на правах рукописи

Ромкин Денис Сергеевич

ВЛИЯНИЕ ВОЗРАСТА ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА НА ЕГО ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Специальность 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2010 г.

Работа выполнена в Учреждении Научно-исследовательский институт строительной физики Российский академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН).

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Николай Иванович Карпенко

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Алексей Николаевич Петров

кандидат технических наук
Евгений Николаевич Кузнецов

Ведущая организация ОАО «ЦНИИПромзданий»

Защита состоится «26» октября 2010 г. в 15^{00} часов на заседании диссертационного совета Д 007.001.01 при Учреждении Научно-исследовательский институт строительной физики Российский академии архитектуры и строительных наук по адресу: 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-техническом фонде НИИСФ РААСН.

Автореферат разослан «23» сентября 2010 г.

Ученый секретарь совета И.Л. Шубин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время в практике строительства (особенно высотного) начинают находить все более широкое применение высокопрочные бетоны. В основном они используются для вертикальных несущих конструкций зданий (колонн, ядер жесткости), что позволяет уменьшить размеры и процент армирования сечений конструкций, а также увеличить полезную площадь здания. Развитие технология строительных работ позволило значительно ускорить возведение зданий, в результате чего нагружение железобетонных конструкций происходит в «молодом» возрасте бетона. Однако, физико-механические и реологические (усадка, ползучесть) характеристики таких бетонов, в различном возрасте, остаются еще слабо исследованными. Работа направлена на ликвидацию этого пробела. В качестве высокопрочного бетона был выбран бетон, разработанный в лаборатории «Химических добавок и модифицированных бетонов» НИИЖБ. В отличие от бетонов, приготовленных по традиционной технологии, исследуемый бетон при высоком классе по прочности (В80 – В100) обладает высокой подвижностью смеси (П4 – П5) и соответственно высокой удобоукладываемостью. Благодаря этим свойствам бетон уже получил широкое распространение в высотном строительстве (на ММДЦ «Москва-Сити»).

Цель диссертационной работы

Разработка и совершенствование теоретических зависимостей по описанию деформаций ползучести, усадки и изменения физико-механических характеристик высокопрочного бетона в зависимости от его возраста.

Задачи диссертационной работы:

1. Проведение комплексных экспериментальных исследований по определению полного спектра физико-механических и реологических характеристик высокопрочных бетонов.
2. Изучение изменения основных физико-механических (модуль упругости, кубиковая и призменная прочность на сжатие, прочность на растяжение) характеристик в процессе твердения бетона.
3. Описание меры ползучести в зависимости от возраста бетона, времени нагружения и уровня нагружения и сопоставление теоретических зависимостей с данными эксперимента.
4. Описание «обратной» ползучести бетона.
5. Проверка принципа наложения воздействий при догрузках и разгрузках.
6. Определение влияния нагружения в молодом возрасте различной интенсивности на прочностные и деформативные характеристики бетона.

Автор защищает:

1. Результаты комплексных экспериментальных исследований физико-механических и реологических характеристик модифицированных

высокопрочных бетонов различного возраста, начиная с 3 сут., при кратковременных и длительных нагрузках и их теоретическое обобщение.

2. Записи меры ползучести исследуемых бетонов в области линейного и нелинейного деформирования в молодом и зрелом возрасте, начиная с первых часов нагружения, изменение меры ползучести при разгрузках.

3. Усовершенствованную форму записи нелинейной меры ползучести при помощи функции нелинейности.

4. Изменение прочности, модуля упругости и диаграмм «$\sigma - \varepsilon$» для высокопрочного бетона в зависимости от его возраста. Влияние нагружения бетона в различном возрасте на его основные физико-механические характеристики в старом возрасте.

5. Особенности применения принципа наложения воздействий для высокопрочного бетона различного возраста при нагрузках и разгрузках.

Научную новизну работы составляют:

1. Экспериментальные данные по прочностным и деформативным характеристикам модифицированных высокопрочных бетонов различного возраста при кратковременных и длительных нагрузках, в том числе и при сложных режимах нагружения.

2. Аналитические зависимости по описанию роста прочности и модуля упругости бетона в зависимости от возраста (от 3-х до 640 сут.) и нормируемых значений его характеристик в возрасте 28 сут.

3. Развитие существующих мер ползучести применительно к новым высокопрочным бетонам различного возраста (начиная с 3 сут.), установленные значения параметров этих мер в зависимости от возраста бетона и уровня напряжений.

4. Выявленные ограничения и особенности представления меры ползучести в виде произведения линейной меры на функцию уровня напряжений.

5. Меры ползучести при разгрузке, с учетом необратимости нелинейных деформаций ползучести и частичной необратимости быстронатекающих деформаций линейной ползучести бетона в молодом возрасте.

Практическая ценность:

1. Разработаны рекомендации по определению основных физико-механических и реологических характеристик модифицированных высокопрочных бетонов, как в молодом так и в зрелом возрасте. Это позволит произвести нормирование свойств материала, оптимизировать принимаемые проектные решения и расширить применение исследуемого бетона в высотном строительстве.

2. Выявлено влияние нагружения в раннем возрасте на основные физико-механические и реологические свойства бетона, что позволит учитывать стадийность возведения зданий и сооружений при проектировании.

Внедрение результатов

Полученные данные нашли применение при строительстве высотных зданий на ММДЦ «Москва-Сити» и проектировании высотного комплекса

«Охта-Центр» в г. Санкт-Петербург.

Апробация работы и публикации

Основные положения диссертации опубликованы в шести научных статьях, в том числе в трех изданиях, рекомендованных ВАК, и доложены на двух конференциях: Международной конференция «Строительная физика в XXI веке», Москва, 2006 г; доклад на конференции МГСУ «О новых методах расчета зданий из монолитного железобетона с учетом изменения свойств бетона в процессе возведения», ноябрь 2009 г.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа изложена на 140 страницах компьютерного текста, включает 21 таблицу, 98 рисунков, список литературы из 128 наименований, 1 приложение.

Настоящая работа выполнена в 2006 – 2010 гг. в НИИСФ РААСН под руководством академика РААСН, д.т.н., проф. Н. И. Карпенко, при непосредственной помощи и консультации по технологии бетонов д.т.н., проф. С. С. Каприелова, к.т.н. А. В. Шейнфельда. Экспериментальные исследования были проведены в лаборатории №9 «Проблем прочности и качества в строительстве» НИИСФ РААСН. Автор выражает глубокую благодарность И. М. Безгодову за практическую помощь и консультации при проведение экспериментов.

Достоверность полученных результатов

Достоверность работы основана на тщательном соблюдении в экспериментальных исследованиях и их обработке требований ГОСТ 10180-90, ГОСТ 24452-80 и ГОСТ 24544-81 по определению физико-механических и реологических характеристик бетонов, а также «Методических рекомендаций по исследованию, усадки и ползучести бетона», разработанных в НИИЖБ ведущими специалистами страны в области бетонов. Теоретическая часть опирается на фундаментальные положения современной теории ползучести бетона и сопоставление результатов расчета с данными экспериментов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулирована цель и задачи, изложена научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава

В первой главе изложено состояние вопроса, проведен обзор теоретических и экспериментальных исследований проведенных в нашей стране и за рубежом.

