

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Архитектурно-строительный институт

(наименование института полностью)

Центр архитектурных, конструктивных решений и организации строительства

(наименование)

08.04.01 «Строительство»

(код и наименование направления подготовки)

Техническая эксплуатация и реконструкция зданий и сооружений

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Экспериментальная оценка длительного набора прочности
бетона

Студент

Е.А. Ровенская

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

к.т.н., доцент, Д.С. Тошин

руководитель

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2020

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1 Существующие условия набора прочности бетона.....	7
1.1 Основные понятия о прочности бетона.....	7
1.2 Нормальные условия набора прочности бетона.....	10
1.3 Другие факторы набора и снижения прочности бетона.....	11
1.4 Уход за бетоном и набор прочности в различных условиях твердения.....	19
Глава 2 Определение прочности бетона в сериях с длительным набором прочности.....	29
2.1 Технология определения прочности бетона по контрольным образцам-кубам.....	29
2.2 Изготовление партии бетонных образцов.....	42
2.3 Определение прочности бетона в сериях через 6 месяцев после изготовления.....	44
2.3.1 Подготовка к испытаниям №1.....	44
2.3.2 Проведение испытаний №1.....	47
2.3.3 Обработка и оценка результатов испытаний №1.....	49
2.4 Определение прочности бетона в сериях через 12 месяцев после изготовления.....	52
2.4.1 Подготовка к испытаниям №2.....	52
2.4.2 Проведение испытаний №2.....	53
2.4.3 Обработка и оценка результатов испытаний №2.....	54
Глава 3 Сравнение результатов оценки серий образцов.....	58
Заключение.....	67
Список используемой литературы и используемых источников.....	68

Введение

Актуальность работы. Известно, что процесс набора прочности бетона носит длительный характер, а интенсивность набора прочности зависит от условий хранения. При этом опыт монолитного строительства показывает, что условия набора прочности бетона в конструкции может существенно отличаться от условий хранения контрольных образцов-кубов, особенно в условиях зимнего бетонирования. В итоге прочность бетона, полученная в образцах, в большинстве случаев считается достигнутой в конструкции, что часто не соответствует действительности, при этом носит массовый характер. Совершенствование технологии контроля качества бетона, а также выявление закономерностей длительного набора прочности в условиях строительной площадки является актуальной задачей современного строительства.

Объектом исследования является тяжелый бетон.

Предметом исследования является прочность бетона при длительном наборе.

Цель диссертационной работы заключается в экспериментальной оценке длительного набора прочности тяжелого бетона в благоприятных условиях твердения и условиях, приближенных к строительной площадке.

Гипотеза исследования состоит в том, что бетон конструкций способен годами набирать прочность, если:

- ему создать благоприятные условия твердения;
- осуществлять уход за ним.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Провести анализ существующих условий набора прочности бетона и ухода за ним.
2. Изготовить партию бетонных образцов.

3. Определить прочности бетона в сериях с длительным хранением в благоприятных условиях.
4. Определить прочности бетона в сериях с длительным хранением в условиях условной строительной площадки.
5. Сравнить результаты оценки серий образцов.

Методы исследования – анализ, синтез, индукция, дедукция, факторный синтез, моделирование, прогнозирование, наблюдение, измерение, сравнение, эксперимент.

Научная новизна исследований заключается в определении прочности бетона при длительном твердении, в том числе в естественных природно-климатических условиях г. Тольятти, отличных от благоприятных.

Нормативные документы позволяют контролировать набор проектной прочности бетона в возрасте, отличном от 28 суток, в зависимости от фактических сроков загрузки конструкции. При этом подобная практика не получила распространения в РФ в связи с недостаточностью экспериментальных данных. Полученные в работе экспериментальные данные направлены на развитие методологии оценки качества бетона при длительном наборе прочности в переменчивых условиях внешней среды, свойственных монолитному строительству.

Практическая значимость заключается в возможности учета выявленных закономерностей длительного набора прочности бетона в условиях переменчивости внешней среды с целью прогнозирования прочности бетона к конкретному сроку, что в конечном итоге способствует экономии ресурсов без снижения надежности железобетонных конструкций.

Полученный материал обладает бесценной практической значимостью для случаев «недобора» прочности монолитного бетона к возрасту 28 суток.

Достоверность результатов исследования обеспечивается проведением стандартных испытаний по определению прочности бетона на образцах-кубах в соответствии с требованиями нормативных документов.

Получена близкая сходимость экспериментальных данных с теоретическими расчетами и нормативными кривыми набора прочности бетона.

Личный вклад автора в исследование. На момент всего времени длительного эксперимента осуществлялся уход за образцами-кубами, хранящимися в благоприятных условиях твердения: поддержание требуемой влажности и температуры. Соответствующие замеры и контроль проводились два раза в день. При необходимости осуществлялось дополнительное увлажнение мест их хранения, температура оставалась неизменна.

Был проведен поиск, сбор и обработка информации о ежедневной погоде в г. Тольятти на момент проведения эксперимента. Результаты заносились в удобный графический вид.

Апробация результатов исследования.

Возвращаясь к вопросу значимости данного исследования, были приведены расчеты, в которых оценивалось влияние роста прочности бетона на несущую способность железобетонных элементов. Статья «К вопросу оценки влияния прочности бетона на несущую способность железобетонных элементов» была представлена на Международной научно-практической конференции «Молодой исследователь: вызовы и перспективы» (г. Москва, в 2019 г.).

Основные результаты проделанной работы были представлены на 4-ой Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров «Проектирование и строительство» (г. Курск, ЮЗГУ, 2020 г.) Статья «Закономерности длительного набора прочности бетона в зависимости от условий хранения» опубликована с регистрацией в РИНЦ. Так же результаты были представлены в Журнале «Академический вестник УралНИИпроект РААСН». Статья «Влияние условий длительного твердения на прочность тяжелого бетона» принята к публикации в издании, рекомендованном ВАК. Статья «Закономерности длительного набора прочности бетона в зависимости от условий хранения»

была представлена на научно-практической конференции «Студенческие Дни науки в ТГУ» (2020 г.).

Степень разработанности темы. Данная тема мало изучена в силу достаточной длительности и трудоемкости проведения экспериментов.

На защиту выносятся:

– анализ и сопоставление результатов численных и экспериментальных исследований по набору прочности бетона;

– теоретические и практические зависимости роста прочности от внешних условий твердения бетона.

Объем и структура магистерской диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, 3-х глав, заключения, содержит 27 рисунков, 13 таблиц, список использованной литературы (31 источник). Общий объем работы 71 страница машинописного текста.

Глава 1 Существующие условия набора прочности бетона

1.1 Основные понятия о прочности бетона

Бетон – это искусственный каменный материал, который получается вследствие твердения бетонной смеси, которая состоит из вяжущего, воды, заполнителя и каких-либо добавок.

Бетонная смесь – сложная многокомпонентная система, полученная в результате затворения водой цемента и заполнителя.

Прочность – способность материала сопротивляться разрушению под действием внешних воздействий.

Факторы, влияющие на прочность бетона:

– состав исходных материалов (активность цемента и его содержание, качество заполнителей, массовое отношение воды к цементу – В/Ц);

– технология производства (качество перемешивания и степень уплотнения бетонной смеси, возраст и условия твердения бетона, повторное вибрирование);

– воздействия со стороны окружающей среды;

– дальнейшие нагрузки и силовые воздействия.

От активности цементного камня прямо зависит прочность бетона, бетоны оказываются значительно прочнее на более активных цементах:

$$R_b = f(R_{ц}) \quad (1)$$

При увеличении содержания цемента в бетоне происходит рост прочности, но до некоторого предела. После этого рост прочности идет незначительно, но другие его свойства ухудшаются - происходит увеличение усадки и ползучести.

Важно, чтобы песок не имел примесей глины, из-за того, что она ухудшает его свойства [1]. Для большей прочности в тяжелых бетонах используют крупнозерновой песок. Еще одним ключевым показателем класса бетона является крупный заполнитель – гранит. Гранитный щебень обладает меньшей гладкостью, в отличие от щебня, то он обеспечивает лучшую адгезию вяжущего и заполнителей, что придает бетону большую прочность.

Прочность бетона прямо зависит от водоцементного соотношения. В твердении бетона принимает участие лишь 15 %-25 % воды. Для того, чтобы смесь была удобоукладываема, обычно вводят 40 %-70 % воды (В/Ц = 0,4..0,7). Она не должна содержать химических соединений и примесей, которые могут повлиять на сроки схватывания цемента и дальнейшую прочность бетона[2].

Большое влияние оказывает уплотнение бетонной смеси. При недостатке уплотнения происходит резкое уменьшение прочности бетона, ухудшение долговечности и других свойств. Но и длительное вибрирование заметно не повышает плотность и прочность бетона, а даже наоборот, способно вызвать расслоение смеси.

Повторное вибрирование способно вызвать увеличение прочности бетона до 20 %, при условии выполнения его до конца схватывания цемента [3].

В процессе схватывания бетонной смеси и последующего твердения бетона происходит формирование его структуры (таблица 1).

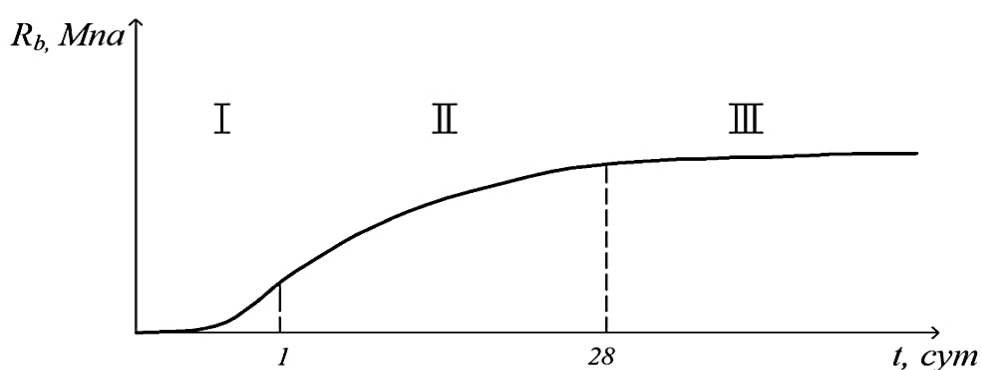
Таблица 1 – Процесс формирования структуры бетона на различных стадиях гидратации цементного камня

Период гидратации	Время после смешивания	Процесс
1	2	3
I	0-1 час	Происходит образование пересыщенного раствора гидроксида кальция в результате гидролиза трехкальцевого силиката, осаждение первых новообразований гидроксида кальция.

Продолжение таблицы 1

1	2	3
II – скрытая гидратация	1-6 часов	В процессе гидратации участвуют поверхностные слои цементных зерен.
	7-24 часа	Происходит поглощение поверхностными оболочками цементных зерен воды, снижение подвижности бетонной смеси. Внутренние слои цементных зерен, реагируя с водой, стремятся расширяться, в результате чего облегчается доступ воды вглубь зерна. Образуется первоначальный каркас из первичных продуктов гидратации цемента.
III	1-28 дней	1. Интенсивная кристаллизация гидроксида кальция из раствора. Образование длинных волокон через поры, дробление пор, что усиливает сцепление между гидратными формами и зёрнами цемента. Образование цементного камня. 2. Уплотнение структуры в результате образования гидратных форм в порах. Размер пор уменьшается, прочность структуры увеличивается, при этом в полностью гидратированном цементе всегда остаются внутренние пустоты, называемые порами геля. Размер этих пустот от $15 \cdot 10^{-8}$ до $40 \cdot 10^{-8}$ м, поэтому в них не возможно возникновение новообразований. Если пористость геля превышает значение 28 %, то могут образовываться новообразования, которые будут снижать пористость.

Наглядно стадии формирования структуры бетона и рост его прочности можно рассмотреть на рисунке 1.



I – формирование первоначальной структуры, II – упрочнение структуры, III – стабилизация

Рисунок 1 – Стадии формирования структуры бетона

Различают следующие типы структуры бетона:

- прочность матрицы (цементно-песчаного камня), R_1 ,
- прочность заполнителя, R_2 ,
- прочность бетона, R_b .

1.2 Нормальные условия набора прочности бетона

Нормальными условиями твердения бетона принято считать температуру $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ и относительную влажность воздуха $(95 \pm 5)\%$, обеспечиваемые, как правило, в лабораторных условиях.

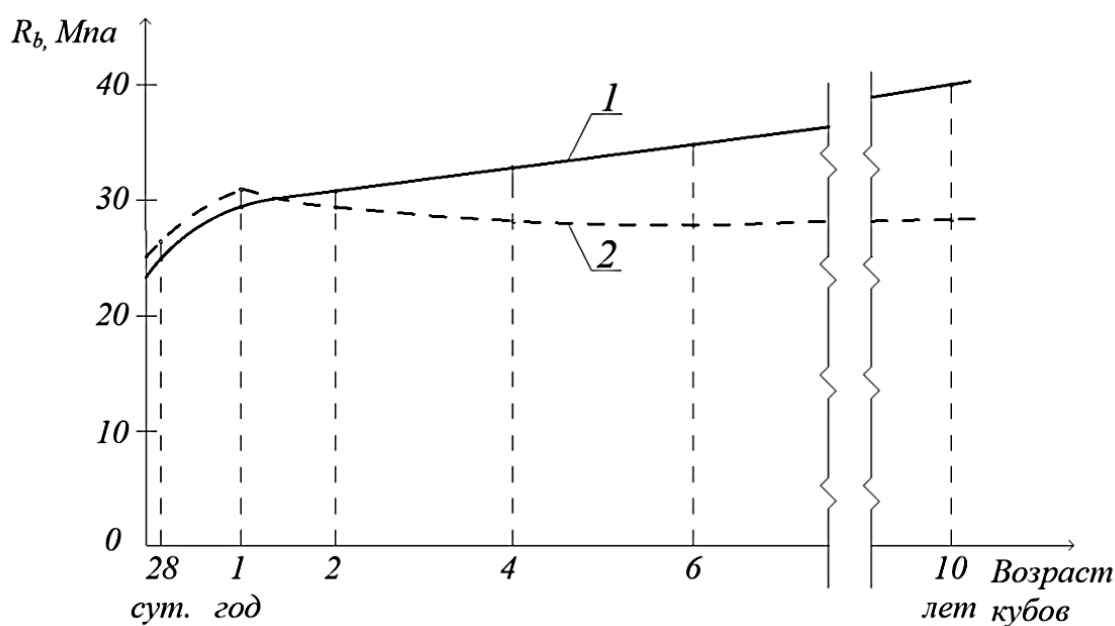
Особенно важно соблюдать эти условия в первые (10-15) суток затвердевания, так как именно в этот период у бетона происходит самый интенсивный набор прочности. При выдерживании бетона в нормальных условиях твердения, за первые 7 суток он способен набрать до 75 % прочности от значения, ожидаемого на 28 суток. Это значение считается безопасной прочностью бетона, с точки зрения продолжения строительства зданий и сооружений.

Другими словами, при благоприятных и нормальных условиях твердения рост прочности бетона идет длительное время и изменяется по логарифмической зависимости:

$$R_n = R_{28} \left(\frac{\lg n}{\lg 28} \right), \text{ МПа} \quad (2)$$

где R_n и R_{28} – предел прочности бетона через n и 28 суток, МПа;
 $\lg n$ и $\lg 28$ – десятичные логарифмы возраста бетона, сут.

