИ-3 (по два образца одновременно) в сравнительном варианте: контрольная серия (образцы без защиты) и основная – с обработкой поверхности раствором  $Al_2(SO_4)_3$ . Серия состояла из 4-х образцов. Данные испытаний приведены в табл. 5.9 с округлением до десятых долей в размерности:  $г/см^2$  поверхности истирания образца.



Таблица 5.9

## Результаты испытаний бетона на истираемость

Серия образцов бетона	Порядковый № образца	Истираемость бетона, г/см <sup>2</sup>		Относительное снижение истираемости, %
		образца	среднее	
1. Контрольная (без защиты поверхности)	1	1,1	1,3	100
	2	1,6		
	3	1,2		
	4	1,3		
2. Основная (обработанная 5 % раствором Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	1	0,6	0,6	54
	2	0,5		
	3	0,7		
	4	0,5		

Из них следует, что обработка поверхности бетона раствором сульфоалюмината, способствуя уплотнению и упрочнению внешнего слоя цементного камня (и бетона в целом), существенно повысила (в данном эксперименте – практически в 2 раза) износоустойчивость образцов тяжелого бетона.

### 5.3. Обобщение результатов оценки свойств бетона

Оценивая результаты сравнительных испытаний физико-механических и эксплуатационных свойств тяжелого мелкозернистого бетона и бетона с крупным заполнителем, можно сделать следующие выводы, подтверждающие эффективность разрабатываемого варианта защиты твердеющего в воздушно-сухих условиях бетона (или – варианта ухода за твердеющим бетоном).

*Прочность сцепления слоев «старого» и «свежего» бетона при уходе по разрабатываемой технологии превысила аналогичный показатель при уходе в варианте твердения «старого» бетона под водой в 1,14 раза; при обработке поверхности уплотняющей добавкой «Пенетрон» – в 1,55 раза; пленкообразующим составом «Помороль»*

86» – в 2,14 раза, и при твердении на воздухе «без ухода» – в 2,63 раза.

*Прочность бетона на сжатие* возросла до ~ 40 % и осевое растяжение (раскалыванием) – до 30–36 %, в сравнении с вариантом естественного твердения без защиты поверхности.

*Деформативность* бетона под нагрузкой (при испытаниях образцов на растяжение при изгибе и на сжатие) снизилась, уменьшились и деформации усадки без нагрузки на образцы в процессе «воздушно-сухого» твердения к моменту их стабилизации (в возрасте бетона – 42 суток), примерно в 1,39 раза (т. е. на 39 %).

*Модуль упругости* бетона с защитой поверхности на 27 % превысил таковой для образцов без защиты и, примерно, соответствует расчетному значению для мелкозернистого бетона равного класса по СНБ 05.03.01–02.

*Эксплуатационные характеристики* защищенного по разрабатываемой технологии бетона существенно улучшены: водопоглощение снизилось на 16 %, что обеспечило рост непроницаемости бетона, подтвержденный повышением его водонепроницаемости от марки W2 до W4; солестойкости, морозостойкости (с марки F200 до марок F300–F350), а также защитной способности по отношению к стальной арматуре при внешней агрессии среды.

Уплотнение структуры и упрочнение поверхностного слоя бетона, обрабатываемого защитным составом 5 %-го раствора  $Al_2(SO_4)_3$ , подтверждено испытаниями образцов на истираемость, которая снизилась (в сравнении с необработанными образцами) при прочих равных условиях в 2 раза (с 1,3 г/см<sup>2</sup> до 0,6 г/см<sup>2</sup>).

Таким образом, по совокупности повышения качественных характеристик тяжелого конструкционного бетона, твердеющего в воздушно-сухих условиях окружающей среды, предлагаемый вариант ухода за ним обеспечивает существенные преимущества по сравнению с практикуемыми аналогами и может с успехом использоваться [145; 147] в строительном производстве.

## 5.4. Основные положения ведения работ

### 5.4.1. Общие положения для работ с защитным составом

Работа с защитным составом – 5 %-ым раствором  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  (сульфата алюминия), заключается в приготовлении, хранении (при необходимости) и применении по свежееотформованному или после распалубки (частично затвердевшему) бетону [147].

Последовательность выполнения и режимы реализации отдельных технологических переделов, разработанные на основе результатов диссертационного исследования, изложены в соответствующем технологическом регламенте, материалы которого в монографии не приводятся и по мере необходимости «привязывается» к условиям использования защитного состава конкретными потребителями. В настоящем разделе приведены справочные данные о веществе сульфата алюминия, необходимые для приготовления его «рабочих» растворов.

Сульфат алюминия ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  или «СА») по положениям «Пособия» к применению химических добавок в бетонах [56; 58] относится к группе неорганических уплотняющих структуру бетона добавок по классификации стандарта Беларуси СТБ 1112-98 [57]. Разрешен к применению в этом качестве в бетонных и железобетонных конструкциях (исключая общие для добавок электролитов запреты к применению в конструкциях: при эксплуатации в среде постоянного электрического тока и при использовании в бетоне заполнителей, содержащих аморфный (активный) кремнезем) в дозировке до 3 % от массы цемента (в пересчете на сухое вещество сульфата алюминия).

Производится сульфат алюминия (в зависимости от температурного режима процесса) либо безводным (т. е.  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), либо в виде гидрата:  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ . Выветривается при хранении на открытом воздухе.