Отечественными и зарубежными учеными до настоящего времени были подробно изучены физико-механические и реологические свойства бетонов, в том числе и высокопрочных. Результаты исследований физико-механических характеристик представлены в работах отечественных ученых: О.Я. Берга,

Р.А. Мельника, В.И. Сытника, Н.В. Свиридова, А.Я. Пацули, В.И. Федорчук, И.И. Лубенец, Е.Н. Щербаков, Л.П. Макаренко, Е.М. Бабича, Н.А. Колесниковой, О.М. Попковой, Н.И.Катина, Ю.Н.Хромца, А.И.Рожкова и др.

Исследованию реологических свойств (ползучесть и усадка) бетонов посвящено также много работ. Были проведены большие экспериментальные исследования, разработаны теории линейной и нелинейной ползучести. Основные результаты этих исследований содержаться в работах: С.В. Александровского, Н.Х. Арутюняна, О.Я. Берга, В.М. Бондаренко, П.И. Васильева, К.З. Галустова, А.А. Гвоздева, А.Б. Голышева, Ю.В. Зайцева, И.Е. Прокоповича, Р.С. Санжаровского, И.И. Улицкого, Ц.Н. Цилосани, Е.Н. Щербакова, А.В. Ящина и многих других ученых. Стоит отметить, что все эти исследования проводились на бетонах рядовой прочности, и как правило, приготовленных по традиционной технологии. В настоящее время на смену жестких смесей приходят высокопрочные модифицированные бетоны, которые уже получили широкое распространение в высотном строительстве. Изучением данных бетонов занимались: С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, М.Г Булгакова, Я.Л. Вихман, Ф.А. Иссерс, В.Г. Батраков, Е.С. Силин, а также американские специалисты Р.Г. Борг и Б.В. Ост.

Обобщая описанные исследования, можно сделать вывод, что все современные теории ползучести построены на основе обобщения опытов проведенных на бетонах рядовой прочности и изготовленных по традиционной технологии. Новые высокопрочные бетоны изучены не достаточно полно, отсутствуют экспериментальные исследования проведенные в молодом возрасте бетона (до 28 сут.). Таким образом, для создания наиболее точной теории деформирования нового бетона необходимы дополнительные экспериментальные и теоретические исследования, в том числе и в молодом возрасте.

Вторая глава

Во второй главе описывается программа и методика экспериментальных исследований, а также представлены результаты кратковременных и длительных испытаний.

В соответствие с поставленными задачами исследования была разработана программа длительных (рис. 1) и кратковременных испытаний (табл. 1). Всего было забетонировано **96** образцов размером 10х10х40, из них **60** – для длительного испытания; **36** – для кратковременного испытания.

Таблица **1**

Календарный план кратковременных испытаний

Вид испытания	Возраст, сут							
	3	7	14	28	60	180	360	630
Сжатие	х	х	х	х	х			х
Изгиб		х	х	х				х
Растяжение				х		х	х	

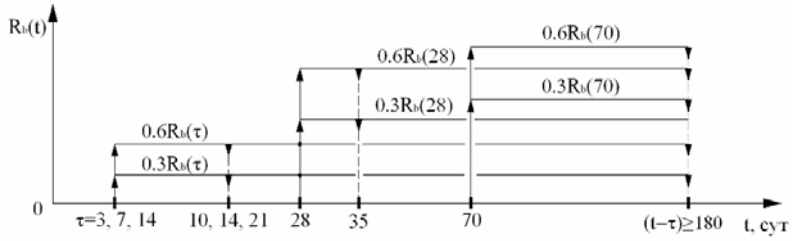

Рисунок 1 - Программа длительных испытаний

Методика экспериментальных исследований. Состав исследуемого бетона представлен в табл. 2. Бетонирование образцов проходило на строительной площадке, в лаборатории, расположенной в строящимся ММДЦ «Москва-Сити». Исходя из имеющейся материально-технической базы основные исследования было решено проводить на призмах размером 10х10х40 см, что допускается стандартом. Изготовление образцов было выполнено в соответствии с ГОСТ 24452-80 «Бетоны. Методы определения призменной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона». Все образцы были изготовлены из одного замеса. После бетонирования, до распалубки (первые сутки), они находились в помещении с температурой +20±5°С, накрытые слоем полиэтиленовой пленки. После распалубки образцы помещались в камеру нормальных условий, где хранились до момента их испытания.

Таблица 2

Состав бетона

Цемент, кг/м^3	МБ10-30С, кг/м^3	Песок, кг/м^3	Щебень фр.5-10, кг/м^3	Щебень фр.10-20, кг/м^3	Вода, кг/м^3
497	109	707	358	641	128

Длительные испытания проводились на гидроизолированных образцах по следующей схеме. В возрасте 3, 7 и 14 сут. выделялось 4 серии образцов. Первая серия, после предварительного определения призменной прочности, загружалась до уровня $0.3R_b$ и $0.6R_b$ и в дальнейшем не подвергалась догрузки или разгрузки. Вторая серия образцов загружалась также до уровня $0.3R_b$ и $0.6R_b$ и через 7 сут. разгружались. Третья серия образцов после нагрузки теми же уровнями догружалась в возрасте 28 сут. до соответствующего для данного возраста относительного уровня $0.3R_b$ и $0.6R_b$. Четвертая серия образцов была предназначена для определения деформаций усадки бетона. В возрасте 28 сут. образцы были разбиты на 3 серии. Первая серия, после определения призменной прочности загружалась до $0,3R_b$ и $0,6R_b$, и до конца эксперимента не разгружалась, вторая серия после нагрузки на те же уровни через 7 сут. разгружалась. Третья серия предназначалась для оценки деформаций усадки. В возрасте 60 сут. образцы состояли из двух серий, одна из которых

предназначалась для нагрузки до уровней $0.3R_b$ и $0.6R_b$, а другая для оценки деформаций усадки. Все загруженные образцы выдерживались под нагрузкой не менее 180 сут., затем разгружались и регистрировались деформации последействия в течении 3-х месяцев. После окончания длительных испытаний и наблюдения деформаций последействия, ранее загруженные образцы и образцы для замера температурно-усадочных деформаций были испытаны кратковременной сжимающей нагрузкой.

Третья глава

В третьей главе проведено теоретическое обобщение результатов кратковременных испытаний, построены теоретические зависимости для определения основных физико-механических характеристик бетона в любом возрасте (начиная 3 сут.), описано влияние на них нагружения в раннем возрасте, выполнено описание диаграмм сжатия бетона по методике Н.И. Карпенко.