При благоприятных и нормальных условиях прочность бетона способна расти достаточно долгое время. Важно, что если при достаточной положительной температуре выдерживания будет отмечаться недостаток влажности, то прочность такого бетона не будет расти по логарифмической зависимости (рисунок 2).



1 – при хранении кубов в нормальных условиях, 2 – при хранении кубов в сухой среде (относительная влажность до 40 %)

Рисунок 2 – Длительное нарастание прочности бетона

Несмотря на большой рост прочности бетона в сухой среде в первое время, конечное его значение ниже, чем у того же бетона хранящегося в нормальных условиях твердения [4].

1.3 Другие факторы набора и снижения прочности

Цемент в составе бетонов

Активная часть бетона – вяжущее (цемент), которое реагируя с H_2O , обладает способностью схватывания и твердения, переходя из пластичновязкого состояния в твердое и превращая бетонную смесь в бетон – ИСК (искусственно строительный конгломерат).

В процессе затвердевания бетон дает усадку (при недостатке влаги), в результате чего изменяется его объем.

Из-за того, что усадка происходит быстрее на поверхности, то здесь могут быть обнаружены усадочные трещины. Так же эти мелкие трещины,

снижающие качество и прочность бетонной конструкции, могут быть вызваны неравномерным прогревом в результате выделения тепла при схватывании цементного камня.

Усадочные трещины могут послужить причиной начала коррозии бетона и снижением его морозостойкости.

Усадка прямо зависит от количества цементного теста. В среднем для тяжёлого бетона значение усадки составляет (0,3-0,4) мм/м. Заполнитель создает в бетоне жесткий скелет, воспринимает усадочные напряжения и уменьшает усадку обычного бетона примерно в 10 раз по сравнению с усадкой цементного камня.

Нарастание прочности заметно различается для бетонов на разных ПЩ. Как можно видеть по таблице 2, по мере увеличения исходной прочности – интенсивность роста уменьшается.

Таблица 2 – Коэффициенты нарастания прочности бетона на ПЩ различного минералогического состава

Возраст бетонов на цементах	Белитовый		Алитовый		Алюминатный	
	Исходная прочность, МПа					
	12	15	21	30	34	47.5
1 мес.	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
3 мес.	1,5	1,3	1,3	1,3	1,1	1,1
1 год	2,0	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3
3 года	2,5	1,9	1,8	1,8	1,6	1,6
5 лет	2,7	2,0	1,9	1,9	1,6	1,7
10 лет	2,7	2,2	2,0	2,0	–	–
20 лет	3,0	–	2,0	2,1	–	–
30 лет	3,3	–	–	–	–	–

Перепад температур

Способность бетона противостоять многократному изменению температуры является очень важной его особенностью. Серьезные внутренние напряжения могут развиваться в бетоне вследствие перепада

температур, если значения коэффициентов температурного расширения заполнителей и цементного камня имеют значительную разницу. Для заполнителей бетонных смесей используют природные горные породы, значение коэффициента линейного расширения которых меньше, чем тот же коэффициент у цементного камня. Это в свою очередь приводит к тому, что из-за нагрева бетона, в нем возникают растягивающие напряжения у заполнителей и сжимающие у цементного камня. Такое напряженное состояние в структуре бетона ведет к тому, что происходит нарушение сцепления заполнителей и цемента. [5]. Но для таких бетонов опасен и обратный случай – его охлаждение. В таком случае растягивающие напряжения возникают в цементном камне и сжимающие в заполнителе. Такой случай возможен, когда проводится пропарка готовых бетонных изделий – здесь температура в структуре бетона значительно ниже температуры эксплуатации. Более опасные структурные напряжения возникают у бетонов, которые применяются в тепловых агрегатах и печах. В этом случае должны применяться жаростойкие бетоны, которые в своей структуре имеют специальные заполнители.

В процессе эксплуатации бетона могут происходить различные колебания температур (в том числе многократные и знакопеременные), в таких случаях его целостная структура может расшатываться, будут образовываться трещины. Особое внимание уделяется заполнителям с ориентированным расположением кристаллов. Таковым заполнителем, например, является гранит, чьи кристаллы полевого шпата ортоклаза способны расширяться только в направлении параллельном кристаллографической оси [6].

От замерзания в зимнее время года твердеющий бетон следует предохранять от замерзания, к примеру, методом термоса (бетон подогревается электропрогревом и укрывается теплоизоляцией).

Ускоренный набор прочности бетона наблюдается при более высоких температурах и замедленный – при ее понижении. При отрицательной

температуре твердение практически прекращается (если не ввести в состав бетона некоторые химические добавки).

Так же температура влияет и на сроки схватывания бетонной смеси. Если в нормальных условиях процесс схватывания занимает несколько часов, то при нулевой температуре этот процесс может продолжаться до 20 часов.

Например, на заводах сборного железобетона производят ускорение отвердевания бетона путем тепловлажностной обработки – при постоянной влажности бетон прогревается паром, температура которого достигает 85 °С-90 °С [7]. В таком случае время твердения ЖБИ сокращается до (10-16) ч (с набором 70 %-80 % марочной прочности). Однако конечная прочность будет ниже, чем при твердении в нормальных условиях (рисунок 3).

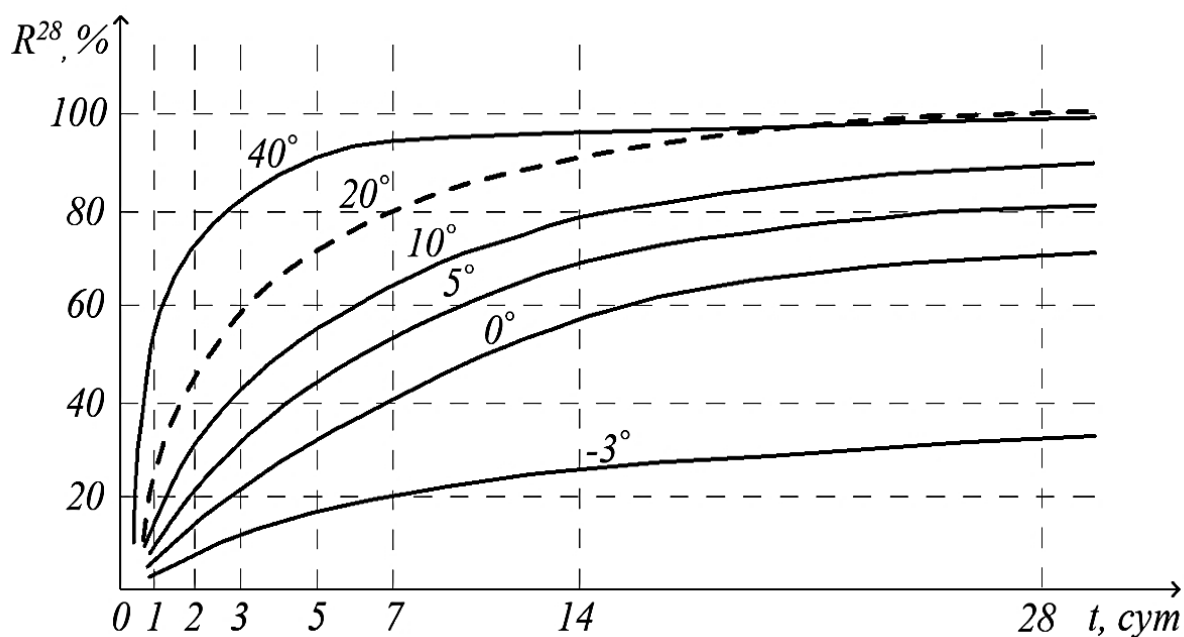


Рисунок 3 – Кривые нарастания прочности бетона в зависимости от температуры и времени

По мере снижения температуры окружающей среды, будет замедляться и твердение бетона, поскольку оно обусловлено процессами гидратации и тепловыделения цементом. В случае дальнейшего понижения температуры

ниже 0 °С, гидратация будет замедляться и практически прекратится при температуре ниже минус 10 °С (рисунок 4).

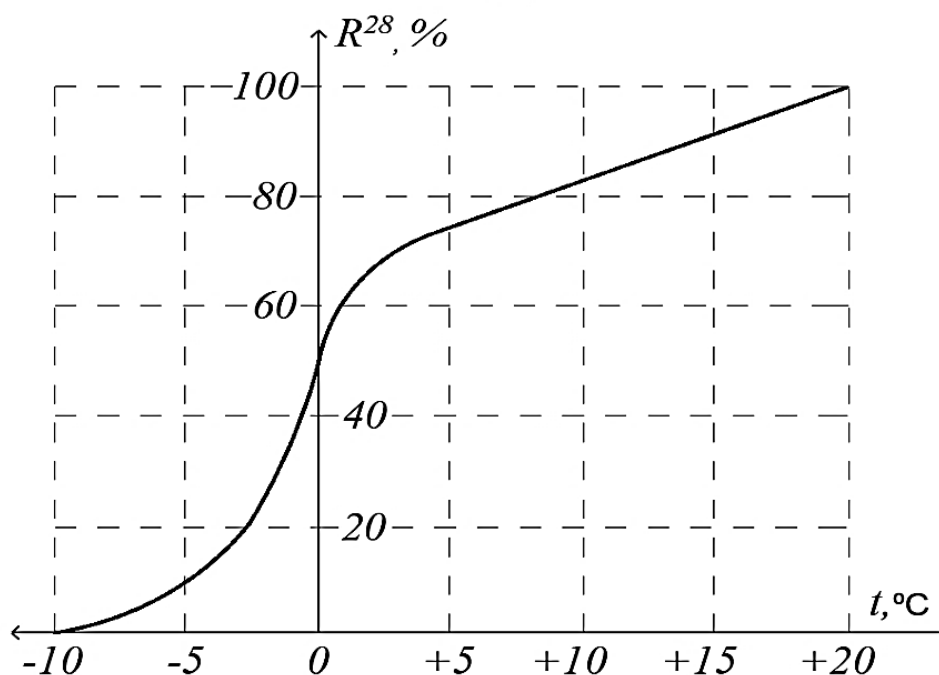


Рисунок 4 – Нарастание прочности свежеизготовленного бетона в течение первых 28 суток при температурах от -10 °С до +20 °С

Вода в структуре бетона

Давление в структуре бетона оказывает сильное механическое воздействие на состояние воды в ней. Можно сказать, что вода является, пожалуй, единственным веществом в природе, которое изменяет свою структуру, свойства и форму при воздействии на нее. Такое воздействие могут создавать внешние давления и температуры, электромагнитные поля, которые создаются заряженными атомами поверхности материала. Та нагрузка, которая прикладывается на бетон, оказывает влияние на все его составляющие: цементный камень, заполнители, объемную фазовую воду. Тогда некоторая часть воды в структуре бетона преобразуется в тонкие пленки, которые не замерзают и приобретают некоторые армирующие свойства. К слову, ученый-естествоиспытатель В.И. Вернадский представлял

все существующие горные породы губками, образованными пленочной водой, с ячейками из минеральных веществ. Если развить эту идею, то можно представить бетон, как каркас пленочной воды с наполнителем. Иными словами, незамерзающая вода выступает на поверхность бетона в виде тонкой пленки.

Одно из важных свойств бетона – его способность противостоять многократно повторяющимся процессам увлажнения и высушивания, которые могут быть причиной разбухания и усадки цементного камня в его составе (последствия которой были рассмотрены выше) [8].

На воздухе вода из бетона постепенно испаряется, поэтому процесс твердения будет постепенно замедляться, тогда чтобы поверхность бетона не пересыхала, ее укрывают брезентом, опилками или песком и увлажняют. Полимерная пленка так же служит эффективной защитой от испарения влаги с бетона.

Обратный процесс усадке – это набухание бетона (перенасыщение его водой), например от дождя. Если перед бетонированием существует вероятность осадков, то рекомендуется произвести защитные мероприятия, например, приготовить пленку или поставить навес (пленка может замедлить твердение отсутствием доступа воздуха). Если же после заливки прошло пару часов – вреда не будет.

Кристаллизация соли

Если раствор соли проникает в микроструктуру, а затем вода удаляется либо замораживанием, либо испарением, то оставшиеся соли могут кристаллизоваться и расширяться в зависимости от химического состава соли.

Влага также является причиной кристаллизации соли, тогда часть бетонного элемента может быть повреждена, потому что соляные растворы транспортируются вверх капиллярным действием, испаряются над поверхностью, оставляя соли.

При постоянном воздействии на бетон и железобетон, имеющих открытую испаряющую поверхность, минерализованных растворов в порах бетона накапливаются и кристаллизуются соли. В дальнейшем они переходят из безводной или маловодной формы в кристаллогидраты с высоким содержанием воды и увеличением объема, что создает значительное кристаллизационное давление, что может послужить дальнейшему разрушению бетонов.

Перегрузка и усталость

Любой перегруженный конструкционный материал, скорее всего, выйдет из строя. Также много материалов, которые повторно нагружаются в значительной степени от их предела текучести (или усталости), накапливают повреждения, что окончательно приводит к разрушениям.

Усталость – это рост повреждения или растрескивания вследствие циклической нагрузки. Как правило, любые нагрузки, составляющие более 50% от предела прочности материала, вызывают микро растрескивание, которое может развиваться с каждым циклом, в конечном итоге объединять макротрещины, приводящие к разрушению. Естественно, если такое происходит, о наборе прочности говорить не приходится.

Коррозия

В большинстве случаев на конструкции, сооружения, здания из бетона и железобетона в процессе эксплуатации одновременно с силовыми нагрузками действуют коррозионные факторы, которые через какое-то время приводят к заметному снижению прочности и в итоге к полному разрушению конструкции.

Коррозия перечисленных материалов протекает по разным механизмам. При наличии агрессивной внешней среды по отношению к бетону задача обеспечения долговечности сооружения и набора прочности бетона решается путём выбора соответствующих компонентов смеси, типа конструкции, защитой поверхности сооружения. Обязательным при этом является знание характера и степени агрессивности внешней среды, а также

условий её взаимодействия с бетоном. Основным процессом, приводящим к разрушению бетона, является реакция взаимодействия щелочей цемента с заполнителями, содержащими реакционноспособный кремнезём. Эта реакция протекает внутри тела бетона, в контактных слоях у поверхности зёрен заполнителя. Эту реакцию нельзя приостановить или замедлить, так как обычные способы защиты поверхности бетона не в состоянии повлиять на ход этой коррозионной реакции, протекающей в контактных слоях внутри бетона. Например, высокая эксплуатационная надёжность, долговечность и прочность таких ответственных сооружений, как мосты, тоннели, гидротехнические сооружения, дорожные и аэродромные покрытия, выполненные в бетоне и железобетоне, требуют исключительного внимания к выбору заполнителей бетона и составу цемента. Механизм щёлочесиликатных реакций изучен недостаточно, что не позволяет рекомендовать для всех случаев меры, обеспечивающие долговечность бетона и его дальнейший набор прочности.

Газовоздушная среда

Газовые среды включают различные газы естественного происхождения в земной атмосфере и антропогенного происхождения, образовавшиеся в результате деятельности человека. Газовая коррозия бетона встречается часто и не менее опасна, чем коррозия в агрессивных иных средах.