Бесцветные кристаллы сульфата алюминия хорошо растворяются в воде, что обеспечивает нормальные условия для приготовления растворов различной концентрации. В табл. 5.10 приведены необходимые для приготовления растворов  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , данные [145; 147]. В частности, расход (содержание, г/л) сухого вещества

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  в 1 л раствора для первичного контроля при его приготовлении. Контроль качества приготовленного раствора (рекомендуется к применению в соответствии с результатами настоящих исследований, раствор 5 %-ой концентрации) осуществляют по значению его плотности [58], используя соответствующие ареометры (плотномеры). Для строительной лаборатории, осуществляющей контроль производства работ с раствором рабочей концентрации, рекомендуется установить для конкретных условий зависимость: « $\rho_p - t$ », для принятой концентрации раствора и его температуры (чем обеспечивается учет изменений плотности рабочего раствора в зависимости от его температуры) по следующей методике.

Для принятой к постоянному использованию концентрации раствора используемого сульфата алюминия определяют плотность  $\rho_n$  при температуре  $t = 20$  °С. Затем, используя «водяную баню» для этого раствора определяют диапазон изменения плотности при охлаждении (например, с «шагом» 5 °С) до  $t = 5$  °С, и нагреванием до  $t = 40$  °С (или иной температуры, при которой осуществляют растворение в воде  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , в процессе приготовления раствора). Полученные данные о взаимозависимости « $t - \rho$ » используют для точного контроля за качеством раствора сульфата алюминия. Такое определение минимизирует погрешность, связанную с возможными изменениями качественных характеристик разных партий сульфата алюминия и рекомендуется к использованию взамен (или параллельно) поправочного коэффициента «А» [140–142], учитывающего изменение плотности растворов химических веществ в зависимости от температуры и концентрации.

Таблица 5.10

Характеристики растворов  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  ( $t = 20$  °С)

Концентрация раствора, %	1	4	5	6	10	15	20	28
Содержание $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , г/л	10,09	41,60	52,63	63,66	110,50	177,80	245,20	375,24
Плотность раствора, г/л ( $\text{кг/м}^3$ )	1009	1040	1050	1061	1105	1165	1226	1333

Приготовление растворов «рабочей» ( $C = 5\%$ ) или «повышенной» ( $C = 10\%$  и  $15\%$ ) концентрации может организовываться централизованно (т. е. с последующей поставкой пользователю) или непосредственно на месте (организации, объекта) применения. Срок хранения растворов  $Al_2(SO_4)_3$  практически неограничен, но перед употреблением после длительного хранения требуется определение плотности (т. е. оценка концентрации) и, при необходимости, дополнительное перемешивание (если появился осадок), либо добавления воды или вещества  $Al_2(SO_4)_3$  до требуемой концентрации (плотности) раствора.

Применение защитного состава в виде раствора  $Al_2(SO_4)_3$  предполагает летний период работ на строительной площадке (монолитное строительство) либо использование круглогодично для заводских условий производства (при защите поверхности сборных изделий). С учетом конкретных условий использования организуют хранение раствора  $Al_2(SO_4)_3$ , которое следует осуществлять при положительной температуре окружающей среды, т. к. данное вещество не является противоморозной добавкой и при отрицательной температуре его растворимость снижается (появляется осадок), а раствор понижает концентрацию и может замерзнуть. Своих свойств раствор  $Al_2(SO_4)_3$  не теряет и может использоваться после оттаивания (подогрева) и дополнительного перемешивания.

Правила техники безопасности и охраны труда (производственной санитарии) при работе с веществом  $Al_2(SO_4)_3$ , приготовлении и работе с растворами соответствуют положениям пособия «Применение добавок в бетоне» [58].

Вещество  $Al_2(SO_4)_3$  не является канцерогеном, но во всех случаях требуется неукоснительное соблюдение изложенных в источнике [58] требований, обеспечивающих безопасность ведения работ с ним.

#### **5.4.2. Производственная апробация и ее результаты**

*Для заводского использования* производственная апробация результатов исследований заключалась в оценке эффективности разрабатываемого состава и технологии при изготовлении бетонных и железобетонных изделий и конструкций в производственных цехах и

на открытых полигонах при воздушно-сухих условиях их твердения в открытых формах, а также при вариантах тепловой обработки изделий, характеризующихся наличием значительной открытой поверхности (в частности, при изготовлении забивных свай на длинном (открытом) стенде и «Т»-образных балок в термоформах).

Во всех случаях использовали защитный состав в варианте 5 %-го раствора  $Al_2(SO_4)_3$ , наносимого на защищаемую поверхность свежеоформованного, а после распалубки изделий «естественного» твердения – на остальные (открывающиеся) поверхности изделий в соответствии с положениями разработанной технологии. То есть в два слоя (приема) с разбежкой по времени нанесения в 0,25–0,5 часа распылением сжатым воздухом.

Отличие обработки прогреваемых изделий заключалось в том, что (с учетом более чем 70 %-го уровня прочности бетона после тепловой обработки) – защитный состав наносили только по свежеоформованному бетону.

Во всех случаях одновременно изготавливали контрольные образцы в соответствии с планом работ лабораторий предприятий, по которым работники этих лабораторий оценивали (контролировали) прочность бетона. Следует отметить, что при прогреве контрольных образцов как в случае пропаривания, так и при «сухих» прогревах (в термоформах и на греющем поддоне (длинный стенд изготовления свай)), защищенные контрольные образцы стабильно показывали большую на 15–20 % прочность на сжатие, чем образцы с открытой поверхностью (традиционно изготавливаемые в условиях, одинаковых с условиями изготовления конструкций).