Рост прочности и модуля упругости. Кратковременные испытания в раннем возрасте выполнялись на сжатие, изгиб и растяжение, в возрасте 3, 7, 14, 28 и 66 сут. Средняя призменная прочность по истечению 28 сут. составила 90 МПа (рис. 2), однако по мере старения бетона набор прочности продолжался, и к 66 сут. прочность составила 102 МПа (прирост прочности достиг +13% по сравнению с прочностью в 28 сут.). Показано, что рост прочности на сжатие в зависимости от возраста бетона хорошо описывается модифицированной формулой Е.Н. Щербакова:

для сжатия
$$R_{bn}(t_0) = R_{bn}(28)\left[1 + \frac{23}{55+B}\left(\frac{t_0-28}{t_0+5}\right)\right], \qquad (1)$$

для растяжения
$$R_{btn}(t_0) = R_{btn}(28)\left[1 + \frac{23}{75+B}\left(\frac{t_0-28}{t_0+1}\right)\right]^{0,6}, \qquad (2)$$

где t_0 - возраст бетона (t_0 = 3, 7, 14, 28, 66 сут.); B – класс бетона в возрасте t_0 = 28 сут; $R_{bn}(28)$ и $R_{btn}(28)$ - значение прочностей на сжатие и растяжение соответственно в возрасте 28 сут.

Прочность на растяжение в возрасте 28 сут. равна 6.4 МПа, что составляет 5.3% от прочности на сжатие. Коэффициент призменной прочности у исследуемого бетона превысил значение, принятое в нормативных документах (СП 52-101-2003), и составил 0.75 против 0.72. Коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона) составил 0.24. Рост модуля упругости практически остановился к возрасту 66 сут. (рис. 3) и составил 47.13×10^3 МПа, что не значительно (≈1%) выше его значения в 28 сут. 46.67×10^3 МПа.

Для определения значения модуля упругости в любом возрасте рекомендуется пользоваться формулой (3), которая подобрана на основе эмпирических данных:

$$\mathrm{E}_{bn}(t_0) = \mathrm{E}_{bn}(28)\left[1 + \frac{23}{55+\mathrm{B}}\left(\frac{t_0-28}{t_0+5}\right)\right]^{0,3}, \qquad (3)$$

где B – класс бетона для возраста t_0=28 сут.; $E_{bn}(28)$ - значение модуля упругости в возрасте 28 сут.

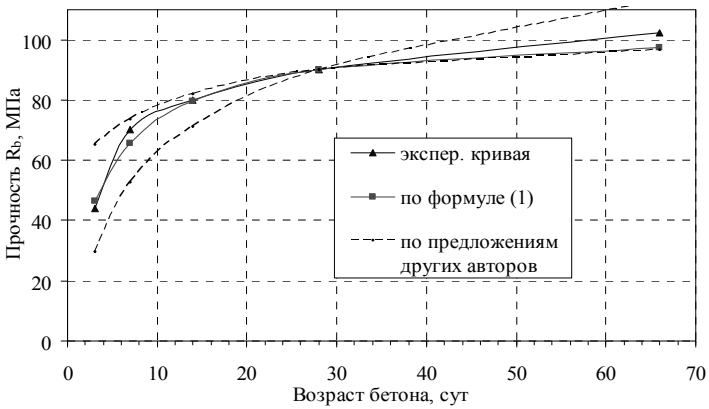

Рисунок 2 - Изменение призменной прочности в зависимости от возраста бетона

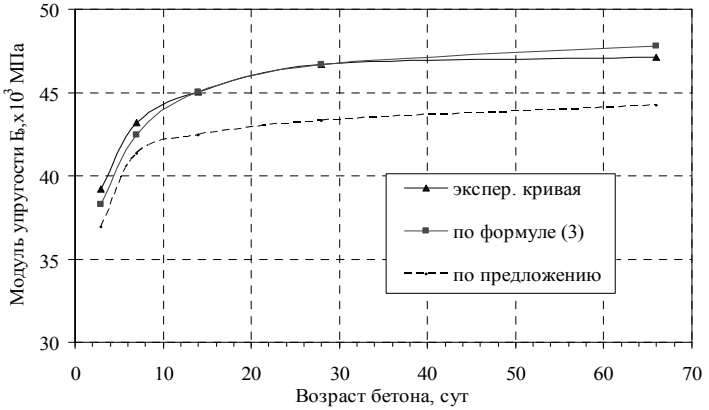

Рисунок 3 - Изменение модуля упругости в зависимости от возраста бетона

Диаграммы деформирования бетона при сжатии. Теоретическая обработка диаграмм деформирования бетона при сжатии была проведена по методике Н.И. Карпенко. Эта методика была разработана для описания диаграмм деформирования тяжелого бетона рядовой прочности. В данном исследовании было необходимо проверить применимость данной методики для описания диаграммы деформирования высокопрочного модифицированного бетона. Одним из основных параметров, влияющим на точность описания диаграммы, являются предельные деформации сжатия бетона. В данной работе рассмотрены несколько вариантов нахождения предельных деформаций и

показано, что наилучшее совпадение с результатом эксперимента дает формула предложенная С. Н. Карпенко (4):

$$\varepsilon_b = -200 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt[7]{\frac{R_b}{R_0}}\ , \qquad (4)$$

где R_0 - эталонное значение равное 20 МПа.

Предельные продольные деформации сжатия в вершине диаграммы, полученные по формуле (4) составили 248x10^{-5}, что наиболее близко к экспериментальным равным 254x10^{-5}. Методика Н. И. Карпенко позволяет теоретически описать экспериментальные кривые с высокой точностью, при условии использования значений предельных деформаций сжатия близких к экспериментальным.

Влияние длительного нагружения бетона в раннем возрасте на основные физико-механические свойства. Для определения влияния длительного нагружения на основные физико-механические свойства была использована следующая методика. Образцы «близнецы», изготовленные из одного замеса, нагружались длительной нагрузкой различной интенсивности $0.3R_b$ и $0.6R_b$, от призменной прочности на момент нагружения[1], в возрасте 3, 7, 14, 28 и 70 сут. Затем, после выдерживания под постоянной нагрузкой в течении не менее 180 сут., образцы разгружались и определялись основные физико-механические характеристики (призменная прочность R_b, модуль упругости E_b, коэффициент Пуассона μ и предельные продольные деформации в вершине диаграммы $\varepsilon_{прод}$), одновременно с образцами которые не были нагружены. Испытания всех образцов проходили в возрасте 620 - 640 сут. Полученные значения сравнивались со значениями для предварительно ненагруженных образцов.

Влияние длительного нагружения на призменную прочность представлено на рис. 4. Стоит отметить, что явно отрицательный характер выражен при самом раннем нагружение образцов (в 3 сут.), потери прочности составляют в среднем ≈21%. При нагружении образцов в более позднем возрасте (7 сут. и старше) отрицательный характер сказывается меньше и потеря прочности составляет в среднем 4%.