Необходимые условия агрессивного действия кислых газов (CO_2 , SO_2 , NO_2 и др.) на бетон – повышенная влажность атмосферы и соответствующая равновесная влажность бетона, а также образование конденсата на поверхности или в толще бетона. Нижняя граница относительной влажности, при которой взаимодействие кислых газов с бетоном практически не протекает, соответствует 40 %-45 %. Механизм действия на бетон SO_2 и других кислых газов состоит в первоначальной нейтрализации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ проникающими через поры бетона газами. В зависимости от типа газа образуются нерастворимые соединения CaCO_3 , CaSO_4 , $2\text{H}_2\text{O}$ или

растворимые соли типа $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ и другие. Затем перечисленные газы вступают во взаимодействие с гидросиликатами кальция (ГСК) и другими гидратированными минералами. Бетон на основе пуццоланового цемента более стоек, чем обычный ПЦ. Степень агрессивного воздействия сред на конструкции из бетона и железобетона оценивают в соответствии со СП 28.13330.2012 [9].

Требуется применять меры защиты для бетонов от коррозии так как ее развитие косвенно ведет к уменьшению набора прочности бетонов и даже к разрушению конструкций.

Анализ явлений, лежащих в основе процессов разрушения бетонов и железобетонов в агрессивных средах показывает, что наряду с чисто химическими и физико-химическими факторами большое значение имеют и физические факторы. В большинстве случаев внутренние напряжения в бетоне, приводящие к его разрушению, возникают за счёт вторичных процессов, связанных с кристаллизационным давлением или с набуханием и усадкой «геля» цементного камня.

1.4 Уход за бетоном и набор прочности в различных условиях твердения

Твердение бетона в сухих и жарких условиях

Основные физико-механические свойства бетона формируются во время начала структурообразования бетонной смеси. Они определяют дальнейшую прочность возводимых конструкций, зданий или сооружений. Эти физико-механические процессы будут происходить с ускоренной скоростью если будут происходить в сухих и жарких условиях.

Например, при температуре наружного воздуха более $25\text{ }^\circ\text{C}$ и влажности до 50 % у только что уложенной бетонной смеси высока

вероятность интенсивного обезвоживания и начальной усадки, так же может произойти неравномерность температурного поля.

Если бетон оставить без должного ухода в таких условиях, то к возрасту 28 суток его прочность на сжатие не будет достигать и 50 % от R_{28} . В этом случае могут развиваться деструктивные процессы на глубину до 30 см. Поэтому, чтобы снизить рост деструктивных процессов и довести бетон до требуемой прочности – обязательно требуется осуществлять уход за ним.

Влияние солнечной радиации и ветра на твердеющий бетон

Для свежееуложенного бетона важно уменьшить влияние или совсем исключить солнечную радиацию и ветер. Ухаживать за бетоном или создавать благоприятные условия его твердения – значит укрыть влагоемким покрытием (например, светлая полимерная пленка) и систематически увлажнять поверхность бетона. Как вариант, можно наносить пленкообразующие составы, но только на те поверхности, которые не будут в дальнейшем контактировать с бетоном или раствором. Тепловая обработка используется для ускорения набора прочности бетона.

Уход за твердеющим бетоном подразделяют на два периода. При начальном уходе, который длится от 1 до 3 ч. после укладки бетонной смеси, бетон закрывают от солнечной радиации и влияния ветра. Для этого используют увлажненные влагонепроницаемые пленки или брезент, или влагоемкую мешковину. В первом периоде прямого контакта воды и бетона быть не должно. Второй период ухода за бетоном заключается в создании максимально благоприятных условий твердения бетона. Такие благоприятные условия могут быть созданы следующими способами:

- метод «покрывающих водных бассейнов», когда открытые горизонтальные поверхности бетона выдерживаются под слоем воды (3-5) см.;

- непрерывно увлажнять бетонные поверхности конструкции путем распыления воды над ними;

- использовать защитные пленки из пленкообразующих составов (битумные эмульсии, лак этиноль, помароль, петролатум и другие);
- использовать полимерные пленки.

При интенсивной солнечной радиации предпочтительнее всего использовать полимерные непрозрачные или прозрачные пленки с коэффициентом пропускания до 55 %. В случае применения пленок с прозрачностью более 55 %, следует снижать перегрев поверхностного слоя бетона и равномерно распределять тепло и конденсированную влагу: это особенно важно для наклонных и вертикальных конструкций. Для этих целей на поверхность свежешуложенного бетона устраивается слой гидрофильного материала (поролон, мешковина), после чего все должно быть укрыто пленкой.

Для устройства покрытий целесообразно использовать полиэтиленовые, поливинилхлоридные или полиэтилентерефталатные пленки. Для снижения температурных напряжений или сохранения тепла в бетоне используются металлизированные пленки, которые могут быть самостоятельным покрытием или находиться в многослойных покрытиях.

При влиянии высоких температур под действием солнечной радиации, интенсивный набор прочности бетона под пленками происходит за первые (1-3) сут. Если рассматривать твердение относительно влагопотерь, то продолжительность набора критической прочности бетона происходит от 1 до 4 сут. Тогда прочность бетона в возрасте 7 суток имеет в основном 100 % прочности R_{28} . Такие монолитные конструкции можно загружать расчетными нагрузками [10].

Влияние преждевременного обезвоживания на твердеющий бетон

В Средней Азии, Южном Казахстане, Нижнем Поволжье, части Закавказья и юга Украины можно наглядно увидеть признаки сухого и жаркого климата. Здесь самые высокие отметки наружного воздуха могут достигать 35 °С-42 °С при влажности всего 10 %-25 %. Здесь так же часты сильные порывы ветра. В такой местности с бетоном может происходить

быстрое обезвоживание, и как следствие замедление до минимума процессов гидратации бетона. Стоит отметить, что замедление процессов гидратации бетона непосредственно отрицательно влияет на набор прочности бетона, происходит снижение модуля упругости бетона до 45 %-50 %. Так же прочность бетона может снижаться до 50 %-55 % при его быстром высушивании.

При высушивании бетона, в первую очередь происходит обезвоживание наружных слоев конструкции; при этом возникающие дополнительные напряжения пограничных слоев (внутренних и наружных) так же снижают прочность бетонных конструкций. Если бетон раннего возраста будет подвергнут обезвоживанию, то может начаться разрушение даже без приложения к нему внешней нагрузки.

Факторы, влияющие на скорость обезвоживания бетона

Достаточно часто можно встретить, что в бетоны добавляют водоудерживающие добавки (хлопковое мыло, бентонит и другие). Для ускорения процесса твердения бетона наиболее эффективна добавка хлористого кальция.

Интенсивность обезвоживания бетона так же зависит от массивности конструкций (с уменьшением модуля поверхности снижается и скорость испарения). На прочность бетона массивных конструкций условия твердения влияют меньше, чем на тонкостенные. Поэтому тонкостенные конструкции требуют надежной защиты от высыхания.

Скорость высыхания бетона зависит и от материала опалубки. Из-за адсорбирующего (влагопоглощающего) эффекта дерева, пористые деревянные опалубки ускоряют обезвоживание бетона. Сталь не поглощает воду, но при интенсивном нагреве может способствовать интенсивному испарению воды через открытые бетонные поверхности.

Отдельно стоит отметить сроки выдерживания бетона в опалубке. При преждевременном снятии опалубки поверхность бетона быстрее высыхает, что замедляет процесс твердения.

Уход за бетоном в сухих и жарких условиях

В любых бетонных работах уход за бетоном требуется начинать сразу после его заливки, это особенно важно для таких районов строительства, где наблюдаются сухие и жаркие или зимние условия.

При возведении массивных бетонных конструкций требуется не только их увлажнение, но и их охлаждение. Такое охлаждение осуществляют путем циркуляции воды по системе труб, которые предварительно должны быть заделаны в бетон. При таком виде охлаждения будут снижаться температурно-усадочные напряжения.

Часто в сухих и жарких районах встречается дефицит воды. В этих условиях использование воды повлечет большие затраты. В таком случае применяется безвлажный уход то есть выдерживание твердеющего бетона в специальных воздухо непроницаемых камерах. Сразу же после укладки бетона, малые конструкции закрывают легкими стальными колпаками, где создаются герметичные условия, похожие на мягкое пропаривание [11].

Твердение бетона в зимних условиях

При температурах наружного воздуха ниже минус 25 °С производство бетонных работ рассматривается как вынужденная мера, поскольку сопровождается значительными трудностями в производстве работ и повышенным расходам энергетических ресурсов.

Например, в данных условиях твердения фундаментов производят ускорение его твердения путем введения химических добавок. При выборе количества хим. добавок учитывают возможность выхода солей из бетона в грунт, смену температуры замерзания грунта, что в последующем может привести к снижению прочности и несущей способности монолитных фундаментов [12].

Календарным зимним периодом считается время года от даты наступления устойчивой среднесуточной температурой 0 °С до даты наступления такой же температуры весной. Так же в литературе встречается

понятие «зимние условия», которое характеризует опасные фазовые изменения воды в бетонной смеси при замерзании или оттаивании. Зимние условия начинаются в момент, когда среднесуточная температура наружного воздуха некоторой местности снижается до $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в течение суток – ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При проведении бетонных работ в зимнее время должны быть предусмотрены организационно-технические мероприятия, которые не допустят замерзания бетона в конструкциях до достижения им критической прочности [13].

Способы выдерживания бетона в зимних условиях

Существует несколько способов выдерживания бетона в зимних условиях.

Способ «термоса»

Способ «термоса» применяется для конструкций с модулем поверхности (это отношение охлаждаемой площади к внутреннему объему монолита) до 6-8 при температуре наружного воздуха от минус $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до минус $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, при применении быстротвердеющих и высокопрочных бетонов – модуль до 18. Этот способ отмечается простотой технологии и низкой себестоимостью, однако не подходит для сложных конструкций и малоэффективен при особо низких температурах.

Иногда для расширения возможностей способа «термос» производят предварительный электронагрев бетонных смесей перед укладкой в конструкцию.

При твердении бетона способом «термос» необходимо:

- если существует вероятность понижения температуры ниже расчетной, то необходимо утеплять бетон;
- требуется вести контроль за плотностью и количеством растворов по расчету;
- для ускорения процесса твердения бетона, требуется его укрытие гидро- и теплоизоляцией;

– если во время намеченных бетонных работ прогнозируется сильный ветер или осадки, то необходимо проводить бетонные работы под брезентовыми или другими шатрами;

– снимать теплоизоляцию только после нарастания бетонной конструкцией распалубочной прочности; снятие гидроизоляции производить при нарастании прочности бетона до проектных значений;

– снимать боковую опалубку при достижении прочности бетона значений меньших 50 % R_{28} , возможно только с ее заменой на пароизоляцию.

Способ электропрогрева

Способ электропрогрева используется для конструкций с модулем поверхности более 5-и и в случаях, когда способ «термоса» не обеспечивает достаточной прочности бетона к концу срока выдерживания. Так же этот способ эффективен для получения требуемой прочности за короткий срок. Это достаточно универсальный и бюджетный способ выдерживания бетона. Однако метод не обеспечивает полной целостности конструкции (так как вокруг электрода происходит затвердевание и усадка бетона, появляются трещины) и после застывания бетона не поддерживает требуемую температуру.

Электропрогрев позволяет обеспечить достижение бетоном до замерзания прочности в 65 %-70 % от марочной с достижением 100 % марочной прочности при наступлении положительной температуры воздуха.

При электропрогреве опалубка должна быть утеплена, неопалубленные поверхности бетона следует укрывать гидроизоляцией (толь, полимерная пленка и так далее) и слоем утеплителя.

Существуют электронагревательные опалубки, которые удобно использовать при электропрогреве бетона. Отличительной особенностью такого способа прогрева бетона является независимость от степени армирования конструкции. Недостаток этого способа заключается в толщине слоя прогрева, она составляет всего (20-25) см. Поэтому для больших

конструкций этот способ дополняют другими способами прогрева. При использовании этой технологии важно укрыть пароизоляцией неопалубленные поверхности и теплоизолировать всю конструкцию снаружи; при этом необходимо поддерживать температуру поверхности в пределах 80 °С-90 °С и при остывании конструкции поддерживать выбранную скорость.

Основой индукционного прогрева является выделение тепла от токопроводящих элементов конструкции, таких как арматура и металлическая опалубка. Такой прогрев используется для насыщенных металлом конструкций небольшого поперечного сечения (балки, колонны или стыки с модулем поверхности более 5).

Для прогрева бетона так же используют инфракрасные установки. В этом случае инфракрасные лучи, проходя через воздух, передают тепловую энергию непосредственно облучаемой поверхности бетона. Коэффициент полезного действия инфракрасных установок достаточно высок, однако этот способ энергоемок и производство работ усложнено.

Для прогрева бетонной смеси могут быть использованы различные гибкие нагреватели, которые позволяют обогревать поверхность бетонирования в скользящей опалубке, отдельные элементы фундаментов или бетонные подготовки [14].

В зависимости от расчетных температур наружного воздуха возможно использование сразу нескольких способов выдерживания бетона.

При любых видах электротермообработки бетона должна быть выполнена тщательная защита неопалубленных поверхностей от потерь влаги, должен строго соблюдаться принятый температурный режим прогрева (обогрева); так же следует утеплять бетон на границе бетонирования, а при невозможности утепления (выступы густой арматуры и т. д.) прогревать ее с помощью электродов.

Опалубку с утеплителем следует снимать после остывания конструкции до 0 °С, нельзя допустить ее примерзания к поверхности бетона.

Критическая прочность бетона к моменту возможного замерзания должна составлять:

- более 50 % от проектной прочности для классов В7,5-В12,5;
- более 40 % для В15-В22,5;
- более 30 % для В30-В40;
- более 70 % для особоответственных и преднапряжённых конструкций.

Если бетон к моменту замерзания наберет критическую прочность, то при последующих нормальных условиях достигнет проектной прочности.

Необходимо регулярно измерять температуру бетона в сроки, которые были установлены в ППР (или лаборатории). Для записи результатов измерений используются спец. температурные журналы – листы. Учет температур бетона обычно осуществляют термометрами, для установки которых приостанавливается прогрев. Замер температуры можно производить только в верхних слоях бетона.

Греющие «одеяла»

Сравнительно недавно в строительной технологии появились различные конструкции греющих «одеял», которые представляют собой гибкое покрытие с нагревателем. Термоматы или термоэлектроматы – это альтернатива прогреву бетона трансформаторами, электродами, способом «термос». С их помощью возможно поднятие температуры свежеслитого бетона до +50 °С-70 °С и поддержания ее такой в течение нескольких суток. После подачи напряжения на полимерную пленку мата создается инфракрасное излучение, которое постепенно прогревает бетон на глубину до 60 см (если прогрев производить в 2 этапа). Воздушная прослойка и отражающий слой изоляции в составе термоматов позволяют снизить теплопотери через окружающую среду.

Данный метод прогрева бетона эффективен и экономичен так как прогрев бетона осуществляется быстро и равномерно, а затраты

электроэнергии при этом меньше на 20 % в сравнении с электрическим прогревом.

Выводы по первой главе

Вследствие длительной эксплуатации бетона в условиях различных внешних факторов, отличных от благоприятных, его прочность снижается. Но вместе с тем существует и фактор упрочнения, который зависит от гидратации цемента. Этот рост прочности цементного камня компенсирует снижение от неблагоприятных факторов. Прочность бетона определяется ростом прочности цементного камня, но только до тех пор, пока существует условие минимальной прочности заполнителя. Когда же заполнитель станет самым слабым местом в бетоне (в сравнении с цементным камнем), то дальнейший набор прочности бетона замедлится. Поэтому рост прочности лёгких бетонов с пористыми заполнителями в некоторых случаях может быть менее существенным, чем рост прочности тяжёлых бетонов при прочих равных условиях.