В случае «сухого» прогрева это связано с потерями воды затвердения бетоном образцов и ростом его пористости. А в случае пропаривания – как с ростом пористости из-за поглощения конденсата пара (отражалось ростом массы образцов) и роста водоцементного отношения бетона, так и с расклинивающим действием жидкости при приложении к образцам сжимающей нагрузки в процессе испытаний (характерное появление мокрого пятна на плитах пресса при испытаниях образцов без защиты). Подтверждением и «базисом» стабильности «защищенных» контрольных образцов бетона, твердевших в «сухих» и «влажных» (при пропаривании) условиях является показатель его средней плотности, незначительно (на 0,5–1 %)

изменившейся относительно средней плотности свежеуложенного бетона.

При производственной апробации разработки на предприятии по производству сборных бетонных и железобетонных изделий – ОАО «Завод сборного железобетона – г. Борисов», в условиях полигона предприятия изготавливали (при твердении как в ямных камерах с паропрогревом, так и на открытой площадке – «естественное» твердение (фактически – воздушно-сухие условия твердения) изделия: блоки стен подвалов, опоры и колонны, элементы забора, перемычки и другие изделия.

При производственном внедрении результатов исследований на заводе железобетонных изделий ОАО «Завод ЖБИ» г. Барановичи, Брестской области изготавливали железобетонные забивные сваи (без поперечного армирования ствола – преднапряженные и каркасно-армированные без преднапряжения арматуры). Технология изготовления в обоих случаях – стендовая. Работы на длинном стенде (длина – 72 метра) вели в соответствии с технологическими регламентами на изготовление того или иного вида свай. Отличие состояло в том, что при апробации технологии защиты бетона 5 %-ым раствором  $Al_2(SO_4)_3$  его наносили на поверхность бетона изделий (по всему стенду) за два приема (фактически через 10–20 минут после формования и через 15–20 минут после нанесения первого слоя). В эти же периоды обрабатывали поверхность контрольных образцов.

Тепловая обработка изделий, осуществляемая подогревом формообразующих элементов стенда и бетона со стороны поддона, осуществлялась общим для предприятия порядком без изменений. В обоих случаях – с защитой поверхности бетона раствором  $Al_2(SO_4)_3$  и без нее (практика предприятия), стенд закрывали составными крышками. Необходимо отметить, что даже при достаточно хорошем техническом состоянии сочленений отдельных крышек (и их самих) такое укрытие не герметично и оставляет возможность испарения части воды затвердения из объема прогреваемого бетона.

При оценке прочности бетона контрольных образцов с защитой поверхности раствором  $Al_2(SO_4)_3$  по разработанной технологии и образцов (кубов с ребром 100 мм без нее (т. е. традиционно изготов-

ленных) лабораторией предприятия прочность защищенных образцов была выше на ~ 10 % к моменту окончания тепловой обработки изделий (испытывали «горячими» т. к. для преднапряженных центрально-армированных изделий следовало обеспечить «передаточную» прочность бетона). При этом уровень прочности «традиционных» образцов соответствовал критерию передачи преднапряжения, составляя 75–80 % от проектной. С учетом роста прочности бетона контрольных образцов, подтвержденного неразрушающим контролем (молоток Кашкарова) поверхности бетона обработанных раствором  $Al_2(SO_4)_3$  изделий, был сделан вывод о возможности снижения продолжительности изотермической выдержки бетона изделий на 1,0–1,5 час при общей продолжительности подачи пара при тепловой обработке в течение 5,5–6,0 час вместо 7,0 час (заводской режим) с сопутствующим экономическим эффектом.

*В монолитном строительстве* внедрение результатов исследований реализовано практикой приготовления защитного состава на основе сульфата алюминия (ООО «Магнатбетон», г. Минск) и практикой его использования на объектах строительства организаций ООО «Домстройагент», г. Минск. В течение ряда лет на объектах строительства – жилые дома, общественные здания, индивидуальное строительство, для защиты твердеющего бетона (конструкций перекрытий, покрытий полов, несущие стены, колонны и пр.) зданий различного назначения используются разработанные и отраженные в настоящей монографии состав и технология его защиты взамен ранее используемых вариантов: гидрофобизаторов разных видов (марок) и пленкообразующих составов, включая «самораспадающиеся». Данные о результатах использования защитного состава на основе отечественного сульфоалюмината полностью подтверждают результаты исследований как по технической эффективности разработки по влиянию на качественные характеристики защищаемого бетона, так и по ее экономической эффективности в сопоставлении с ранее используемыми гидрофобизирующими и, особенно, пленкообразующими защитными составами.

Как следствие, по результатам производственного использования подтверждена эффективность разработанной технологии защиты твердеющего в воздушно-сухих условиях цементного конструкционного тяжелого бетона, заключающаяся, во-первых, в обеспече-



нии его качественных характеристик, во-вторых, в обеспечении нормальных условий для последующей отделки защищаемых поверхностей строительных конструкций и, в-третьих, в существенном снижении стоимости ухода за твердеющим бетоном как при изготовлении сборных изделий, так и в монолитном строительстве.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В материале монографии отражены этапы разработки усовершенствованной технологии защиты бетона, твердеющего в воздушно-сухих условиях, от потерь влаги (высыхания) за счет уплотнения структуры и роста непроницаемости обрабатываемого 5 %-ым раствором сульфата алюминия его внешнего слоя, что обеспечивает качественный уход за свежееотформованными или после снятия опалубки (бортоснастки) бетонными и железобетонными строительными изделиями и конструкциями. Технология базируется на фундаментальном свойстве твердеющего цементного камня проявлять эффект разрежения в объеме порового пространства формирующейся структуры, что обеспечивает условия для диффузии ионов сульфата алюминия, а с другой стороны – на реакционную активность его вещества и способность вступать во взаимодействие с продуктами гидролиза цемента с образованием увеличивающихся в объеме кристаллогидратов, что способствует уплотнению и упрочнению внешнего слоя бетона по обрабатываемой поверхности. На этом основании предложены, экспериментально проверены и подтверждены эмпирико-аналитические зависимости, позволяющие расчетно оценить глубину проникновения наносимого на обрабатываемую поверхность цементного бетона защитного состава с учетом его свойств (динамической вязкости, плотности, температуры), структурных характеристик цементного теста в бетоне (коэффициента пористости, размера зерен цемента), продолжительности периода воздействия и глубины разрежения (перепада давления) в объеме твердеющего бетона.