Влияние длительного нагружения в раннем возрасте на модуль упругости носит более выраженный характер (рис. 5). Максимальное снижение модуля, соответствующее нагружению в возрасте 3 сут., составило ≈14%. При нагружении в более позднем возрасте (28 и 60 сут.) с меньшим уровнем ($0.3R_b$) наблюдалось незначительное увеличение модуля упругости (до 5%). В целом характер влияния длительного нагружения на модуль упругости носит отрицательный характер, особенно при нагружении в молодом возрасте (до 28 суток) и при высоких уровнях напряжений ($\geq 0.6R_b$).

Длительное нагружение в раннем возрасте ведет к значительному

---

[1] Например, в 3 сут. при призменной прочности 44 МПа одна серия образцов нагружалась до уровня $0.3R_b$ – 13.2 МПа, вторая до уровня $0.6R_b$ – 26.4 МПа. Данный уровень нагрузки поддерживался до конца испытаний.

увеличению коэффициента Пуассона. Это практически не зависит от уровня или времени нагружения. Средний его рост составляет ≈31% (исключая образцы, загруженные в 3 сут. уровнем $0.3R_b$). Указанный фактор приводит к изменению диаграммы объемного деформирования бетона, смещая внутреннюю границу трещинообразования до уровня $0.7R_b$. Предварительное нагружение различной интенсивности ведет к незначительному снижению предельных деформаций в вершине диаграммы, примерно на 7%.

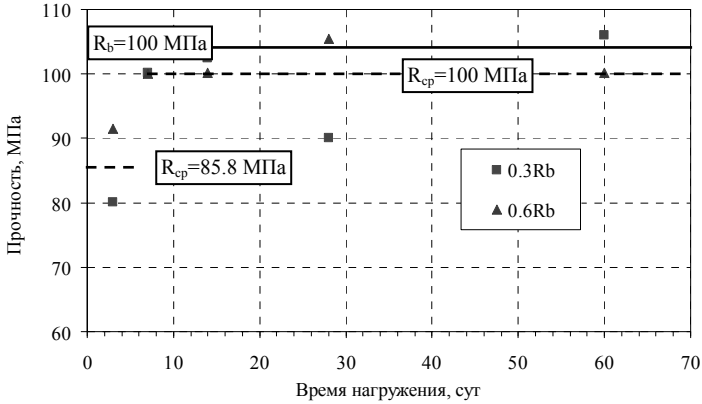

Рисунок 4 - Влияние длительного нагружения на призменную прочность

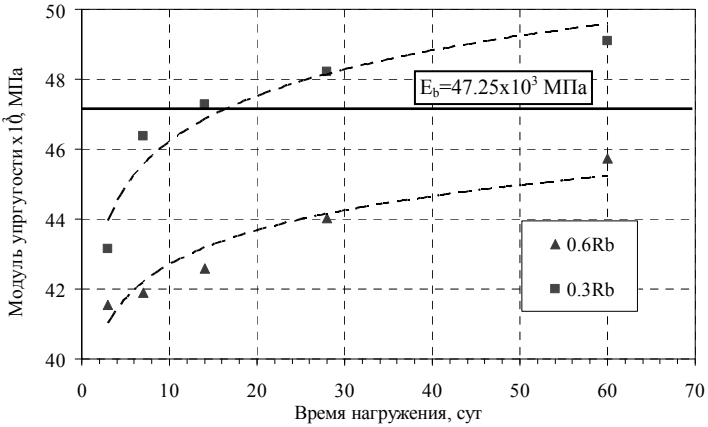

Рисунок 5 - Влияние длительного нагружения на модуль упругости

Четвертая глава

В четвертой главе проведено теоретическое обобщение результатов длительных испытаний. Произведено описание деформаций усадки, предложены различные варианты описания деформаций ползучести, в том числе при сложных режимах нагружения, включающих догрузки и полную

разгрузку бетона.

Описания деформаций усадки. Для теоретического описания деформаций усадки предлагается использовать формулу:

$$\varepsilon_{bs}\left(t,t_w\right)=\varepsilon_{bs}\left(\infty,t_w\right)\cdot\left[1-e^{-\alpha\left(t-t_w\right)}\right]\cdot\left[\frac{A}{e^{\gamma\left(t-t_w\right)}}+1\right] \qquad (5)$$

где γ, α и A - безразмерные параметры, подбираемые из условия наилучшего совпадения экспериментальных и теоретических кривых деформаций усадки.

Их значения соответственно равны 0.035, 0.018 и 2. Особенностью исследуемого бетона является быстрый рост деформаций усадки в первые сутки твердения (к 10 сут. хранения деформации усадки составляют 63% от максимальных). Для более точного описания усадки, подбор параметров для формулы (5) был выполнен заново. Значения параметров составили γ=0.07, α=0.024 и A=3. Сопоставление теоретических и экспериментальных данных показало хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных.

Изменение предельных деформации и мер ползучести. На рис. 6 показаны экспериментальные зависимости предельной меры ползучести от времени нагружения. Из графика видно, что в «молодом» возрасте (t<28 сут.) зависимость носит явно нелинейный характер, а после 28 сут. влияние нелинейности практически отсутствует и график принимает линейный вид.

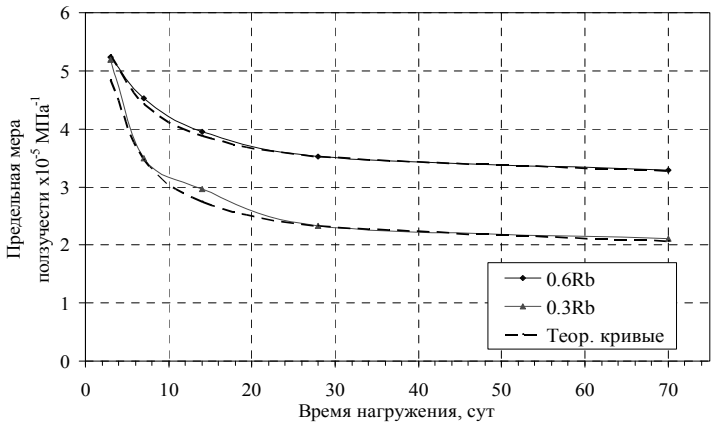

Рисунок 6 - Экспериментальные и теоретические зависимости предельной меры ползучести от времени нагружения

Для описания данной зависимости предлагается формула в виде:

$$C(\eta,\infty,\tau)=C(\eta,\infty,28)\cdot\left[1+\frac{A}{C+B}\left(\frac{t-28}{t+D}\right)\right]^n, \qquad (6)$$

где A, C, D, n - безразмерные параметры; B - класс бетона по прочности; $C(\eta,\infty,28)$ - функция изменения предельной меры ползучести бетона в возрасте

28 сут. в зависимости от уровня напряжения. Неизвестные параметры подбираются из условия наилучшего совпадения теоретических и экспериментальных данных, при этом значения функции $C(\eta,\infty,28)$ принимались по данным эксперимента.