Глава 2 Определение прочности бетона в сериях с длительным набором прочности

2.1 Технология определения прочности бетона по контрольным образцам-кубам

Область применения

Описанная здесь технология относится ко всем видам бетона по ГОСТ 25192-2012 [15], которые могут применяться в каких-либо областях строительства, и устанавливает методы определения предела прочности бетонов на сжатие путем разрушающих кратковременных статических испытаний специально изготовленных контрольных образцов бетона. Данная технология не применяется при испытаниях специальных видов бетона, в том числе ячеистый бетон; для них предусматриваются другие стандарты при определении прочности [16].

Сущность метода

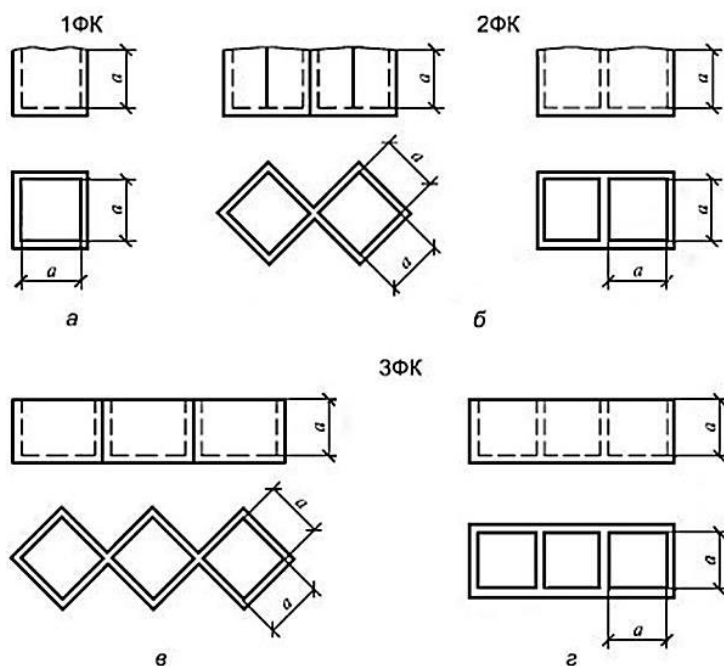
Определение прочности бетона состоит в измерении минимальных усилий, разрушающих специально изготовленные контрольные образцы бетона при их статическом нагружении с постоянной скоростью нарастания нагрузки, и последующем вычислении напряжений при этих усилиях.

Формы для изготовления контрольных образцов

Образцы изготавливаются в поверенных (калиброванных) формах, соответствующих требованиям ГОСТ 22685-89 [17].

В ходе эксплуатации форм должны быть исключены нарушения их геометрических параметров и повреждения, возможные при очистке, сборке или разборке, их транспортировании или при проведении уплотнения бетонной смеси.

Формы для изготовления образцов-кубов обозначены на рисунке 5.



а – одноместные; б – двухместные; в, г – трехместные

Рисунок 5 – Типы форм для изготовления контрольных образцов

Формы хранятся по группе условий С по ГОСТ 15150-69 [18].

Очищение поверхностей форм допускается производить только специальными скребками и щетками, изготовленными из дерева или полимеров. Стальными скребками очень легко можно повредить поверхности форм.

Для упрощения и ускорения работ, наружные поверхности форм очищаются сразу после формовки бетонных образцов.

Перед изготовлением контрольных образцов-кубов, рабочие поверхности форм покрываются тонким слоем смазки; которая никак не влияет на свойства поверхности будущего бетона. Что также выполняется с целью упрощения и ускорения работ по последующему очищению форм.

Контрольные образцы

Номинальные размеры контрольных образцов-кубов должны соответствовать указанным в таблице 3.

Таблица 3 – Форма и номинальные размеры образцов

Форма образца	Номинальные размеры образца, мм
Куб	С ребром: 100; 150; 200; 250; 300
	Допускаются ребра длиной 70
	Базовым сечением считается размер 150×150
	Допускается применять образцы с другим размером ребра, если существуют соответствующие нормативы или иная техническая документация

Так же существуют значения наименьших размеров ребра куба в зависимости от размера наибольшего зерна заполнителя бетонной смеси (таблица 4).

Таблица 4 – Зависимость размера ребра куба от размера зерна заполнителя

Наибольший номинальный размер зерна заполнителя, мм	Наименьший размер ребра куба, мм
20 и менее	100
40	150
70	200
100	300
Примечания 1 На стадии изготовления, из бетонной смеси должны удаляться зерна крупного заполнителя, которые более чем в 1,5 раза превышают номинальные размеры; также удаляются все зерна, размер которых превышает 100 мм. 2 При изготовлении кубов с длиной ребра 70 мм, максимально допустимая крупность заполнителя не более 20 мм.	

Средний внутрисерийный коэффициент вариации прочности бетона позволяет определить количество образцов-кубов в серии [19]. Сам коэффициент определяется в зависимости от испытаний последовательных 30 серий образцов бетона одного класса (таблица 5). Он вычисляется через размах W_i и прочность бетона R_i , перепроверка не менее чем 1 раз в год.

Таблица 5 – Число образцов в серии

Внутрисерийный коэффициент вариации \bar{V} , %	5 и менее	Более 5 до 8 включ.	Более 8
Требуемое число образцов в серии, шт., не менее	2	3 или 4	6
Примечания 1 При применении двухместных форм число образцов в серии принимается равным четырем, при применении одноместных и трехместных форм - три образца. 2 В случае если средний внутрисерийный коэффициент вариации прочности бетона на сжатие превышает 8 %, необходимо провести внеочередную переаттестацию испытательной лаборатории.			

Пробы бетонной смеси для изготовления контрольных образцов при производственном контроле прочности бетона извлекаются в соответствии с требованиями ГОСТ 10181-2014 [20], ГОСТ 18105-2010 [21] и ГОСТ 7473-2010 [22] из рабочего состава бетонной смеси.

Пробы бетонной смеси для изготовления контрольных образцов, предназначенных для лабораторных исследований, отбираются из специально приготовленных лабораторных замесов бетонной смеси.

Объем пробы бетонной смеси должен превышать требуемый для изготовления всех серий контрольных образцов не менее чем в 1,2 раза.

Отобранная проба бетонной смеси должна быть дополнительно вручную перемешана перед формованием образцов.

Бетонные смеси, содержащие воздухововлекающие и газообразующие добавки, перед формованием образцов не должны быть дополнительно перемешаны.

Укладка бетонной смеси в форму и ее уплотнение проводится не позднее чем через 20 мин после отбора пробы.

При изготовлении нескольких серий образцов, предназначенных для определения различных характеристик бетона, все образцы изготавливаются из одной пробы бетонной смеси и уплотняются в одинаковых условиях. Отклонения между средними значениями средней плотности бетона образцов отдельных серий и средней плотности отдельных образцов в каждой серии к моменту их испытания не должны

превышать 50 кг/м. При несоблюдении указанного требования результаты испытаний не учитываются.

При производственном контроле прочности бетона формирование контрольных образцов проводится по той же технологии и с теми же параметрами уплотнения, что и формирование изделий и конструкций.

После окончания укладки и уплотнения бетонной смеси в форме верхняя поверхность образца заглаживается мастерком или пластиной.

Способ и режим твердения образцов бетона, предназначенных для производственного контроля прочности, принимается по ГОСТ 18105-2010 [21].

Образцы, предназначенные для твердения в нормальных условиях, после изготовления до их распалубки хранятся в формах, покрытых влажной тканью или другим материалом, исключающим испарение из них влаги, в помещении с температурой воздуха $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$.

При определении прочности бетона на сжатие образцы распалубливают не ранее чем через 24 ч и не позднее чем через 72 ч.

После распалубливания образцы помещаются в камеру с нормальными условиями твердения: с температурой $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$. и относительной влажностью воздуха $(95 \pm 5) \%$. Образцы располагают на подкладки так, чтобы расстояние между образцами, а также между образцами и стенками камеры было не менее 5 мм. Площадь контакта образца с подкладками, на которые он установлен, должна быть не более 30 % площади опорной грани образца. Образцы в камере нормального твердения не должны орошаться водой. Допускается хранение образцов под слоем влажного песка, опилок или других систематически увлажняемых гигроскопичных материалов.

Образцы, предназначенные для твердения в условиях тепловой обработки, помещаются в формах в тепловой агрегат (пропарочную камеру, автоклав, отсек формы или кассеты), где они твердеют вместе с

конструкциями (изделиями) или отдельно по принятому на производстве режиму. После окончания тепловой обработки образцы распалубливают и испытывают или хранят в нормальных условиях.

Допускаются другие условия твердения образцов, например, в воде или в условиях, аналогичных условиям твердения бетона в монолитных конструкциях, если эти условия установлены стандартами, техническими условиями или технологическими регламентами на производство работ [23].

При транспортировании образцов необходимо предохранять их от повреждений, изменения влажности и замораживания.

Прочность бетона образцов к началу их транспортирования должна быть не менее 2,0 МПа.

Требования к средствам измерения

Средства измерения, выпускаемые серийно, допускается использовать, если они внесены в государственный или ведомственный реестр, о чем должна быть сделана отметка или запись в эксплуатационных документах (паспорте, формуляре, инструкции по эксплуатации) и прошли поверку (калибровку), что подтверждается свидетельством о поверке (сертификатом о калибровке).

Средства измерения, выпускаемые единичными экземплярами или ввозимые из-за границы в единичных экземплярах, допускается использовать, если они прошли калибровку, что подтверждается сертификатом о калибровке.

Испытательное оборудование допускается использовать, если оно прошло метрологическую аттестацию, что удостоверяется аттестатом (протоколом), подтверждающим соответствие его технических характеристик, обеспечивающих возможность проведения испытаний, указанным в паспорте (формуляре).

В процессе эксплуатации средства измерения должны проходить периодическую поверку (калибровку), а испытательное оборудование - периодическую аттестацию [24].

Подготовка образцов к испытаниям

В помещении для испытания образцов должна поддерживаться температура $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ и относительная влажность воздуха не менее 55 %. До испытания образцы выдерживаются при указанных условиях в распалубленном виде в течение 24 ч, если они твердели в воде, и в течение 4 ч, если они твердели в воздушно-влажностных условиях или в условиях тепловой обработки.

Образцы, предназначенные для определения распалубочной прочности бетона на сжатие в горячем состоянии, должны быть испытаны без предварительной выдержки.

Перед испытанием образцы подвергаются визуальному осмотру для установления наличия дефектов в виде трещин, сколов, раковин и каких-либо сторонних включений. Если на образце имеются сколы глубиной более 10 мм, раковины глубиной более 5 мм с диаметром более 10 мм или следы расслоения бетонной смеси, то такие образцы-кубы к испытаниям не допускаются. Если на опорных поверхностях кубов замечены наплывы бетона, то они удаляются абразивным камнем. По результатам проведенного осмотра, делаются соответствующие записи в журнале испытаний (рисунок 6), с пометкой локализации найденных дефектов.

Дата изготовления контрольного образца	Маркировка серии образцов	Нормируемые характеристики прочности и плотности бетона. Проектный класс бетона, по прочности, МПа	Дата испытания контрольных образцов	Характеристика образца			Результаты испытания			Примечание	Подпись лица, испытывающего образцы
				Масса, г	Размеры, см	Средняя плотность, кг/м ³	Разрушающая нагрузка, кН	Прочность образца, приведенная к базовому размеру, МПа	Средняя прочность образцов в серии, МПа		
1	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13

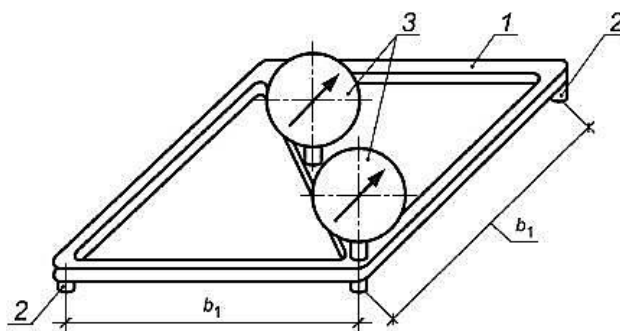
Рисунок 6 – Форма журнала испытаний при определении прочности контрольных образцов на сжатие [16]

После проведения визуального осмотра на каждом кубе отмечается грань, к которой при проведении испытаний будет приложена нагрузка. Опорная грань выбирается так, чтобы в процессе испытаний сжимающая сила была параллельна слоям укладки бетонной смеси.

Затем проводятся измерения линейных размеров образцов-кубов. Наибольшая погрешность при измерении линейных размеров образцов не должна превышать 1 %. Измерения заносятся в журнал испытаний.

Важно, что при использовании для изготовления образцов бетона поверенных (калиброванных) форм по ГОСТ 22685-89 [17], линейные размеры которых соответствуют требованиям указанного стандарта, допускается не измерять линейные размеры образцов, а принимать их равными номинальным, приведенным в таблице 3.

Отклонения от плоскостности опорных поверхностей образцов-кубов, прилегающих к плитам пресса, не должны превышать 0,001 наименьшего размера образца. Измерения производят при помощи специального прибора измерения плоскостности (рисунок 7).



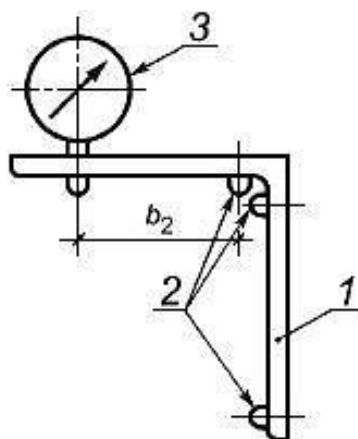
b_1 – база прибора; 1 – корпус (рамка); 2 – опора; 3 – индикатор

Рисунок 7 – Схема прибора для измерения отклонений от плоскостности

Погрешность измерения, проведенного данным прибором, не превышает значения 0,01 мм на 100 мм линейного размера грани куба. Измерению отклонения от плоскостности подвергаются две опорные грани

куба, которые будут напрямую контактировать с плитами прессы при проведении испытаний.

Отклонения от перпендикулярности смежных граней образцов-кубов, не должны превышать ± 1 мм. Измерения производят при помощи прибора измерения перпендикулярности (рисунок 8).



b_2 – база прибора; 1 – корпус (угольник); 2 – опора; 3 – индикатор

Рисунок 8 – Схема прибора для измерения отклонения от перпендикулярности

Погрешность данного измерения составляет не более 0,01 мм на 100 мм длины (высоты) образца-куба. Отклонения от перпендикулярности определяют по опорным граням относительно смежных граней. Отклонения грани, открытой при бетонировании образца, не оцениваются.

Если опорные грани кубов не соответствуют требованиям плоскостности и перпендикулярности, то они должны быть выровнены. Для выравнивания применяют шлифование граней кубов или производят нанесение слоя быстротвердеющего материала (например, на основе глиноземистого цемента или серы) толщиной до 5 мм и прочностью к моменту испытания не менее ожидаемой прочности бетона образца.