Отраженная в монографии технология защиты твердеющего бетона прошла производственную проверку, которая подтвердила ее эффективность при изготовлении разнообразных сборных изделий (выразившейся в возможности снижения затрат на тепловую обработку за счет ее сокращения) и в монолитном строительстве. В последнем случае эффективность обработки бетона сульфатом алюминия обеспечивается сочетанием, во-первых, возможностью ухода как по схватившемуся, так и по свежееотформованному бетону, во-вторых, повышается качество сцепления в зоне контакта «старый –

свежий» бетон при работах захватками, в-третьих, обеспечивается качественное сцепление обработанной поверхности строительных конструкций с материалами последующей отделки и существенно снижается стоимость ухода за бетоном по сравнению с традиционными аналогами – гидрофобизирующими и пленкообразующими защитными составами.

Авторы понимают, что при всей значимости результатов исследований, изложенных в настоящей монографии, методы ухода за твердеющим цементным бетоном будут совершенствоваться и представленные в ней данные являются одним из этапов этого процесса, который, безусловно, будет развиваться.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тейлор К. Химия цемента // пер. с англ. – М. : Мир, 1986. – С. 294–345.
2. Powers, T. C., Brownyard, T. I. Studies of the physical properties of Hardened Portland Cement Paste (Bull. 22), p. 992, Portland Cement Association, Chicago, 1948; reprinted from J. Am. Concr. Inst. (Proc.), 1947. – p. 43, 101, 249, 469, 549, 669, 845, 993.
3. Parrott, L. J. In Research on the Manufacture and Use of Cements, Engineering Foundation, New York, 1986. – p. 43.
4. Passaglia E., Rinaldi R. Bull. Mineral. (Paris), 1984. – p. 107, 605.
5. Patel, R. G., Killoh, D. C., Parrott, L. J., Gutteridge, W. A. Mater. Constr. (Paris), 1988. – p. 21, 192.
6. Шестоперов, С. В. Цементный бетон в дорожном строительстве / С. В. Шестоперов и др. – М.: Дориздат, 1950. – 132 с.
7. Юнг, В. Н., Бут Ю. М., Журавлёв В. Ф., Огороков С. Д. Технология вяжущих веществ. – М.: Промстройиздат, 1952. – 262 с.
8. Мощанский, Н. А. Повышение стойкости строительных материалов и конструкций, работающих в условиях агрессивных сред. – М.: Госстандарт, 1962. – 235 с.
9. Мощанский, Н. А. Плотность и стойкость бетонов. – М.: Госстройиздат, 1951. – 175 с.
10. Стольников, В. В. Исследования по гидротехническому бетону. – М.: Госэнергоиздат, 1953. – 330 с.
11. Дементьев, Г. К. Условие долговечности бетона и железобетона. – Куйбышев: Куйбышевское книгоиздательство, 1965. – 120 с.
12. Лыков, А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 464 с.
13. Лыков, А. В. Теория сушки. – М.: Госиздат, 1968. – 472 с.
14. Торопов, Н. А. Химия цементов. – М.: Промстройиздат, 1956. – 270 с.
15. Конопленко, А. И. К вопросу теории морозостойкости бетона. В сб. тр. Ростовского инженерно-строительного института. – Вып. XIII. – Ростов-на-Дону, 1958. – С. 105–120.

16. Рейтлингер, С. А., Чеховский Ю. Б. Механизмы переноса газов и жидкостей через бетон и методы исследования структуры пор бетона. – М.: ВНИИСТ Главгаза СССР, 1961. – 18 с.

17. Ступаченко, П. П. Структурная пористость и ее связь со свойствами цементных, силикатных и гипсовых материалов. Тр. Дальневосточного политехнического института им. В. В. Куйбышева, т. 63. – Вып. 1 – Владивосток, 1964. – С. 3–62.

18. Горчаков, Г. И., Капкин М. М., Скрамтаев Б. Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. – М.: Стройиздат, 1965. – 195 с.

19. Ахвердов, И. Н., Дзабиева Л. Б. Исследование дифференциальной пористости цементного камня методом электропроводности при отрицательных температурах. – ДАН БССР, т. XI, N 7, 1967. – С. 596–600.

20. Чеховский, Ю. Б. Понижение проницаемости бетона. – М.: Энергия, 1968. – С. 39–56.

21. Гордон, С. С. Структура и свойства тяжелых бетонов на различных заполнителях. – М.: Стройиздат, 1969. – 160 с.

22. Бруссер, М. И. Исследование структурной пористости бетона и факторов ее определяющих. Автореф. дис. к.т.н. 08.00.05 – Строительные материалы и изделия. – М., 1971. – 19 с.

23. Коупленд, Л. Э., Вербек Д. Д. Структура и свойства затвердевшего цементного теста. Шестой международный конгресс по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1976. – Т. 2. – С. 258–274.

24. Волженский, А. В. Теоретическая водопотребность вяжущих, величина частиц новообразований и их влияние на деформации твердеющих систем. – Бетон и железобетон, 1969, N 9. – С. 35–36.

25. Шейкин, А. Е., Чеховский Ю. В., Бруссер М. И. Структура и свойства цементного бетона. – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.

26. Пауэрс, Т. К. Физическая структура портландцементного теста. – М.: Стройиздат, 1969. – С. 300–319.