Теоретическая обработка мер простой ползучести. До настоящего момента, для описания деформаций ползучести использовались зависимости, которые были подобраны на основании аппроксимации (с той или иной точностью) экспериментальных данных. В данной работе рассматривается подход, предложенный В.М. Бондаренко. В его основе лежит решение уравнения вида:

$$\frac{dC_0(t,t_0)}{[\Delta C_0(t,t_0)]^m} = \alpha dt \tag{7}$$

Дальнейшее развитие эта теория получила в совместной работе В.М. Бондаренко и Н.И. Карпенко, где подход (7) был распространен на бетон любого возраста τ, и учтена нелинейная ползучесть в зависимости от уровня напряжений η. В результате предложенных дополнений формула (7) преобразуется к виду:

$$\frac{d\left[C_0(\eta,t,\tau)\right]}{[\Delta C_0(\eta,t,\tau)]^m} = -\alpha \tilde{t}^{\,s} d\tilde{t}\,, \tag{8}$$

$$\Delta C_0(\eta,t,\tau) = \frac{C_0(\eta,\infty,\tau) - C_0(\eta,t,\tau)}{C_0(\eta,\infty,\tau) - C_0(\eta,\tau,\tau)}\,, \tag{9}$$

где $C(\eta,\infty,\tau)$ - предельная мера простой ползучести бетона; $C\ (\eta,t,\tau)$ - текущая мера; $C\ (\eta,\tau,\tau)$ - начальный вертикальный отрезок меры ползучести бетона (дефицит меры ползучести); $\tilde{t} = t/\tau$ - относительное время нагружения; α, m - безразмерные эмпирические коэффициенты, которые зависят от τ, η и вида бетона. В результате решения уравнения (8) получим:

$$C\ (\eta,t,\tau) = C\ (\eta,\infty,\tau) - \left[\frac{C(\eta,\infty,\tau) - C(\eta,\tau,\tau)}{\left[1+\alpha\frac{m-1}{s+1}\left(\tilde{t}^{\,s+1}-1\right)\right]^{\frac{1}{m-1}}}\right]. \tag{10}$$

Результаты теоретического описания мер ползучести по формуле (10), представленные в виде графиков (рис. 7 – 9, пунктирная линия – теоретические значения; сплошная - экспериментальные данные) показали, что экспериментальные и теоретические кривые, при установленных в работе коэффициентах для формулы (10), согласуются с высокой точностью в том числе и на начальных участках (при $(t-\tau)\leq 1$ сут.).

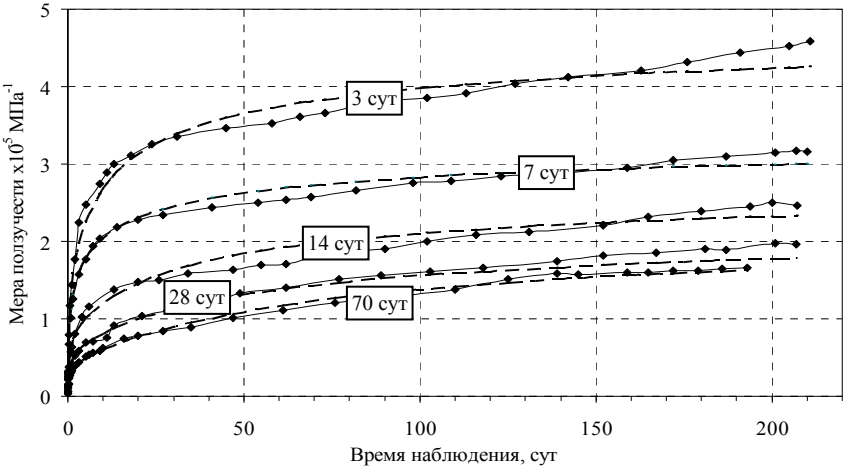

Рисунок 7 - Изменение меры ползучести, экспериментальные и теоретические данные для уровня нагружения $0.3R_b$

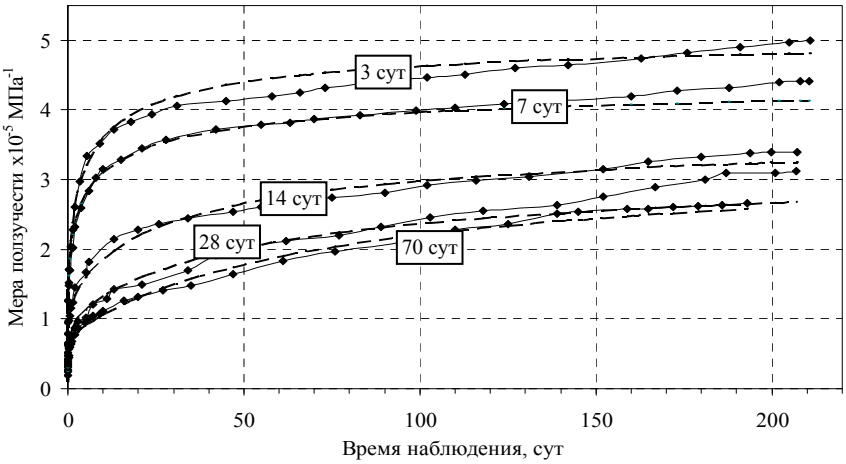

Рисунок 8 - Изменение меры ползучести, экспериментальные и теоретические данные для уровня нагружения $0.6R_b$

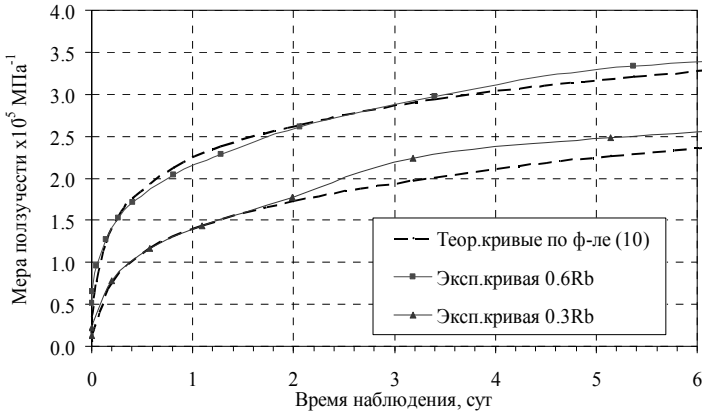

Рисунок 9 - Изменение меры ползучести, на примере образцов загруженных в 3 сут. (начальный участок кривой первые 6 сут.)