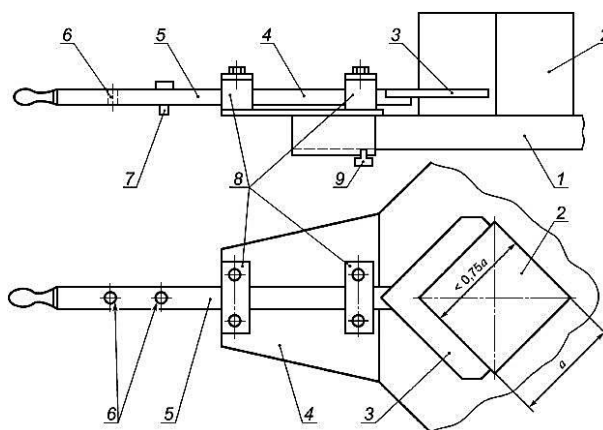
Перед испытанием определяется средняя плотность образцов по ГОСТ 12730.1-78 [25].

Последовательность проведения испытаний

Все образцы одной серии испытываются в расчетном возрасте в течение не более 1 ч.

Перед установкой образца в испытательную машину удаляются частицы бетона, оставшиеся от предыдущего испытания на опорных плитах испытательной машины.

При проведении испытаний образцы устанавливаются одной из выбранных граней на нижнюю опорную плиту испытательной машины (пресса) центрально относительно его продольной оси, используя риски, нанесенные на плиту пресса, или специальное центрирующее приспособление (рисунок 9).



1 – плита пресса; 2 – образец; 3 – угольник; 4 – основание приспособления; 5 – шток; 6 – гнезда ограничителя; 7 – ограничитель; 8 – направляющие; 9 – болты крепления

Рисунок 9 – Приспособление для центрирования контрольных образцов

После установки образца на опорные плиты испытательной машины или дополнительные стальные плиты, верхняя плита пресса совмещается с верхней опорной гранью образца так, чтобы их плоскости полностью прилегали одна к другой. Шкала силоизмерителя испытательной машины выбирается из условия, что ожидаемое значение разрушающей нагрузки

должно быть в интервале от 20 % до 80 % максимальной нагрузки, допускаемой выбранной шкалой.

Нагружение образцов проводится непрерывно с постоянной скоростью нарастания нагрузки $(0,6 \pm 0,2)$ МПа/с до его разрушения. При этом время нагружения образца до его разрушения должно быть не менее 30 с. Максимальное усилие, достигнутое в процессе испытания, принимается за разрушающую нагрузку.

После проведения испытаний производится обязательная оценка вида разрушения образца. Если куб разрушился по неудовлетворительной схеме (рисунки 10,11), то результат его испытания не учитывается, что также отмечается в журнале испытаний.

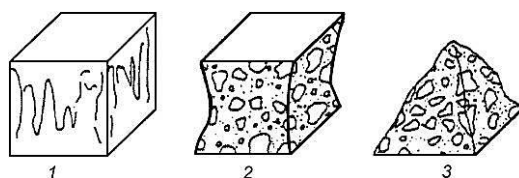


Рисунок 10 – Удовлетворительные схемы разрушения образцов-кубов [16]

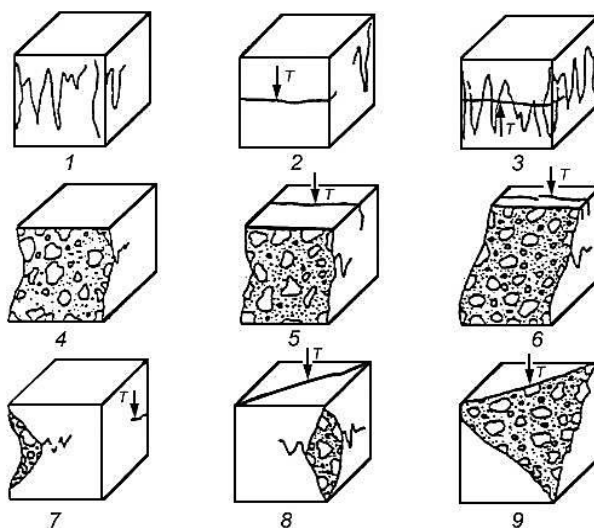


Рисунок 11 – Неудовлетворительные схемы разрушения образцов-кубов [16]

Так же при визуальном осмотре в журнал испытаний заносятся отметки о:

– наличие раковин более 1 см^3 и каверн внутри разрушенного образца;

– наличие зерен заполнителя, размер которых более $1,5 \cdot d_{\text{max}}$;

– наличие комков глины или следов расслоения бетонной смеси.

Если были сделаны перечисленные выше отметки, то результаты испытания соответствующих кубов также не учитываются.

Требования по охране труда и техника безопасности

Перед началом работ

На испытателе должна быть спецодежда (застёгнуты рукава, убраны свисающие детали, надеты защитные очки). Требуется осмотреть и подготовить рабочее место, убрать лишние предметы, освободить проходы. Полы помещения должны соответствовать санитарно-гигиеническим требованиям и не скользить. Помещение должно быть достаточно освещено. Пресс должен быть надежно закреплен к полу и не иметь трещин и повреждений корпуса, рабочей зоны или монометра.

При выполнении работ

Следить за тем, чтобы испытываемые кубы были установлены без перекосов (для исключения какого-либо смещения при испытании). Не допускается удерживать образцы руками, не стоит держать руки вблизи рабочей зоны. Так же недопустимо использовать не подходящие по требованиям безопасности какие-либо самодельные приспособления.

Обработка и оценка результатов испытаний

Прочность бетона на сжатие R , МПа, вычисляется с точностью до 0,1 МПа по формуле:

$$R = \alpha \frac{F}{A}, \text{ МПа} \quad (3)$$

где F – разрушающая нагрузка, н;

A – площадь рабочего сечения образца, мм^2 ;

α – масштабный коэффициент, приводящий найденную прочность бетона к прочности бетона базового размера (таблица 6).

Таблица 6 - Значения масштабного коэффициента

Линейный размер ребра куба, мм	Масштабный коэффициент α
70	0,85
100	0,95
150	1,00
200	1,05
250	1,08
300	1,10

Примечание – Применение коэффициента α , различающегося от единицы в сторону увеличения или уменьшения, более чем это указано в настоящей таблице для отдельных видов бетонов и размеров образцов, не допускается.

Прочность бетона в серии образцов определяется как среднеарифметическое значение прочности испытанных образцов в серии:

- из двух образцов – по двум образцам;
- из трех образцов – по двум образцам с наибольшей прочностью;
- из четырех образцов – по трем образцам с наибольшей прочностью;
- из шести образцов – по четырем образцам с наибольшей прочностью.

В случаях, когда производится отбраковка дефектных образцов, прочность бетона в серии определяется по всем оставшимся образцам, если их не менее двух.

Результаты испытания серии из двух образцов при отбраковке одного образца не учитывают [8].

Стоит отметить, что испытания бетона – очень важный этап контроля и оценки прочности будущих конструкций. И для того, чтобы по итогу получить достоверные результаты, требуется соблюдение всей технологии подготовки, проведения и оценки результатов испытаний. Да, приведенный метод определения прочности бетона, достаточно трудоемок и требует особой подготовки исполнителя работ, но только он, при соблюдении всех правил, дает точный результат (чем любой другой метод неразрушающего контроля) [26-28].

2.2 Изготовление партии бетонных образцов

28.08.2018 г. в условиях заводского производства бетона была изготовлена партия бетонных кубов, в соответствии с требованиями технологии и стандартов: 16 штук образцов-кубов сечением 100×100×100 мм. класса В30, W12, F300. Часть партии бетонных кубов указана на рисунке 12.



Рисунок 12 – Экспериментальные образцы-кубы (отображена часть образцов)

Все образцы были разделены на 3 серии: серия 1 – испытание кубов после выдерживания в нормальных условиях (температура (20 ± 2) °С и относительная влажность воздуха (95 ± 5) % в возрасте 7 и 28 суток; серия 2 (далее б.у.) – определение прочности бетона в возрасте 6 и 12 месяцев после изготовления при выдерживании их в благоприятных условиях (температура 22-24 °С и влажность 70 %); серия 3 (далее с.п.) – оценка набора прочностных характеристик бетона в возрасте 6 и 12 месяцев после их выдерживания на открытом воздухе без защиты от изменений температуры, влажности, солнечной радиации, осадков и т.д. До 28 суток образцы всех серий

хранились в нормальных условиях. Испытания проводились в соответствии с действующими стандартами [20]-[21].

Результаты испытания кубов первой серии (R^7 сут и R^{28} сут) занесены в таблицу 7.

Таблица 7 – Прочность кубов на сжатие на 7-ые и 28-ые сутки

Дата испытания	Маркировка серии образцов	Прочность образцов, Мпа	Средняя прочность образцов, Мпа
4.09.18 (7 суток)	R^7 сут	35,3	34,6
		33,9	
25.09.18 (28 суток)	R^{28} сут	44,0	45,5
		46,9	

После проведения испытаний первой серии кубов в прессе, кубы-образцы в количестве из 12 штук были разделены на серии 2 и 3 (по 6 штук для каждой серии) для проведения дальнейшей экспериментальной оценки (рисунок 13).



Рисунок 13 – Условия хранения опытных образцов серии 3 (отображена часть образцов)

Длительность всего эксперимента составила 12 месяцев – до 31.08.2019 г. Испытания запланированы на март и август месяцы.

2.3 Определение прочности бетона в сериях через 6 месяцев после изготовления

2.3.1 Подготовка к испытаниям №1

Как уже было сказано, для серий 2 и 3 были изготовлены по 6 штук кубов-образцов – соответственно по 3 куба из этих серий должны были быть испытаны в возрасте 6 месяцев от даты изготовления (рисунок 14).



1, 2, 3 – кубы, выдержанные на условной строительной площадке;
1н, 2н, 3н – кубы, выдержанные в благоприятных условиях

Рисунок 14 – Кубы, подготовленные к испытанию №1

Согласно технологии, представленной ранее (п. 2.1), перед началом испытаний образцы подвергались визуальному осмотру на наличие дефектов, таких как трещины, сколы ребер, раковины и инородные включения – таковых обнаружено не было. На каждом кубе выбиралась и отмечалась грань, к которой в процессе проведения испытаний должно было быть

приложено сжимающие усилие прессы. Направление приложения нагрузки совпадало со слоям укладки бетонной смеси в формы.

Затем был произведен линейный замер образцов. Результаты занесены в журнал испытаний. Отклонений поверхностей образцов-кубов от плоскостности и от перпендикулярности выявлено не было – проводить выравнивание не требовалось.

После этого при помощи механических весов была определена масса каждого куба (рисунок 15).



Рисунок 15 – Взвешивание образцов-кубов перед испытаниями №1

Затем определялась средняя плотность для каждого куба по формуле:

$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ кг/м}^3 \quad (4)$$

где m – масса куба, кг,
 V – объем куба, м^3 .

Значения масс и плотностей образцов так же занесены в журнал испытаний.

Для проведения испытаний был выбран гидравлический пресс П-250, предназначенный для испытания строительных материалов (бетон, природный и искусственный строительный камень) на сжатие. Основные характеристики испытательного пресса приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Основные технические характеристики пресса П-250

Характеристика	Значение
Наибольшая создаваемая нагрузка, кН	2500
Тип привода и силоизмерителя	Электрогидравлический, торсионный
Отображение данных испытания	Аналоговый циферблат
Диапазон измерения основной/дополнительный, кН	250-1250/500-2500
Погрешность при нагружении, %	± 2
Рабочий ход гидравлического поршня, мм.	50
Высота рабочего пространства, включая ход гидравлического поршня, мм.	1000
Максимальная скорость перемещения гидравлического поршня, мм/мин.	20
Расстояние между колоннами, мм.	530
Размеры плит сжатия, мм.	500×500
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм.	2100×900×2715
Масса испытательной машины, кг.	3530
Мощность, кВт.	3,5
Электропитание	~380V/50Hz (с нулевым проводом)

Пресс оснащен торсионным силоизмерителем. Отображение создаваемой нагрузки на образец-куб для удобства использования выводится на аналоговый двухдиапазонный циферблат. Нагружающий модуль пресса оснащен двумя винтовыми вертикальными колоннами, при помощи электронного привода происходит вертикальное перемещение верхней траверсы. Испытательный гидравлический пресс П-250 изображен на рисунке 16.



Рисунок 16 – Вид испытательного гидравлического прессы П-250

Перед началом работ было осмотрено и подготовлено рабочее место – убраны лишние предметы, освобождены проходы, проверена достаточность освещения помещения, полы не скользят, пресс надежно закреплен к полу и не имеет трещин и повреждений корпуса, рабочей зоны или монOMETРА.

2.3.2 Проведение испытаний №1

Когда был произведен визуальный осмотр и заполнена характеристика образцов, можно было непосредственно приступить к испытаниям на прессе.

При помощи рисок, нанесенных на плиту прессы, образцы-кубы центрально устанавливались выбранной гранью на нижнюю опорную плиту прессы. После этого верхняя плита испытательной машины совмещалась без зазора с верхней опорной гранью куба.

На аналоговом двухдиапазонном циферблате производилось совмещение двух стрелок шкалы на позицию «0». После нажатия кнопки «Пуск», на пресс начинала подаваться нагрузка. Через некоторое время обе стрелки силоизмерителя начинали отклонение по часовой стрелке – росло

давление на образцы. При дальнейшем непрерывном и плавном вращении рукоятки нагрузки (увеличении давления), происходил рост нагрузки и на куб до момента его разрушения. Время нагружения образца до его разрушения выдерживалось не менее 30 с. После разрушения образца производилось снятие нагрузки, при помощи вращения соответствующей рукоятки по направлению против часовой стрелки. При этом наблюдалось, что одна из стрелок циферблата фиксировала значение разрушающей нагрузки, а другая возвращалась в положение «0» (нагрузка снята). Затем только нажималась кнопка «Стоп», после чего испытанный образец извлекался для дальнейшего исследования, а плиты прессы очищались. Аналогично были произведены испытания других образцов-кубов (рисунок 17).



1, 2, 3 – кубы, выдержанные на условной строительной площадке;
4 – куб перед испытанием на прессе;
5, 6, 7 – кубы, выдержанные в благоприятных условиях

Рисунок 17 – Разрушение кубов прессом П-250 через 6 месяцев после изготовления

После проведения испытаний, каждый разрушенный образец подвергался визуальному осмотру. При визуальном осмотре испытанных кубов не было обнаружено каких-либо дефектов структур (рисунок 18).



Рисунок 18 – Разрушенные образцы-кубы испытания №1

Кубы разрушены по удовлетворительной схеме.