27. Mikhail, R. Sh. Studies on water and nitrogen absorption on hardened cement pastes. *Concr. Res.*, 1972, V. 2, N. 4. – P. 24–26.

28. Feldman, R. F., Some factors affecting Yongs modulus porohydrated Portland cement and concrete. *Cem. Concr. Res.*, 1972, N 2. – P. 521.

29. Brunauer S., Skalny J., Older I. and Yudenfreund, Complete Pore Structure Analysis. Pore Structure and Properties of Materials RILEM-JUPAC, Prague, 1973, N 3. – P. 279.

30. Кондо Р., Даймон М. Фазовый состав затвердевшего цементного теста. – В кн.: Шестой Международный Конгресс по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1974. – 44 с.

31. Стольников, В. В., Ребиндер П. А., Лавринович Е. В. Седиментационные процессы в бетонной смеси и их влияние на образование структуры бетона и на его водонепроницаемость. ДАН СССР, 1951. – Вып. XXXI, № 3. – С. 431–434.

32. Ушеров–Маршак, А. В., Сонов В. П. Микроструктура цементного камня // Коллоидный журнал, т. 59, № 6. – С. 846–850.

33. Харитонов, А. М. Структурно-имитационное моделирование в исследованиях свойств цементных компонентов. Автореф. дис. д.т.н. 05.23.05. – Санкт-Петербург: Строительные материалы и изделия, 2009. – 36 с.

34. Брунауэр С. Адсорбция газов и паров//Т. 1. Физическая адсорбция. – пер. с англ. – М.: ИЛ, 1948. – 849 с.

35. Шестоперов, С. В. Долговечность бетона. – М.: Автотрансиздат, 1960. – 512 с.

36. Бабушкин, В. И. Термодинамика в процессах гидратации и коррозии цементов. Автореф. дис. д.т.н. 05.23.05. – Строительные материалы и изделия, 1972. – 38 с.

37. Стольников, В. В. Судаков В. Б., Морозова Г. В. О применении для морозостойких зон гидротехнических сооружений шлакопортландцементов и пуццолановых цементов. – М.: Известия ВНИИГ, 1964. – Т. 75 – С. 33.

38. Судаков, В. Б. Рациональное использование бетона в гидротехнических сооружениях. – М.: Энергия, 1976. – 241 с.

39. Шейкин, А. Е. Влияние гранулометрического состава цемента на собственные напряжения в цементном камне / А. Е. Шейкин, А. Е. Фёдоров, В. В. Синицин, К. Ф. Головина – Труды МИИТ, 1971. – Вып. 351. – С. 109–114.

40. Алексеев, С. Н., Иванов Ф. М., Модры С., Шисль П. Долговечность железобетона в агрессивных средах. – М.: Стройиздат, 1990. – 313 с.

41. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В. М. Москвин, Ф. М. Иванов, С. Н. Алексеев. – М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.
42. Иванов, Ф. М. Защита железобетонных транспортных сооружений от коррозии. – М.: Транспорт, 1968. – 175 с.
43. Иванов, Ф. М. Коррозионные процессы и стойкость бетона в агрессивных средах. – Автореф. дис. д.т.н. 08.00.05. – Строительные материалы и изделия, 1969. – 39 с.
44. Ахвердов, И. Н., Станишевская И. В. Механизм разрушения пористых материалов при насыщении их солями / ДАН БССР. – Минск, 1967. – Т. 11, № 4. – С. 320–323.
45. Ахвердов, И. Н., Станишевская И. В. Влияние вида цемента на стойкость цементного камня при насыщении растворами NaCl и KCl / ДАН БССР. – Минск, 1967. – Т. 11, № 10. – С. 893–896.
46. Путан, А. А., Барташевич А. А. Оценка кристаллизационных давлений в пористых средах методом фотоупругости // В кн. Методы исследований стойкости строительных материалов и конструкций. – Мн.: Выш. Шк., 1969. – С. 60–69.
47. Гузеев, Е. А., Савицкий Н. В. Расчет железобетонных конструкций с учетом кинетики коррозии бетону третьего вида // Сб. научн. трудов НИИЖБ; под общ. ред. С. Н. Алексеева. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1988. – С. 16–20.
48. Шалимо, М. А. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. – Мн.: Выш. Шк., 1986. – 200 с.
49. Батяновский, Э. И. Особо плотный бетон сухого формования. – Мн.: НП ООО Стринко, 2002. – С. 108–112.
50. Ахвердов, И. Н. Влияние водоцементного отношения на формирование структуры цементного камня и недостатки формул прочности бетона // Строительная промышленность, 1953, N 8. – С. 44–47.
51. Ахвердов, И. Н. Высокопрочный бетон. – М.: Госстройиздат, 1961. – 106 с.
52. Scrivener, K. L., Crumby A. K., Pratt P. L. A Study of the Interfacial Region between Cement Paste and Aggregate in Concrete // Bond. Cementitious Compos.: Symp., Boston, Mass., Dec. 2–4, 1987. – Pittsburgh (Pa), – 1988. – P. 87–88.

53. Wang Jia. Investigation of structure and properties of the Interfacial Zone between Lime Aggregate and Cement Paste // J. Chin. Silic. Soc., 1987, N 2. – P. 114–121.

54. Detwiler, R. J., Monteiro, P. J. M., Wenk Hans-Rudolf, Zhong Zengqiu. Texture of Calcium Hydroxide near the Cement Paste-Aggregate Interface // Cem. And Concr. Res., 1988, M 5. – P. 823–829.

55. Garboczi, E. J., Bentz D. P. Digital Simulation of the Aggregate-Cement Paste Interfacial Zone in Concrete // J. Mater. Res., 1991, Nsll. – P. 196–201.