Таблица 3

Значение коэффициентов для формулы (10)

Начало нагружения, сут.	Параметр							
	s		α		m		α'	
	$0.3R_b$	$0.6R_b$	$0.3R_b$	$0.6R_b$	$0.3R_b$	$0.6R_b$	$0.3R_b$	$0.6R_b$
3	3	2.5	7	14	12	8	19	28
7	2	2	15	30	8	7	35	60
14	7	7	50	100	18	17	106	200
28	9	9	50	100	21	21	100	200
70	21	21	100	200	24	24	105	209

Установленные значения коэффициентов для формулы (10) представлены в табл. 3. Можно отметить следующие закономерности:

- коэффициенты s и m зависят только от времени нагружения τ и не зависят от уровня напряжений, и в общем случае являются непрерывными функциями τ (рис. 10).
- коэффициент α зависит как от уровня нагружения η, так и от времени нагружения τ (рис. 11).
- значение коэффициента α прямо пропорционально уровню напряжений, имеет место пропорция:

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}. \qquad (11)$$

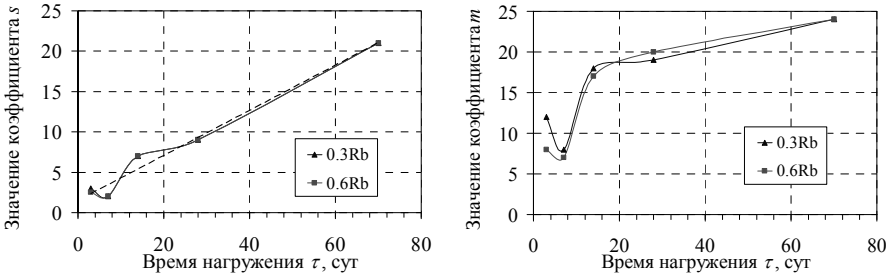

Рисунок 10 - Изменение коэффициентов s (слева) и m (справа) в зависимости от τ

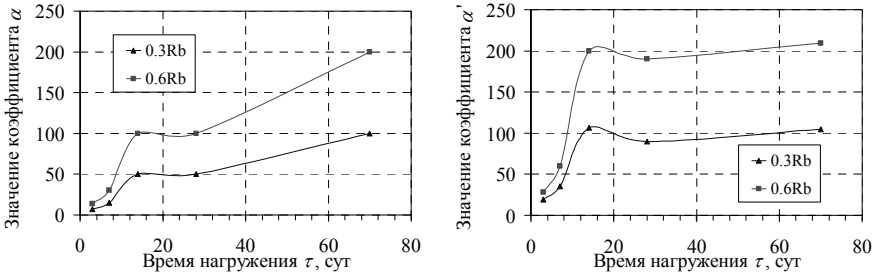

Рисунок 11 - Изменение коэффициентов α (слева) и α' (справа) в зависимости от τ

На основании анализа изменения коэффициентов входящих в формулу (10), рекомендуем, для упрощения записи данной формулы, принять замену в виде:

$$\alpha \frac{m-1}{s+1} = \alpha' . \tag{12}$$

При этом с небольшой погрешностью (<5%) на конечный результат, можно считать, что соотношение (11) справедливо и для α' (рис. 11). Тогда формула (10) примет вид:

$$C_0(\eta,t,\tau) = C_0(\eta,\infty,\tau) - \left[\frac{C_0(\eta,\infty,\tau) - C_0(\eta,\tau,\tau)}{\left[1+\alpha'\left(\tilde{t}^{\,s+1}-1\right)\right]^{\frac{1}{m-1}}} \right] . \tag{13}$$

Обобщая полученные результаты можно дать следующие рекомендации для нахождения коэффициентов:

- для определения коэффициента α': если $3 \le \tau < 14$ сут., рекомендуется определять значение α' при помощи линейной интерполяции значений приведенных в табл. 3; если $\tau \ge 14$ сут., использовать его значения как при $\tau = 14$ сут.;

- для определения коэффициента s и m, если $\tau \leq 70$ сут. можно использовать линейную интерполяцию значений предложенных в табл. 3, а при $\tau > 70$ сут., принимать их значения, соответствующие $\tau = 70$ сут.

Усовершенствование описания нелинейных мер ползучести при помощи функции нелинейности. В традиционной постановке нелинейная мера ползучести записывается в виде:

$$C(\eta, t, \tau) = f(\eta, \tau) \cdot C'(t, \tau), \tag{14}$$

$$f(\eta, \tau) = \frac{C_{0.6}(\eta, t.\tau)}{C_{0.3}(t, \tau)}, \tag{15}$$

где $C(\eta, t, \tau)$ – текущая мера ползучести; $f(\eta, \tau)$ – функция нелинейности; $C'(t, \tau)$ – линейная мера ползучести.

Однако, на основании экспериментальных данных было показано, что значения функции нелинейности приближаются к устойчивому (постоянному) значению для значений (t-τ) лишь через ≈16 сут. (рис. 12, область 2). Первые 16 сут. выражение (15) приводит к существенно переменным значениям на отрезке (t-τ)<16 (рис. 12, область 1). Для ослабления указанного эффекта и увеличения точности описания меры ползучести на начальных участках кривой, предлагается записывать формулу (14) в виде:

$$C(\eta, t, \tau) = f(\eta, \tau) \cdot C'(t, \tau) + \Delta C, \tag{16}$$

$$f(\eta, \tau) = \frac{C_{0.6}(\eta, t, \tau) - \Delta C}{C_{0.3}(t, \tau)}, \tag{17}$$

где ΔC - разность мер ползучести, которая возникает из-за сильной нелинейности деформаций ползучести в первые сутки нагружения (до 2 сут.). Такая форма записи нелинейной меры ползучести позволила сократить область неустойчивых значений до (t-τ)=2 сут. (рис. 12, область 3).

Как показал анализ экспериментальных данных, минимальные значения этой области можно свести к (t-τ)≤2 сут., подобрав значение ΔC для (t-τ)=2 (на основании сравнения изменения мер ползучести для уровней нагружений $0.3R_b$ и $0.6R_b$). В табл. 4 приведены значения ΔC для бетона нагруженного в разном возрасте, уровнями $0.3R_b$ и $0.6R_b$.