2.3.3 Обработка и оценка результатов испытаний №1

Согласно технологии определения прочности бетона (п. 2.1) прочность бетона на сжатие находится по формуле (3), тогда прочность первого испытанного образца:

$$R_{с.п.}^6 = 0,95 \frac{563,9 \times 1000}{0,01} = 53,6 \text{ Мпа} \quad (5)$$

где (563,9×1000) – разрушающая нагрузка (F), Н;

0,01 – площадь рабочего сечения образца (A), м²;

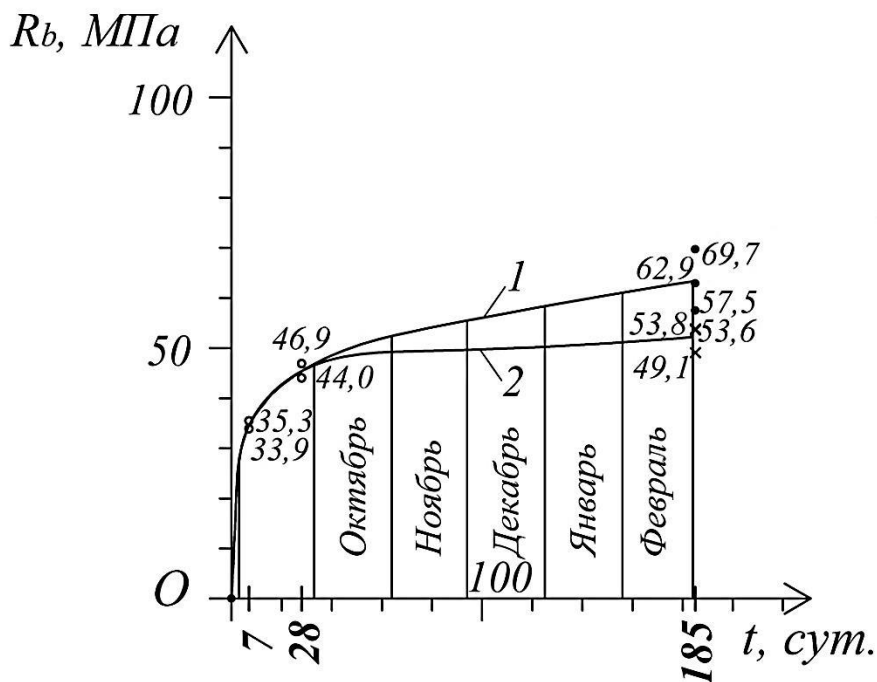
0,95 – масштабный коэффициент для кубов с ребром 100 мм (α), (табл. 2.4).

Аналогично высчитывались другие значения прочностей испытанных образцов. Заполнялся журнал испытаний (таблица 9).

Таблица 9 – Журнал испытаний при определении прочности кубов на сжатие №1

Дата изготовления контрольного образца	Маркировка серии образцов	Нормируемые характеристики прочности и плотности бетона. Проектный класс бетона, по прочности, МПа	Дата испытания контрольных образцов	Характеристика образца			Результаты испытания			Примечание (время нагрузки)		
				масса, г	размеры, см	средняя плотность, кг/м	разрушающая нагрузка, кН	прочность образца, приведенная к базовому размеру, МПа	средняя прочность образцов в серии, МПа			
1	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12		
28.08. 2018 г.	$R_{с.п.}^6$	В30, W12, F300	01.03. 2019 г.	2500	10×10×10	2500	57500 кгс = 563,9 кН	53,6	52,2	1 м 50 сек		
				2485		2485	57750 кгс = 566,3 кН	53,8		1 м 55 сек		
				2485		2485	52750 кгс = 517,3 кН	49,1		1 м 48 сек		
	$R_{н.у.}^6$						2500	2500	74850 кгс = 734,0 кН	69,7	63,4	2 м 40 сек
						2480	2480	61750 кгс 605,6 кН	57,5	1 м 42 сек		
						2463	2463	67500 кгс 662,0 кН	62,9	2 м 25 сек		

Для наглядности, рост прочности бетонных кубов представлен в графическом виде (рисунок 19).



- 1 — благоприятные условия твердения (б.у.); 2 — условия, приближенные к строительной площадке (с.п.);
- 35,3 — экспериментальные данные для образцов серии н.у., испытанных в возрасте 7 и 28 суток, МПа;
- 62,9 и × 49,1 — экспериментальные данные для образцов серии б.у. и с.п. соответственно, испытанных в возрасте 185 суток, МПа

Рисунок 19 — Кривые нарастания прочности бетона в зависимости от времени и условий твердения (испытание №1)

Полученная кривая серии б.у. по виду соответствует нормативной кривой длительного набора прочности тяжелого бетона.

Выводы по второй главе (часть 1)

Как уже отмечалось в п. 1.2, рост прочности бетона изменяется логарифмически (формула 2). Тогда возможно просчитать теоретическую прочность бетона через 6 месяцев после изготовления (на момент проведения испытаний №1), находившегося в благоприятных условиях:

$$R^6 = 45,5 \cdot \left(\frac{\lg 185}{\lg 28} \right) = 71,3 \text{ МПа} \quad (6)$$

где 45,5 – предел прочности бетона в возрасте 28 суток (R_{28}), МПа;
 $\lg 185$ и $\lg 28$ – десятичные логарифмы возраста бетона, сут.

Полученное теоретическое значение на 7,9 МПа больше прочности, полученной по результатам испытаний кубов серии б.у. и на 19,1 МПа больше, чем кубов серии с.п. (разница 11 % и 27 % соответственно). Результаты близки. Здесь наглядно видна зависимость роста прочности бетона от условий его твердения.

Предположим прочность бетона на момент последующих испытаний (через 1 год после изготовления), в благоприятных условиях твердения:

$$R^{12} = 45,5 \cdot \left(\frac{\lg 368}{\lg 28} \right) = 80,7 \text{ МПа} \quad (7)$$

Полученное значение предполагает рост прочности бетона на 77 % (за время от 28 суток до возраста 1 год после изготовления) от значения в 28 суток. Но, тем не менее, интенсивность этого роста уже будет заметно ниже.

2.4 Определение прочности бетона в сериях через 12 месяцев после изготовления

2.4.1 Подготовка к испытаниям №2

Подготовка к испытаниям осуществлялась аналогично испытаниям №1, как это было описано в п. 2.3.1.

Для второй части испытаний так же было подготовлено 6 образцов (по 3 куба из каждой серии). Образцы-кубы в возрасте 12 месяцев представлены на рисунке 20.



1н, 2н, 3н – кубы, выдержанные в благоприятных условиях;
1, 2, 3 – кубы, выдержанные на условной строительной площадке

Рисунок 20 – Кубы, подготовленные к испытанию №2

При визуальном осмотре кубов дефектов не обнаружено. Линейные размеры образцов и измеренные массы были занесены в журнал испытаний.

2.4.2 Проведение испытаний №2

Вторая часть испытаний проводилась аналогично ранее проведенным по п. 2.3.2 (рисунок 21).



1, 2, 3 – кубы, выдержанные на условной строительной площадке;
4, 5, 6 – кубы, выдержанные в благоприятных условиях

Рисунок 21 – Разрушение кубов прессом П-250 через 12 месяцев после изготовления

После проведения испытаний, каждый разрушенный образец подвергался визуальному осмотру (рисунок 22).



Рисунок 22 – Разрушенные образцы-кубы испытания №2

Кубы разрушены по удовлетворительной схеме, каких-либо дефектов структур обнаружено не было.

2.4.3 Обработка и оценка результатов испытаний №2

Аналогично п. 2.3.3 прочность первого испытанного образца испытания №2 будет находиться:

$$R_{с.п.}^{12} = 0,95 \frac{684,0 \times 1000}{0,01} = 65,0 \text{ Мпа} \quad (8)$$

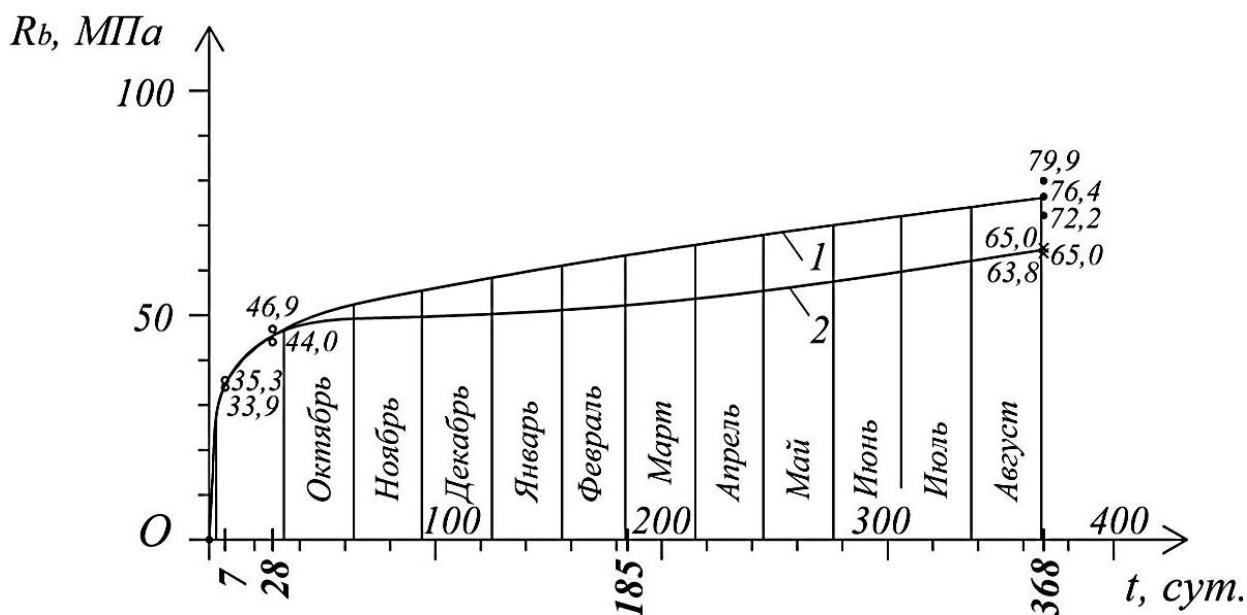
где (684,0×1000) – разрушающая нагрузка (F), Н;

Аналогично были просчитаны другие значения прочностей испытанных образцов в испытаниях №2. Результаты заносились в журнал испытаний (таблица 10).

Таблица 10 – Журнал испытаний при определении прочности кубов на сжатие №2

Дата изготовления контрольного образца	Маркировка серии образцов	Нормируемые характеристики прочности и плотности бетона. Проектный класс бетона, по прочности, МПа	Дата испытания контрольных образцов	Характеристика образца			Результаты испытания			Примечание (время нагружения)
				масса, г	размеры, см	средняя плотность, кг/м ³	разрушающая нагрузка, кН	прочность образца, приведенная к базовому размеру, МПа	средняя прочность образцов в серии, МПа	
1	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12
28.08. 2018 г.	R _{с.п.} ¹²	В30, W12, F300	31.08. 2019 г.	2460	10×10×10	2460	69750 кгс = 684,0 кН	65,0	64,6	2 м 20 сек
				2475		2475	68500 кгс = 671,8 кН	63,8		2 м 14 сек
				2470		2470	69750 кгс = 684,0 кН	65,0		2 м 15 сек
	R _{н.у.} ¹²			2477		2477	85750 кгс = 840,9 кН	79,9	76,2	2 м 45 сек
	2480			2480		77500 кгс = 760,0 кН	72,2	2 м 28 сек		
	2450			2450		82000 кгс = 804,2 кН	76,4	2 м 37 сек		

Перенесем рост прочности бетонных кубов испытания №2 в графический вид (рисунок 23).



- 1 – благоприятные условия твердения (б.у.); 2 – условия, приближенные к строительной площадке (с.п.);
- 35,3 – экспериментальные данные для образцов серии н.у., испытанных в возрасте 7 и 28 суток, МПа;
- 79,9 и × 63,8 – экспериментальные данные для образцов серии б.у. и с.п. соответственно, испытанных в возрасте 368 суток, МПа

Рисунок 23 – Кривые нарастания прочности бетона в зависимости от времени и условий твердения (испытание №2)

Аналогично результатам испытания №1, полученная кривая серии б.у. испытания №2 по виду соответствует нормативной кривой длительного набора прочности тяжелого бетона. Так же заметно явное отклонение кривой серии с.п. от нормативной.

Ранее при проведении испытаний №1 были теоретически просчитаны прочности бетона через 6 и 12 месяцев после изготовления. Данные для сравнения занесены в таблицу 11.

Таблица 11 – Результаты испытаний и теоретических расчетов

Дата изготовления образцов	Проектный класс бетона по прочности, МПа	Маркировка серии образцов	Средняя прочность кубов в серии (опыт), МПа	Прочность образцов в серии (теор. расчет), МПа	Расхождение результатов, %
28.08. 2018 г.	В30, W12, F300	$R_{с.п.}^6$	52,2	71,3	26,8
		$R_{6.у.}^6$	63,4		11,1
		$R_{с.п.}^{12}$	64,6	80,7	20,0
		$R_{6.у.}^{12}$	76,2		5,6

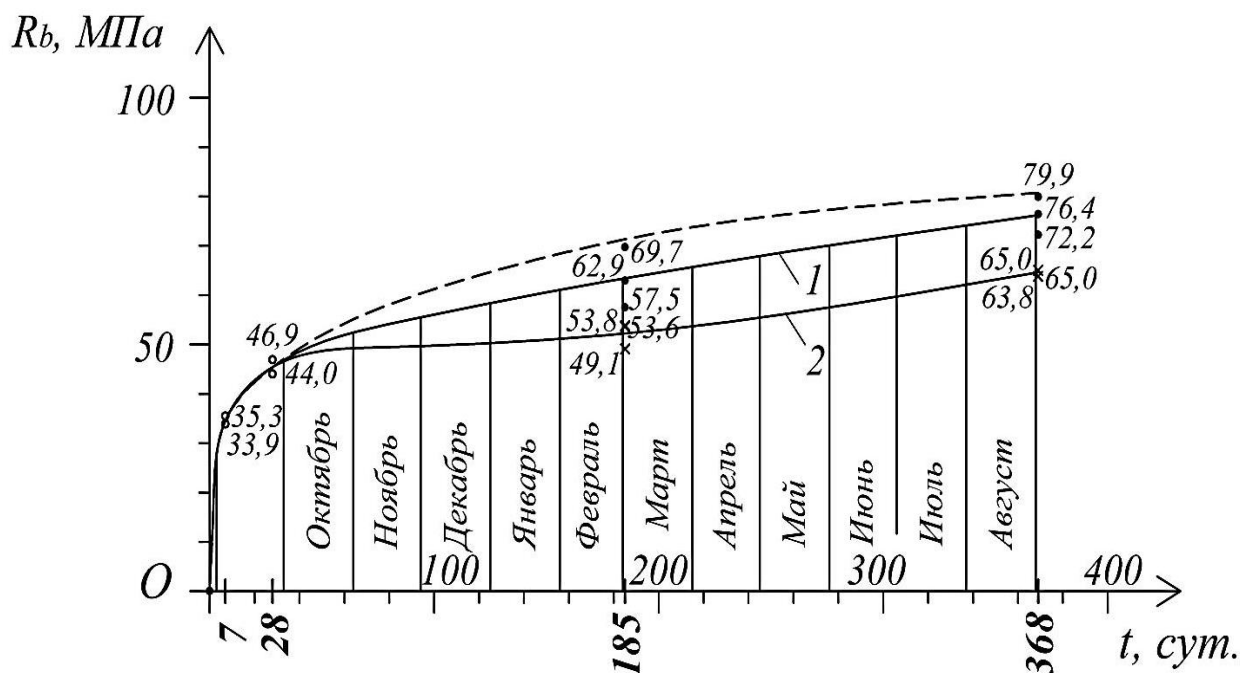
Заметно, что значения прочности кубов, выдержанных в благоприятных условиях очень близки к теоретическим (6 %-11 % различие), в то время как кубы, выдержанные в изменчивых условиях строительной площадки далеки от расчётных значений (20 %-27 % различия).