56. Пособие по применению химических добавок при производстве сборных железобетонных конструкций и изделий (к СНиП 3.09.01-85) / НИИЖБ. – М.: Стройиздат, 1989. – 39 с.

57. СТБ 1112-98. Добавки для бетонов. Общие технические условия / Минстройархитектуры РБ. – Мн., 1998. – 23 с.

58. Применение добавок в бетоне. Пособие : П1-99 к СНиП 3.09.01-85 / Минстройархитектуры РБ. – Мн., 2000. – 33 с.

59. Ахвердов, И. Н., Лаврега Л. Я. Физико-механические свойства центрифугированного полимерцементного камня. – Доклады АН БССР, 1970, т. XIV, N 5. – С. 419–422.

60. Соломатов, В. И. Полимерцементные бетоны и пластбетоны. – М.: Стройиздат, 1967. – 184 с.

61. Ахвердов, И. Н., Лаврега Л. Я. Механизм твердения полимерцементного камня на водорастворимых смолах. – Доклады АН БССР, 1971, т. XV, N 10. – С. 916–919.

62. Иванов, Ф. М. Добавки в бетон и перспективы применения суперпластификаторов / Бетоны с эффективными суперпластификаторами. – М., 1979. – С. 6–21.

63. Батраков, В. Г. Применение суперпластификаторов в бетоне / В. Г. Батраков, Ф. М. Иванов, Е. С. Силина, В. Р. Феликман // Строительные материалы и изделия. Реф. Инф. (ВНИИС), вып. 2, сер. 7. – М., 1988. – 59 с.

64. Ратинов, В. Б., Розенберг Т. И. Добавки в бетон. – М.: Стройиздат, 1989. – 186 с.

65. Батраков, В. Г. Модифицированные бетоны. – М.: Стройиздат, 1990. – 400 с.



66. Фаликман, Р. В., Вайнер А. Я., Башлыков Н. Ф. Новое поколение суперпластификаторов / Бетон и железобетон. – 2000. – N 5. – С. 5–7.

67. Kitamura H., Nishizaki T., Ito H., Chikamatsu R., Kamada F., Okudate M. Construction of prestressed concrete outer tank for LNG storage using highstrength self-compacting concrete. Proceedings of the International Workshop on Self-compacting Co, 1999, p. 262–291.

68. Химические добавки для бетонов и растворов. Каталог – Кхд1 – 2007 / Блещик, Н. П. [и др.] // Минстройархитектуры РБ. – Минск: РУП Белстройцемент, 2007. – 57 с.

69. Батраков, В. Г. Повышение долговечности бетона добавками кремнийорганических полимеров. – М.: Стройиздат, 1968. – 135 с.

70. Блещик, Н. П., Протько Н. С., Рискин А. Н. Математические модели кинетики гидратации цемента. Материалы международной конференции: Инженерные проблемы современного бетона и железобетона. 17–21.11.1997. – Мн. – С. 25–36.

71. Бабицкий, В. В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона. Дис. д.т.н. Специальность: 05.23.05. – Строительные материалы и изделия. – Мн., 2005. – С. 29–89.

72. Иванов, Ф. М., Красовская Т. Г., Солнцева В. А. Влияние тепло-влажностной обработки на структуру и свойства цементных растворов // В кн.: Труды международной конференции по проблемам ускорения твердения бетона при изготовлении сборных железобетонных конструкций. М.: 1968. – 400 с.

73. Юнг, В. Н., Бутт Ю. М., Журавлёв В. Ф., Окорочков С. Д. Технология вяжущих веществ. – М.: Промстройиздат, 1952. – 600 с.

74. ТКП 45-5.03-131-2009 (02250) Монолитные бетонные и железобетонные конструкции. Правила возведения. Минстройархитектуры РБ, Минск, 2009. – 28 с.

75. Руководство по производству бетонных работ в условиях сухого жаркого климата. – М.: НииЖБ Госстроя СССР, 1977 – С. 29–38.

76. Хигерович, М. И. Улучшение свойств бетона органическими поверхностно-активными добавками. – М.: ВНИИЭСМ, 1975. – 45 с.

77. Крылов, Б. А., Чкуаселидзе Л. Г., Топильский Г. В., Рыбасов В. П. Вододисперсионные пленкообразующие составы для бетонов

в условиях сухого жаркого климата // Бетон и железобетон. – М.: 1992. – С. 15–17.

78. Фам Ван Хоан. Бетоны без защитного слоя для безрулонных кровель, эксплуатируемых в условиях влажного жаркого климата Вьетнама. Автореф. дис. к.т.н. Специальность: 05.23.05. – Строительные материалы и изделия. – М.: 1993. – 19 с.

79. Осама Мохомед Мохаммед. Бетоны с химическими добавками в условиях сухого жаркого климата. Автореф. дис. к.т.н. Специальность: 05.23.05. – Строительные материалы и изделия. – Алматы, 1994. – 17 с.

80. Топильский, Г. В. Влияние пароводонепроницаемых покрытий на процессы твердения бетона // Прикладная химия. – 1981. – N 2. – С. 374–380.

81. Мбарки Фетхи. Бетон повышенной водонепроницаемости и трещиностойкости в сухом жарком климате Туниса. Автореф. Дис. к.т.н. Специальность: 05.23.05. – Строительные материалы и изделия. – Санкт-Петербург, 2003. – 18 с.

82. Виды бетонов и их свойства. Журнал «Строитель». N 2, 2007. – С. 521, 549–551.