Таблица 4

Значения ΔC и ν_b^* при (t-τ)=2 сут. и $\eta = 0.6$

	Возраст бетона, сут.				
	3	7	14	28	70
ΔC, x10^{-5} МПа$^{-1}$	0.527	0.440	0.325	0.194	0.120
ν_b*	0.80	0.83	0.87	0.92	0.95

Значение ΔC можно учитывать, присоединяя их к условно мгновенным деформациям, которые в сумме составят:

$$\varepsilon_{\mathrm{b}}^{*} = \frac{\sigma}{E_b \cdot \nu_b} + \sigma \cdot \Delta C = \frac{\sigma}{E_b \cdot \nu_b^{*}}, \tag{18}$$

где ν_b - секущий модуль реальных нелинейных мгновенных деформаций; ν_b* - секущий модуль условных нелинейных мгновенных деформаций (с учетом присоединенных к ним деформаций $\Delta C \cdot \sigma$). Из формулы (18) следует:

$$\nu_b^{*} = \frac{\nu_b}{1 + \Delta \mathrm{C} \cdot \mathrm{E_b} \cdot \nu_b}, \tag{19}$$

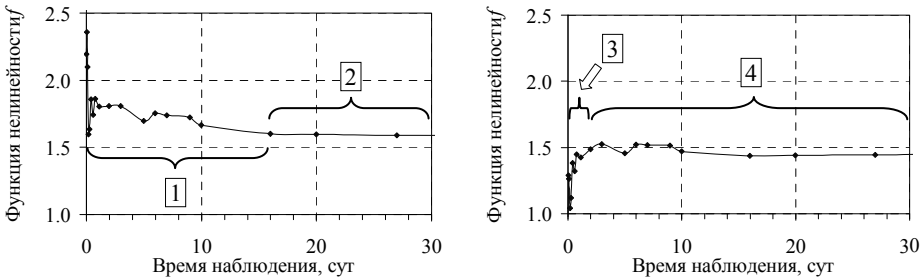

Рисунок 12 - Изменение функции нелинейности, на основании экспериментальных данных (формула (15) – слева, формула (17) - справа)

Значения ν_b*, соответствующие найденным значениям ΔC, приведены в табл. 4. Для аппроксимации значений ν_b* рекомендуем пользоваться формулой вида:

$$\nu_b^{*} = \left(1 - \frac{4}{\tau + 17}\right) \cdot f(\eta) \cdot \tag{20}$$

Функция нелинейности в формуле (16) принята по предложению И.Е. Прокоповича:

$$f(\eta) = 1 + V \cdot \eta^{m}, \tag{21}$$

где η - уровень напряжений; m - степень нелинейности, которая зависит от возраста и вида бетона (m=4 для тяжелых видов бетона и m=1,5 для мелкозернистых бетонов); V – коэффициент, зависящий от вида бетона.

Для распространения данной функции на бетон молодого возраста формула (21) представляется в виде:

$$f(\eta, \tau) = 1 + V(\tau) \cdot \eta(t). \tag{22}$$

Значения $V(\tau)$ определялись исходя из наилучшего совпадения экспериментальных и теоретических данных. При определении функции $V(\tau)$ принимался коэффициент нелинейности m=4. Найденная функция имеет вид:

$$V(\tau) = V_{28} \cdot \left(1.2 - \frac{7}{\tau + 3}\right), \tag{23}$$

где V_{28} - эталонное значение коэффициента, найденное для бетона в возрасте 28 сут. и равное 3,55. На рис. 13 показаны экспериментальные и теоретические кривые, построенные по изложенной выше теории.

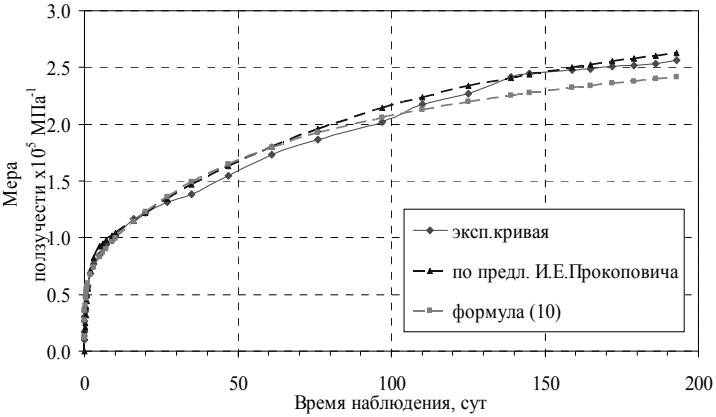

Рисунок 13 - Изменение мер ползучести образцов загруженных в возрасте 70 сут. уровнем $0.6R_b$

В качестве линейной меры принимались, как формула (10), так и формулы, предложенные И.Е. Прокоповичем, после их необходимой адаптации к исследуемому бетону (24-26).

$$C(t,t_0) = C(\infty;28)\cdot\Omega(t_0)\cdot f(t,t_0)\,, \tag{24}$$

$$\Omega(t_0) = 0{,}9 + d\cdot e^{(-10\gamma_1 t_0)}\,, \tag{25}$$

$$f(t,t_0) = 1 - D\cdot e^{-a_1\cdot(t-t_0)} - B\cdot e^{-\gamma_1\cdot(t-t_0)}\,, \tag{26}$$

где $C(\infty;28)$ - предельное значение линейной меры ползучести бетона загруженного в возрасте 28 сут. (принимается как для уровня $0.3R_b$); $\Omega(t_0)$ - функция, учитывающая старение бетона; $f(t,t_0)$ - функция, учитывающая развитие деформаций ползучести во времени.

Описание деформаций ползучести при разгрузке. Для определения деформаций ползучести при разгрузке образцы были испытаны по следующей схеме (рис. 1): нагружение в возрасте τ_y уровнями напряжений $0.3R_b(\tau)$ и $0.6R_b(\tau)$, выдержка в течении 7 сут. и полная разгрузка в возрасте τ_y +7 сут.

Теоретически, деформаций ползучести вычислялись использую основной принцип ПНВ, согласно которому на ветви разгрузки получим:

$$\varepsilon^*(\eta,\tau,t) = \sigma\cdot\left[C(\eta_1,\tau_1,t\ ) - C(\eta_2,\tau_2,t\ )\right], \tag{27}$$

где $\varepsilon^*(\eta,\tau,t)$ - текущее значение деформаций ползучести; $C(\eta_1,\tau_1,t)$ - мера ползучести на участке сжатия, для времени нагружения τ_1(3, 7, 14, 28 сут.) и η_1($0.3R_b$ и $0.6R_b$); $C(\eta_2,\tau_2,t)$ - мера ползучести на участке полной разгрузки, для τ_2(10, 14, 21, 35 сут.) и η_2=0. Стоит отметить, что экспериментальные значения

мер ползучести при нагрузке и разгрузке оказались различными. В работе рассмотрены и проанализированы разные способы учета этого фактора и выработаны следующие рекомендации:

1. В случае, если мера ползучести записывается в виде (10), то при определении ее значений на участке полной разгрузки, необходимо умножить соответствующею меру ползучести при нагрузке на отношение предельной меры ползучести при разгрузке к аналогичной мере при нагрузке.

$$C_{разгр}(\eta,\tau,t\ ) = \frac{C_{разгр}(\eta,\tau,\infty)}{C_{нагр}(\eta,\tau,\infty)} \cdot C_{нагр}(\eta,\tau,t)\,, \tag{28}$$

здесь $C_{нагр}(\eta,\tau,t)$ записывается в виде (10).

2. Если для записи меры ползучести используется функции вида (16), а линейная мера ползучести вычисляется по предложению И.Е. Прокоповича, то величину $C(\infty;28)$ следует определять при разгрузке, функцию нелинейности $f(\eta,\tau)$ принимать равной 1, значение параметра ΔC принимать 0.05×10^{-5} МПа$^{-1}$ для низкого уровня ($\eta \leq 0.3R_b$) и 0.1×10^{-5} МПа$^{-1}$ для высокого ($0.3R_b < \eta \leq 0.6R_b$).