Выводы по второй главе (часть 2)

Прочности кубов, полученные испытанием, близки к тем, которые ранее были предположены расчётом через логарифмическую зависимость. Значит, что при благоприятных условиях рост прочности тяжелого бетона в целом удовлетворительно описывается этой самой логарифмической зависимостью, более точное прогнозирование возможно при введении поправочных коэффициентов. В условиях строительной площадки указанную зависимость применять не допускается.

Глава 3 Сравнение результатов оценки серий образцов

Заполним общий журнал, где для наглядности будут указаны результаты всех испытаний и теоретических расчетов и представим результаты в графическом виде (рисунок 24, таблица 12).



- — зависимости, построенные по усредненным экспериментальным данным (1 — благоприятные условия твердения (б.у.); 2 — условия, приближенные к строительной площадке (с.п.));
- - - - - теоретическая зависимость, полученная по формуле (1);
- 35,3 — экспериментальные данные для образцов серии н.у., испытанных в возрасте 7 и 28 суток, МПа;
- 62,9 и × 49,1 — экспериментальные данные для образцов серии б.у. и с.п. соответственно, испытанных в возрасте 185 и 368 суток, МПа

Рисунок 24 — Кривые нарастания прочности бетона во времени

Таблица 12 – Общий журнал испытаний при определении прочности кубов на сжатие

Дата изготовления образцов	Маркировка серии образцов	Нормируемые характеристики прочности бетона. Проектный класс бетона по прочности	Дата испытания контрольных образцов	Характеристика образца			Результаты испытания			Прочность образцов в серии (теор. расчет), МПа
				масса, г	размеры, см	средняя плотность, кг/м ³	разрушающая нагрузка, кН	прочность образца, приведенная к базовому размеру, МПа	средняя прочность образцов в серии, МПа	
1	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12
28.08. 2018 г.	$R^{7\text{ сут}}$	B30, W12, F300	4.09. 2018 г.	2505	10×10×10	2505	38100 кгс = 373,7 кН	35,3	34,6	–
				2495		2495	36390 кгс = 356,8 кН	33,9		
	$R^{28\text{ сут}}$		25.09. 2018 г.	2500		2500	47230 кгс = 463,2 кН	44,0	45,5	–
				2490		2490	50340 кгс = 493,7 кН	46,9		
	$R_{\text{с.п.}}^6$		01.03. 2019 г.	2500		2500	57500 кгс = 563,9 кН	53,6	52,2	71,1
				2485		2485	57750 кгс = 566,3 кН	53,8		
				2485		2485	52750 кгс = 517,3 кН	49,1		
				2500		2500	74850 кгс = 734,0 кН	69,7		
	$R_{\text{н.у.}}^6$			2480		2480	61750 кгс = 605,6 кН	57,5	63,4	
				2463		2463	67500 кгс = 662,0 кН	62,9		
				2460		2460	69750 кгс = 684,0 кН	65,0		
	$R_{\text{с.п.}}^{12}$		31.08. 2019 г.	2475		2475	68500 кгс = 671,8 кН	63,8	64,6	80,7
				2470		2470	69750 кгс = 684,0 кН	65,0		
				2477		2477	85750 кгс = 840,9 кН	79,9		
	$R_{\text{н.у.}}^{12}$			2480		2480	77500 кгс = 760,0 кН	72,2	76,2	
				2450		2450	82000 кгс = 804,2 кН	76,4		

Заметно, что кривая серии б.у. по очертанию соответствует общеизвестной (нормативной) кривой длительного набора прочности тяжелого бетона, что позволяет судить о правдивости эксперимента. Экспериментальные значения прочностных показателей отклоняются от теоретических значений в меньшую сторону, что объясняется 70-и процентными влажностными условиями выдерживания образцов-кубов (ранее в главе 1 было отмечено, что рост прочности бетона в сухой среде будет недостаточным) – в данном случае недостаток воссозданной влажности небольшой.

Зависимость, построенная по данным испытания образцов серии с.п., по очертанию значительно отличается от известной теоретической зависимости и также кривой серии б.у. В период от 28 суток до 6 месяцев прирост прочности у кубов серии с.п. ниже, чем в последующее время от 6 до 12 месяцев. Это объясняется длительным воздействием отрицательных температур на образцы-кубы именно в отрезке времени 28 суток-6 месяцев хранения.

Кубы серии с.п. находились в условиях строительной площадки в течение 339 дней. За это время было отмечено 127 дней, во время которых среднесуточная температура опускалась ниже значения 0 °С, 34 дня с температурой ниже минус 10 °С и 88 дней с благоприятной среднесуточной температурой выше плюс 17 °С. Так же за это время 18 дней шел дождь (в том числе 5 дней сильного дождя и 7 дней грозы), 31 день шел снег (в том числе 26 дней снегопада).

Несмотря на высокую относительную влажность наружного воздуха в период времени 6-12 месяцев, решающее воздействие на набор прочности бетона оказали температуры – около четырех месяцев, как заметно из графика, среднесуточные температуры держались ниже 0 °С. Процесс гидратация цементного камня в это время замедлялся и практически прекратился на целый месяц, когда температуры опустились ниже минус 10 °С (рисунок 25).

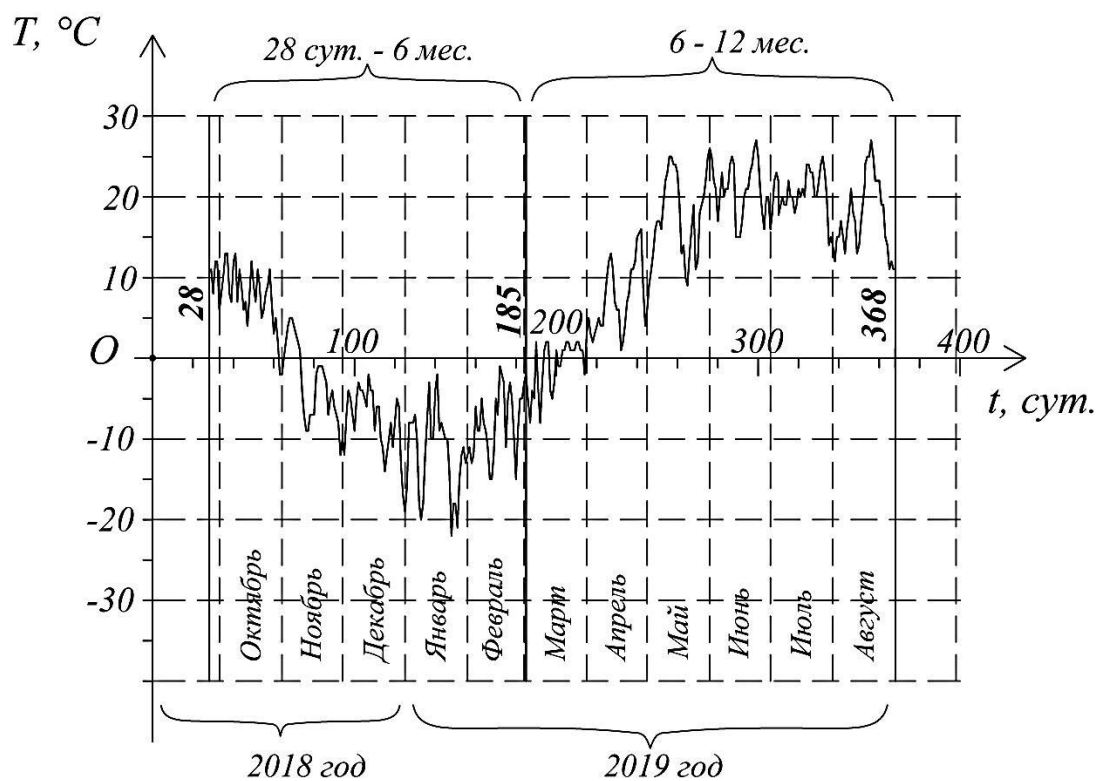
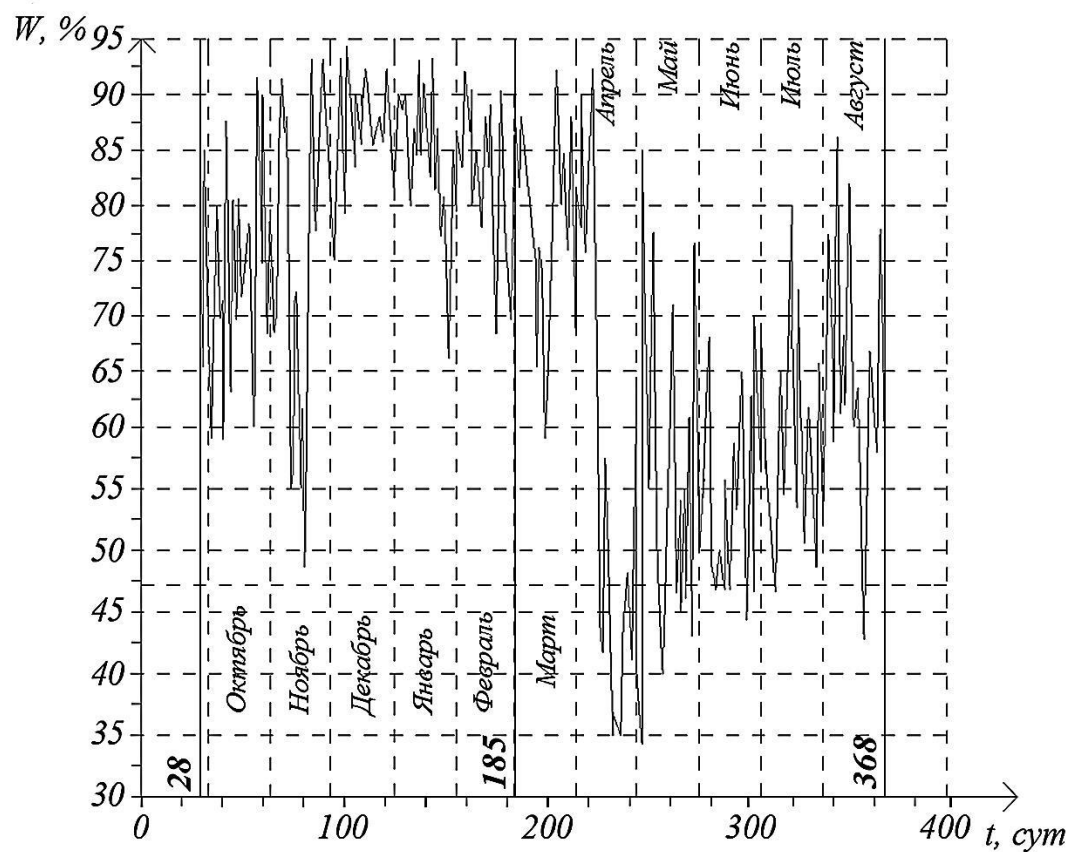


Рисунок 25 – Температурно-влажностные условия выдерживания образцов-кубов серии с.п. (построено по данным сайта weatherarchive.ru [29] по среднесуточным значениям для города Тольятти)

На сводном графике (рисунок 24) видна зависимость набора прочности бетона от условий его хранения (ухода), а именно температурно-влажностного режима. Различие в условиях хранения дало разницу в 11-12 Мпа в экспериментальных результатах между сериями б.у. и с.п., которая сохранилась на весь период проведения эксперимента.

Общеизвестно, что рост прочности бетона замедляется с увеличением его возраста, по результатам испытаний можно оценить и этот факт. Относительную интенсивность набора прочности бетона можно представить как:

$$V = \frac{\Delta R_b}{\Delta t}, \text{ Мпа/сут} \quad (9)$$

где ΔR_b – изменение прочности бетона за временной промежуток Δt , Мпа;

Δt – время набора соответствующей прочности, сут.

Тогда относительная интенсивность набора прочности бетона за первые 28 суток будет составлять:

$$V^{28 \text{ сут}} = \frac{45,5}{28} = 1,63 \text{ Мпа/сут} \quad (10)$$

Аналогичным образом были найдены значения для всех четырех серий образцов для двух промежутков времени. Примем за единицу – значение скорости набора прочности за первые 28 суток (то есть $V^{28 \text{ сут}}$), тогда найденные относительные интенсивности сравнительно этого значения будут:

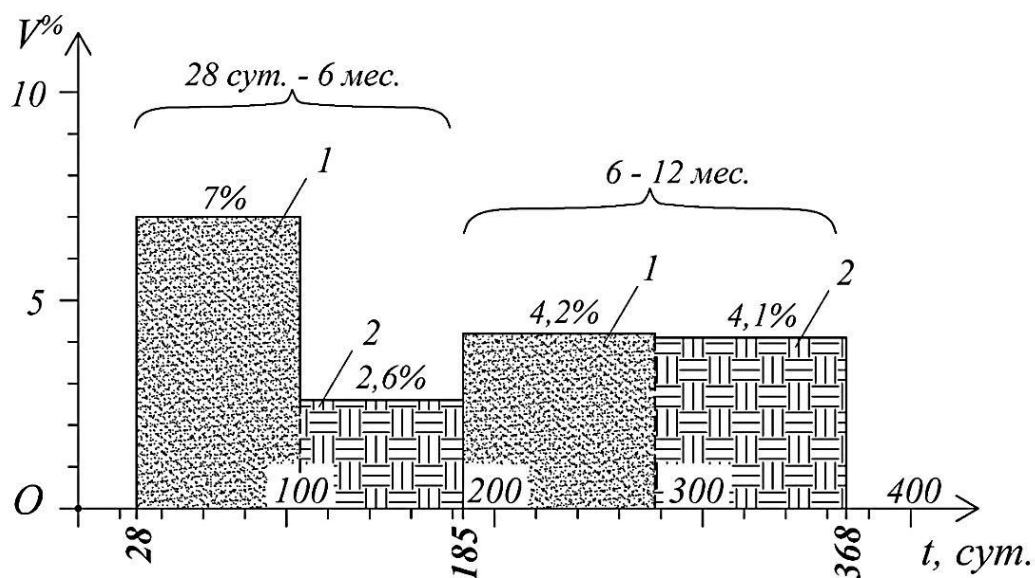
$$V\% = \frac{\Delta R_b / \Delta t}{R^{28} / 28} \times 100, \% \quad (11)$$

Результаты приведены в таблице 13 и наглядно на рисунке 26.

Таблица 13 - Относительная интенсивность набора прочности

Проектный класс бетона по прочности, МПа	Маркировка серии образцов	Оцениваемое время набора прочности, сут	Средняя прочность кубов, набранная за промежуток времени, МПа	Относительная интенсивность набора прочности	
				(V), Мпа/сут	(V%), %
1	2	3	4	5	6
В30, W12, F300	$R^{28 \text{ сут}}$	28	45,5	1,63	100
	$R_{\text{с.п.}}^6$	157	6,7	0,043	2,6
	$R_{\text{б.у.}}^6$		17,9	0,114	7,0
	$R_{\text{с.п.}}^{12}$	183	12,4	0,068	4,1
	$R_{\text{б.у.}}^{12}$		12,8	0,070	4,2

Примечание — Значения указаны без учета первых 28 суток для значений прочности кубов, полученных через 6 месяцев после изготовления и без учета первых 6 месяцев (в том числе 28 суток) для значений прочности, полученных через 12 месяцев после изготовления кубов.