83. Вавренюк, С. В. Эффективные защитные цементные покрытия, модифицированные полимерами. Автореф. дис. д.т.н. Специальность: 05.23.05. – Строительные материалы и изделия. – Москва, 2006. – 38 с.

84. Трахимчик, О. Е. Повышение эксплуатационных свойств бетона обработкой растворами на основе гексафторсиликата магния. Автореф. дис. к.т.н. Специальность: 05.17.11; 05.17.01 – Бел. Гос. Технол. Ун-т. – Минск, 2006. – 19 с.

85. Дахли М. Гидрофобно-кольматирующая пропитка бетона в условиях жаркого климата. Автореф. дис. к.т.н. Специальность: 05.23.05. – Строительные материалы и изделия. Госуниверситет строительства и архитектуры. – Харьков, 1996. – 21 с.

86. Крашенинникова, Л. А. Гидратация и твердение портландцемента в присутствии функциональных добавок в составе сухих строительных смесей. Автореф. дис. к.т.н. Специальность: 05.17.11. – Санкт-Пб. гос. технолог. институт. – Спб., 1999. – 18 с.

87. CPI – Concrete Plant International = CPI – Международное бетонное производство: журнал: рус. Изд. – 2008, август, N 4. – С. 40.

88. Тёмкин, Е. С. Технология бетона для сухого жаркого климата с использованием солнечной энергии. Учеб. пособие для вузов. – Москва: АСВ, 2006. – 68 с.
89. ГОСТ 10178-85 Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия.
90. ГОСТ 310.0-5-81 Цементы. Методы испытаний.
91. ГОСТ 8267-93 Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия.
92. ГОСТ 8269-87 Щебень из природного камня. Гравий и щебень из гравия для строительных работ. Методы испытаний.
93. ГОСТ 8736-93 Песок для строительных работ. Технические условия.
94. ГОСТ 8735-88 Песок для строительных работ. Методы испытаний.
95. СТБ 1114-98 Вода для бетонов и растворов. Технические условия.
96. ГОСТ 30459-96 Добавки для бетонов. Методы определения эффективности.
97. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
98. ГОСТ 18105-2010 Бетоны. Правила контроля прочности.
99. ГОСТ 12730.0-5-84 Бетоны. Методы определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости.
100. ГОСТ 16060-95 Бетоны. Методы определения морозостойкости.
101. ГОСТ 13087-81 Бетоны. Методы определения истираемости.
102. СТБ 1168-99 Бетоны. Метод контроля коррозионного состояния стальной арматуры в бетоне и защитных свойств бетона.
103. Лещинский, М. Ю. Испытания бетона. Справочное пособие. – М.: Стройиздат, 1980. – 360 с.
104. Ахвердов, И. Н., Ицкович С. М. Исследование метода испытания бетона на растяжение посредством раскалывания образцов // Бетон и железобетон. – 1961, N 1. – С. 19–23.
105. Лейбензон, Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. – М. – Л.: Гостехиздат, 1947. – С. 11–73.
106. Коллинз Р. Течение жидкостей через пористые материалы. – М.: Мир, 1964. – С. 68–104.

107. Полубаринова-Кончина, П. Я. Теория движения грунтовых вод. – М.: Наука, 1977. – С. 17–88.

108. Щелкачев, В. И., Лацук Б. Б. Подземная гидравлика. – М. – Л.: Гостехиздат, 1949. – С. 50–89.

109. Аравин, В. И. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой среде. – М.: Гостехиздат, 1953. – С. 11–80.

110. Чарный, И. А. Основы подземной гидравлики. – М. – Л.: Гостехиздат, 1956. – 260 с.

111. Батяновский, Э. И. Основы технологии изготовления бетонных и железобетонных изделий и конструкций с применением сухих бетонных смесей. Диссертаций доктора технических наук. Специальность 05.23:05. Бел. нац. технич. ун-т. – Минск, 2002. – 351 с.

112. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.

113. Блещик, Н. Н. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и пресс-вакуум-бетона. – Минск.: Наука и техника, 1977. – 230 с.

114. Барташевич, А. Я. Исследование структурно-технический свойств бетонной смеси, уплотненной прессованием и вакуумированием. Автореф. дис. к.т.н. Специальность: 05.23.05. – Строительные материалы и изделия. ИСиА Госстроя БССР. – Минск, 1973. – 37 с.

115. Скрамтаев, Б. Г. Достижения технологии бетона в СССР и дальнейшие задачи / Труды IV Всесоюзной конференции по бетону и железобетонным конструкциям. Ч. III. Усовершенствование технологии бетона. Гос. из-во. строит. лит. – М.–Л.: 1949. – С. 25.

116. Шестоперов, С. В. Долговечность бетона. – М.: Автотранспорт, 1955. – 480 с.

117. Эгбалник, С. М. Теоретические аспекты первичной защиты твердеющего бетона / С. М. Эгбалник, Э. И. Батяновский, В. И. Коваженкова // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров РБ: сб. тр. XVI Междунар. науч.-метод. семинара: в 2 ч. / под общ. ред. П. С. Пейты, В. В. Тура. – Брест: БрГУ, 2009. – С. 25–29.

118. Эгбалник, С. М. Первичная защита твердеющего бетона путем уплотнения структуры его поверхностного слоя / С. М. Эгбалник, Э. И. Батяновский, В. И. Коваженкова // Проблемы современ-

ного бетона и железобетона: Материалы II Международного симпозиума: в 2 т. / под общ. ред. М. Ф. Марковского. – Минск, 2009. – Т. 1. – С. 403–411.

119. Кузьменков, М. И., Трахимчик О. Е., Марковка Д. М. Эффективный химический препарат «Сифтом» для повышения долговечности бетона / Технологии бетона. – 2006. – N 1. – С. 62–64.