Определение деформаций ползучести при ступенчато возрастающих режимах нагружения. Для определения деформаций ползучести при ступенчато возрастающих напряжениях было рассмотрено два варианта нахождения деформаций. Первый вариант, основывается на ПНВ и применительно к двухступенчатым режимам нагружения, показанным на рис. 1, записывается в виде:

$$\varepsilon(t,\tau_0) = \sigma_0 C_0(\eta_0,t,\tau_0) + (\sigma_1 - \sigma_0) C_0(\eta_1,t,\tau_1)\,. \tag{29}$$

Второй вариант, не согласующийся с ПНВ:

$$\varepsilon(t,\tau_0) = \sigma_0 C_0(\eta_0,t,\tau_0) + \left[\sigma_1 C_0(\eta_1,t,\tau_1) - \sigma_0 C_0(\eta_0,t,\tau_1)\right]. \tag{30}$$

Наряду с разной формой записи основных уравнений, рассмотрены разные формы записи мер ползучести, в виде (10) и (16), при этом в (16) в качестве линейной меры ползучести использовались как формула (10), так и формулы (24-26).

Анализируя полученные результаты можно сделать следующие выводы:

- форма записи ПНВ в виде (29) хорошо согласуется с экспериментальными данными в области линейной ползучести ($\eta \leq 0.3R_b$) и в области нелинейной ползучести ($\eta = 0.6R_b$), при (σ_1-σ_0)$\leq 0.1\ R_b$;
- в области нелинейной ползучести ($\eta = 0.6R_b$) и при (σ_1-σ_0)$\geq 0.1\ R_b$ формула (29) приводит к существенному занижению деформаций ползучести и лучшее согласование с опытом дает запись в виде (30).

Вычисление коэффициентов ползучести по СНиП 2.03.01-84*. На основании экспериментальных данных были вычислены коэффициенты φ_{b1} и φ_{b2}, входящие в формулы СНиП 2.03.01-84*. Эти коэффициенты характеризуют соответственно кратковременную (быстронатекающую) ползучесть и длительную (полную) деформацию ползучести. В данной работе за

быстронатекающие деформации ползучести были приняты деформации, накопленные за первые 2 сут. наблюдения. В условиях центрального сжатия, полные деформации бетона определяются по формулам:

$$\varepsilon_1 = \frac{N}{\varphi_{b1} \cdot F \cdot E_b}, \tag{31}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{N \cdot \varphi_{b2}}{\varphi_{b1} \cdot F \cdot E_b}. \tag{32}$$

где ε_1 - деформации бетона от кратковременных нагрузок, ε_2 - деформации бетона от длительных нагрузок, F - площадь сечения, E_b - модуль упругости бетона, N - сжимающее усилие.

Результаты вычисления показали, что коэффициент ползучести исследуемого бетона (за данный коэффициент принято отношение $\varphi_{b2}/\varphi_{b1}$ при t=28 сут. при уровне напряжений $0.6R_b$) оказался равный 2.44, что сопоставимо со значением в СНиП 2.03.01-84* равным 2.35. Однако раннее нагружение приводит к увеличению данного параметра.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ:

1. Проведено комплексное экспериментальное исследование основных физико-механических свойств высокопрочного крупнозернистого модифицированного бетона. Исследованы прочностные и деформативные характеристики при кратковременных испытаниях на сжатие, растяжение и изгиб; исследована усадка и ползучесть при сжатии для разных уровней напряжения и разного времени приложения нагрузки, начиная с 3 сут.
2. Получены экспериментальные зависимости изменения основных физико-механических характеристик в процессе старения бетона (начиная с возраста 3 сут.), предложены теоретические зависимости для их описания. Проведено описание диаграммы сжатия бетона.
3. Получены экспериментальные кривые мер ползучести в зависимости от уровня нагружения ($0.3R_b$ и $0.6R_b$) и от возраста образцов, в котором происходило нагружение (от 3 до 70 сут.).
4. Получены экспериментальные кривые деформаций ползучести для сложных режимов нагружения, включая деформации ползучести при разгрузке.
5. Выявлено влияние на основные физико-механические характеристики бетона предварительного длительного нагружения различного уровня.
6. Получены экспериментальные данные и предложено теоретическое описание деформаций усадки нового высокопрочного бетона, начиная с 1 сут. твердения.
7. Осуществлена экспериментальная проверка нового подхода к описанию мер ползучести бетона различного возраста, разработанного В.М. Бондаренко и Н.И. Карпенко. Определены значения неизвестных коэффициентов, входящих в данную формулу, а также предложены варианты их унификации.

8. Выполнена корректировка формулы И.Е. Прокоповича для описания линейной меры простой ползучести для нового высокопрочного бетона.

9. Усовершенствован метод описания нелинейных мер ползучести при помощи функции нелинейности, что позволяет с большей точностью описывать деформации ползучести при $(t-\tau)\geq 2$ сут.

10.Отработана методика определения деформаций ползучести при разгрузке, в зависимости от возраста нагружения, уровня нагружения и различных форм записи мер ползучести.

11. Предложены и проанализированы различные способы определения деформаций ползучести при ступенчато возрастающих режимах нагружения, в том числе не согласующиеся с ПНВ. Определен наиболее подходящий метод.

Основные положения диссертационной работы изложены в шести научных публикациях, в том числе 1, 2 и 3 в изданиях, рекомендованных списком ВАК:

1. Карпенко Н.И., Андрианов А.А., Ромкин Д.С. «О новом подходе к описанию меры ползучести и результатах её экспериментальной проверки». - Academia. Архитектура и строительство №4, Москва, 2008, с. 76-77.
2. Карпенко Н.И., Каприелов С.С., Ромкин Д.С., Безгодов И.М., Андрианов А.А. «Результаты исследования физико-механических и реологических характеристик высокопрочного бетона». - Известия ОрелГТУ выпуск №1/21 (553), Орел 2009.
3. Карпенко Н.И., Ромкин Д.С. «К определению деформаций ползучести высокопрочного бетона при ступенчато возрастающих нагрузках». - Academia. Архитектура и строительство №3, Москва, 2010, с. 559-562.
4. Карпенко Н.И., Ромкин Д.С. «Записи нелинейных мер ползучести с использованием функции нелинейности». - Вестник ОСН РААСН, выпуск №14, Москва-Иваново, 2010.
5. Ромкин Д.С. «Экспериментальные и теоретические исследования мер ползучести и усадки высокопрочных бетонов в различном возрасте». - Вестник ОСН РААСН, выпуск №13, Москва-Орел, 2009.
6. Ромкин Д.С. «Влияние длительного нагружения в раннем возрасте на основные физико-механические свойства бетона». - Вестник ОСН РААСН, выпуск №14, Москва-Иваново, 2010.