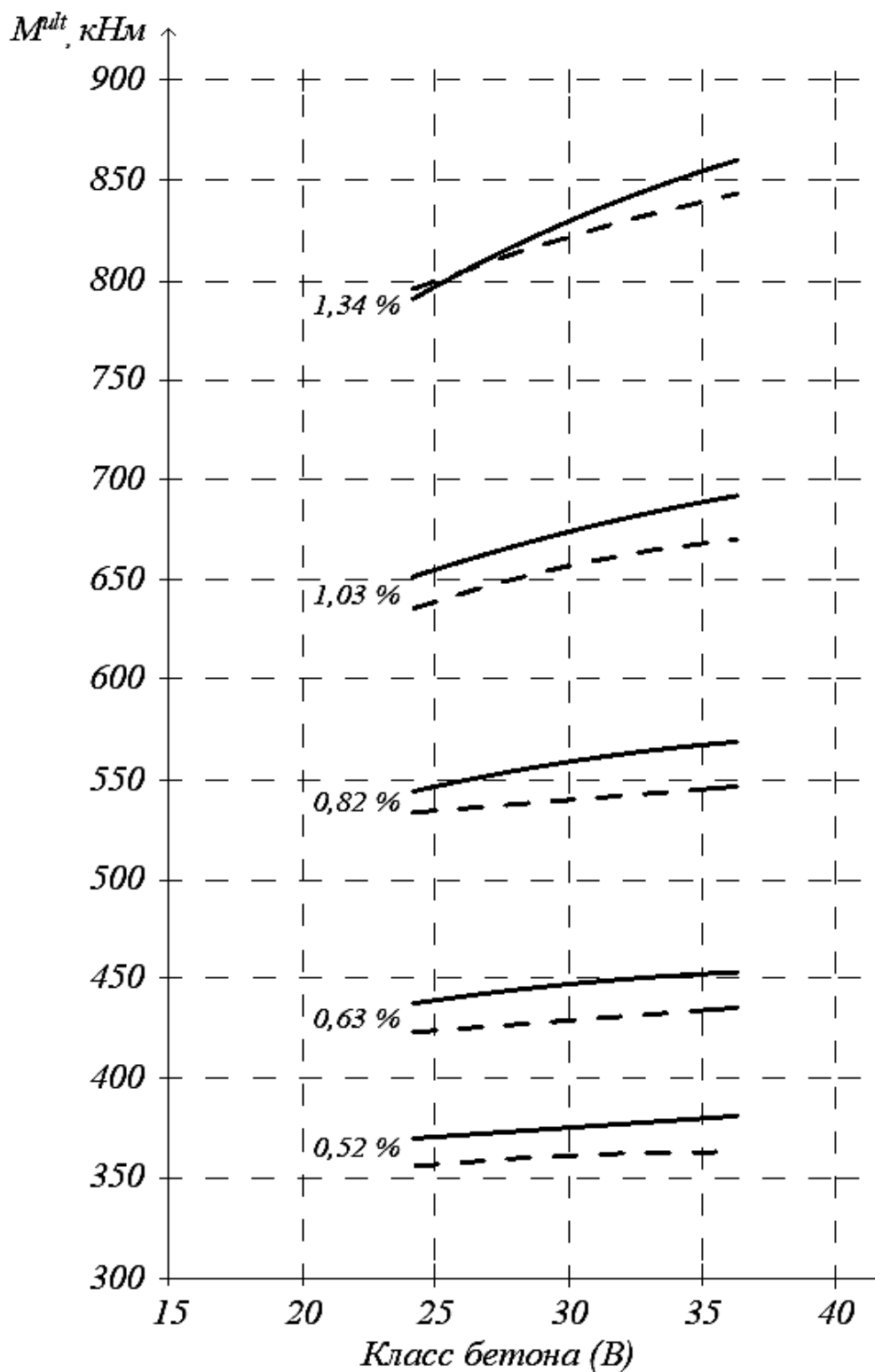
1 – серия б.у.; 2 – серия с.п.

Рисунок 26 – Относительная интенсивность набора прочности бетона в промежутки времени 28 суток-6 месяцев и 6-12 месяцев в различных температурно-влажностных условиях хранения образцов

Заметно, что для образцов серии б.у. относительная интенсивность набора прочности бетона ($V\%$) составила 7% за период с 28 суток до 6 месяцев и 4,2 % за второй период проведения эксперимента с 6 до 12 месяцев. Для образцов серии с.п. эти значения оказались равными 2,6 % и 4,1 % соответственно, то есть в условиях строительной площадки с переменчивым температурно-влажностным режимом возможно резкое падение интенсивности набора прочности бетона на ранних стадиях твердения с последующим увеличением интенсивности набора прочности бетона в более поздние благоприятные периоды. При этом в последующий период с 6 до 12 месяцев относительная интенсивность набора прочности бетона двух серий оказалась очень близка (серия б.у. – 4,2 %, серия с.п. – 4,1 %), что опять же объясняется увеличением температур в положительную сторону в этот период времени проведения эксперимента. Компенсации «недобора» прочности не произошло и в дальнейшем ожидать не следует. Прочность бетона серии с.п. к возрасту 12 месяцев достигла 64,6 МПа., которому соответствует значение прочности бетона серии б.у. в возрасте 6 месяцев.

Практическое значение длительного набора прочности бетона было оценено в статье, посвященной вопросу влияния прочности бетона на несущую способность железобетонных элементов [30].

В статье приводятся результаты численной оценки влияния прочности бетона на несущую способность изгибаемого железобетонного элемента (ригеля) при различных процентах армирования. Для решения поставленной задачи были использованы два подхода: расчет по предельным усилиям и расчет по деформационной модели. Результаты расчетов по деформационной модели и по методу предельных усилий показали очень близкие результаты, что подтверждает целесообразность использования деформационного метода в расчетах изгибаемых железобетонных элементов. Результаты расчетов представлены ниже (рисунок 27).



————— — результаты расчетов по методу предельных усилий;
 - - - - - — результаты расчетов по деформационной модели;
 1,34 % — процент армирования конструкции, заданный для расчета

Рисунок 27 – Зависимость предельного изгибающего момента от роста прочности бетона ригелей с различным армированием

По результатам расчетов, проделанных для статьи, были сделаны выводы, что несущая способность сечения элемента зависит от процента его армирования и от роста прочности бетона, причем рост несущей способности был интенсивнее у тех элементов, у которых процент армирования был выше. Например, конструкция с процентом армирования 1,34 % более чувствительная к изменению (росту) прочности бетона, в то время как несущая способность конструкции с процентом армирования 0,52 % изменилась несущественно.

Выводы по третьей главе

Проведенные экспериментальные исследования позволили количественно оценить изменение прочности бетона в различных условиях хранения только для тяжелого бетона одной прочности и требуют проведения дополнительных экспериментов.

П. 6.1.5 СП 63.13330-2018 гласит, что проектный возраст бетона назначается исходя из возможных реальных сроков загрузки конструкции проектными нагрузками, при возможности учета способа возведения конструкций и самих условий твердения бетона. Если таковые данные отсутствуют, то класс бетона устанавливается в возрасте 28 суток (что обычно и происходит) [31]. Значит, что в сфере строительства возможно получать большую прочность зданий с меньшими затратами на класс бетона, если этому бетону поддерживать определенные условия набора прочности. Другой вопрос, что данная возможная экономия должна быть предварительно просчитана, так как мероприятия по долговременному уходу за бетонными конструкциями могут оказаться более затратными и трудоемкими, чем нынешние методы ведения строительства.

Заключение

1. Длительный набор прочности бетона определяется продолжительным процессом гидратации цементного камня.

2. При благоприятных условиях рост прочности тяжелого бетона в целом удовлетворительно описывается известной логарифмической зависимостью, точное прогнозирование возможно при введении поправочных коэффициентов. В условиях строительной площадки указанную зависимость применять не допускается.

3. В условиях проведенного экспериментального исследования к 368 суткам твердения тяжелый бетон серии б.у. и с.п. набрал прочность 167 % и 142 % от $R^{28 \text{ сут}} = 45,5 \text{ Мпа}$ соответственно.

4. Прочность бетона в конкретном возрасте в условиях строительной площадки ниже, чем при выдерживании в благоприятных условиях.

5. В условиях строительной площадки при знакопеременных температурных колебаниях интенсивность набора прочности с возрастом может увеличиваться.

6. Аналитически установлено, с повышением процента армирования изгибаемого элемента отмечается более интенсивное увеличение несущей способности за счет роста прочности бетона.

7. При отрицательных температурах скорость набора прочности тяжелого бетона замедляется и приостанавливается, при дальнейшем повышении температуры до положительных значений интенсивность набора прочности повышается лишь до уровня интенсивности набора прочности образцов того же возраста, выдерживаемых в благоприятных условиях.

8. В сфере строительства возможно получать большую прочность бетона с меньшими затратами на его изготовление, однако мероприятия по долговременному уходу за бетонными конструкциями могут оказаться более затратными, чем нынешние методы ведения строительства.

Список используемой литературы и используемых источников

1. ГОСТ 26633-2015 Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. – Введ. 2016-09-01. – М.: Стандартинформ, 2017.
2. ГОСТ 23732-2011 Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. – Введ. 2012-10-01. – М.: Стандартинформ, 2012.
3. Влияние условий твердения на прирост прочности бетона [Электронный ресурс] / Е.У. Еркебаева, А.И. Сарсен. – Электрон. журн. – Бешкек: Международный университет инновационных технологий, 2016. – Режим доступа: , свободный. – статья в журнале – научная статья (elibrary).
4. Prediction of Compressive Strength of Concrete in Wet-Dry Environment by BP Artificial Neural Networks [Электронный ресурс] / Chengyao Liang, Chunxiang Qian, Huaicheng Chen, Wence Kang. – Электрон. журн. – China: Hindawi, 2018. – Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2018/6204942/>, свободный. – Advances in Materials Science and Engineering.
5. Температурные деформации бетона при твердении в реальных условиях [Электронный ресурс] / Б.А. Усов, Г.Э. Окольникова. – Электрон. журн. – Москва: Учреждение высшего образования "Институт системных технологий, 2015. – Режим доступа: , свободный. – статья в журнале – научная статья (elibrary).
6. Долговечность строительных материалов: учеб. пособие / В.Н. Вернигорова, С.М. Саденко. – Пенза: ПГУАС, 2016. – 220 с.
7. Effects of Elevated Temperatures on Mechanical's concrete specimen behaviour [Электронный ресурс] / Nesrine Khodja, Hadda Hadjab. – Электрон. журн. – Algiers: MATEC Web Conf, 2018. – Режим доступа: https://www.mateconferences.org/articles/matecconf/abs/2018/24/matecconf_fatigue2018_22010/matecconf_fatigue2018_22010.html, свободный. – International Fatigue Congress.

8. Experimental Analysis on Shrinkage and Swelling in Ordinary Concrete [Электронный ресурс] / Barbara Kucharczyková, Petr Daněk, Dalibor Kocáb, Petr Misák. – Электрон. журн. – Brno, Czech Republic: Hindawi, 2017. – Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2017/3027301/>, свободный. – Brno University of Technology.

9. СП 28.13330.2012 Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85 (с Изменениями N 1, 2). – Введ. 2013-01-01. – М.: Минрегион России, 2012.

10. Статья «Производство бетонных работ в условиях сухого и жаркого климата» из категории «Технологии»: <http://www.arhplan.ru/technology/concreting/production-in-conditions-dry-and-hot-climate>.

11. Статья «Особенности бетонирования в условиях сухого и жаркого климата» из категории «Технологии»: <http://www.arhplan.ru/technology/concreting/osobennosti-betonirovaniya-v-usloviyah-suhogo-i-zharkogo-klimata>.

12. Статья «Особенности производства бетонных работ в Северной климатической зоне» из категории «Технологии»: <http://www.arhplan.ru/technology/concreting/features-concrete-works-in-northern-zone>.

13. Статья «Особенности производства бетонных работ в Северной климатической зоне» из категории «Технологии»: <http://www.arhplan.ru/technology/concreting/features-concrete-works-in-northern-zone>.

14. Статья «Производство бетонных работ в зимних условиях» из категории «Технологии»: <http://www.arhplan.ru/technology/concreting/production-operations-in-winter-conditions>.

15. ГОСТ 25192-2012 Бетоны. Классификация и общие технические требования. – Введ. 2013-07-01. – М.: Стандартинформ, 2013.

16. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – Введ. 2013-07-01. – М.: Стандартиформ, 2018.
17. ГОСТ 22685-89 Формы для изготовления контрольных образцов бетона. Технические условия. – Введ. 1990-01-01. – М.: Стандартиформ, 2006.
18. ГОСТ 15150-69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды (с Изменениями N 1, 2, 3, 4, 5). – Введ. 1971-01-01. – М.: Стандартиформ, 2012.
19. Организация контроля прочности бетона монолитных конструкций по образцам. Часть 1 [Электронный ресурс] / С.Н. Коноплёв. – Электрон. журн. – Москва: Композит XXI век, 2015. – Режим доступа:, свободный. – статья в журнале – научная статья (elibrary).
20. ГОСТ 10181-2014 Смеси бетонные. Методы испытаний. – Введ. 2015-07-01.- М.: Стандартиформ, 2019.
21. ГОСТ 18105-2018 Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. – Введ. 2012-09-01. – М.: Стандартиформ, 2018.
22. ГОСТ 7473-2010 Смеси бетонные. Технические условия (с Поправкой). – Введ. 2012-01-01. – М.: Стандартиформ, 2018.
23. Early-Age Evolution of Strength, Stiffness, and Non-Aging Creep of Concretes: Experimental Characterization and Correlation Analysis [Электронный ресурс] / Mario Ausweger, Eva Binder, Olaf Lahayne, и др. – Электрон. журн. – Vienna: Materials, 2019. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/2/207/htm>, свободный. – Vienna University of Technology.
24. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – Введ. 2019-01-09. – М.: Стандартиформ, 2019.
25. ГОСТ 12730.1-78 Бетоны. Методы определения плотности. – Введ. 1980-01-01. – М.: Стандартиформ, 2018.

26. ГОСТ 22690-2015 Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. – Введ. 2016-04-01. – М.: Стандартинформ, 2016.

27. Методы экспериментальных исследований строительных конструкций. Определение физико-механических свойств строительных конструкций современными приборами: учеб. пособие / М.В. Арискин, С.А. Болдырев; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.П. Скачкова. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 80 с.

28. The influence of surface opening cracks on the ultrasonic waves near the surface in concrete members [Электронный ресурс] / Wan-Yue Zheng, Qing-bang Han, XUE-ping Jiang. – Электрон. журн. – Jiangsu: MATEC Web Conf, 2018. – Режим доступа: https://www.mateconferences.org/articles/matecconf/abs/2018/101/matecconf_ica fmc2018_01017/matecconf_ica fmc2018_01017.html, свободный. – College of Internet of Things Engineering.

29. Погода в Тольятти [Электронный ресурс]: Weatherarchive – История погоды. – Режим доступа: <http://weatherarchive.ru/Temperature/Tolyatti/> 2018 (дата обращения: 16.04.2020).

30. Ровенская Е.А. К вопросу оценки влияния прочности бетона на несущую способность железобетонных элементов / Е.А. Ровенская, Д.С. Тошин // Молодой исследователь: вызовы и перспективы: сб. ст. по материалам СХЛ Международной научно-практической конференции «Молодой исследователь: вызовы и перспективы». – № 40(140). – М., Изд. «Интернаука», 2019.

31. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М.: Минстрой России, 2013. – 175 с.