120. Кузьменков, М. И., Трахимчик О. Е. Флюат для антикоррозионной защиты бетона / Белорусско-польский научно-практический семинар: Тез. докл., Брест, 9–11 октября 2002 г. / Белорусский институт системного анализа и информационного обеспечения научно-технической сферы. – Брест, 2002. – С. 213.

121. Kuzmenkov M. I., Trakhimchik O. E. Fluats based on fluosilicates of double-valence metals for anticorrosion protection of concrete // 15 Internationale Baustofftagung, 24–27 September 2003. – P. 1013–1016.

122. Ворошнин, Л. Г., Шматов А. А., Хина Б. Б., Башлок С. Д. Многокомпонентные диффузионные карбидные покрытия на железоуглеродистых сплавах. – Минск: БНТУ, 2007. – 468 с.

123. Эгбалник, С. М. Защита твердеющего бетона уплотняющими структуру составами / С. М. Эгбалник, Э. И. Батяновский, В. И. Коваженкова, А. А. Шматов // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров РБ: сб. науч. статей. – Гродно: ГрГУ, 2010. – С. 375–380.

124. Эгбалник, С. М. Методы, приемы и режимы ухода за бетоном в процессе твердения / С. М. Эгбалник, Э. И. Батяновский // Повышение качества подготовки студентов специальности Промышленное и гражданское строительство: сб. науч. статей науч.-метод. семинара. – Минск, 2011. – С. 230–242.

125. Eghbalnik, S. M. Primary protection of hardening concrete by substances consolidating the structure (Доклад на конференции молодых ученых: European and national dimension in research). – Новополоцк: 2011. – Полоцкий государственный университет. Ч. 3. – С. 96–100.

126. Миронов, С. А. Эффективность зимнего бетонирования. – М.: Стройиздат, 1975. – 700 с.

127. Лысов, В. П. Эффективность бетонных работ в строительстве. – Минск: Беларусь, 1982. – 92 с.

128. Батяновский, Э. И. Технология и методы зимнего монолитного бетонирования: учебное пособие / Э. И. Батяновский, Н. М. Голубев, В. В. Бабицкий, М. Ф. Марковский. – Мн.: БНТУ, 2005. – 233 с.

129. СТБ 1544-2005 Бетоны конструкционные тяжелые. Технические условия.

130. СТБ-ЕН 206-1-2015 Бетон. Часть 1. Требования, показатели, изготовление и соответствие.

131. Эгбалник, С. М. Проблемы и эффективность ухода за бетоном защитными составами / С. М. Эгбалник, Э. И. Батяновский // Проблемы современного бетона и железобетона: Материалы III Международного симпозиума: в 2 т. / под общ. ред. М. Ф. Марковского. – Минск, 2011. – С. 503–514.

132. Рояк, С. М., Рояк Г. С. Специальные цементы. – М.: Стройиздат, 1969. – 278 с.

133. Сычев, Н. М. Твердение вяжущих веществ. – Л.: Стройиздат, 1974. – 80 с.

134. Волженский, А. В. Минеральные вяжущие вещества: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1986. – 464 с.

135. Протько, Н. С. Беспрогревная и малоэнергоёмкая технология производства бетонных и железобетонных изделий с применением полиметаллического водного концентрата. Автореф. дис. к.т.н: 05.23.05 / Белорусская государственная политехническая академия. – Минск, 2001. – 20 с.

136. Эгбалник, С. М. Основные положения технологии первичной защиты твердеющего бетона уплотняющим составом / С. М. Эгбалник, Э. И. Батяновский // Строительная наука и техника. – Минск, 2012. – № 2 (41). – С. 72–80.

137. Эгбалник, С. М. Теоретико-практические аспекты ухода за твердеющим цементным бетоном / С. М. Эгбалник, Э. И. Батяновский // Наука и техника. – Минск, 2013. – № 3. – С. 22–27.

138. БНБ 5.03.01–02 Бетонные и железобетонные конструкции.

139. ГОСТ 24544 – 81\* Бетоны. Методы определения деформации усадки и ползучести.

140. Справочник по растворимости. – Москва – Ленинград: изд. АН СССР, 1961. – Т. 1. – 298 с.

141. Справочник химика. – Ленинград: Химия, 1971. – 776 с.
142. Новый справочник химика и технолога / под ред. Бибик Е. Б. и др. – Санкт-Петербург, 2006. – 1463 с.
143. Лидин, Р. А. Справочник по общей и неорганической химии. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: КолосС, 2008. – 350 с.
144. Эгбалник, С. М. Теоретические основы фильтрационно-диффузионной защиты поверхности твердеющего бетона / С. М. Эгбалник, Э. И. Батяновский // Строительная наука и техника. – Минск, 2011. – № 6 (39). – С. 9–13.
145. Эгбалник, С. М. Технология и эффективность защиты твердеющего бетона веществом сульфоалюмината / С. М. Эгбалник, Э. И. Батяновский // Строительная наука и техника. – Минск, 2013. – № 1 (42). – С. 14–21.
146. Защитный состав для ухода за твердеющим бетоном: Патент Республики Беларусь 19821 (BY 19821 C1) / Э. И. Батяновский, С. М. Эгбалник. – Опубл. 28.02.2016.

Научное издание

**БАТЯНОВСКИЙ** Эдуард Иванович  
**ЭГБАЛНИК** Саназ Мохаммад

**ПЕРВИЧНАЯ ЗАЩИТА  
ТВЕРДЕЮЩЕГО БЕТОНА**

Подписано в печать 04.04.2024. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 8,84. Уч.-изд. л. 6,9. Тираж 50. Заказ 488.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных  
изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.