

Моисеенко Георгий Александрович

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО СТАЛЕФИБРОБЕТОНА ПРИ
КРАТКОВРЕМЕННОМ И ДЛИТЕЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ И ИХ УЧЕТ
В ДИАГРАММНОМ МЕТОДЕ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность 2.1.1 – «Строительные конструкции, здания и
сооружения»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2023 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН)

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор
Карпенко Николай Иванович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Морозов Валерий Иванович,
профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций
Санкт-Петербургского государственного
архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ)

кандидат технических наук
Ромкин Денис Сергеевич,
главный специалист ООО «Центр Проектных Решений «ФОРМА»

Ведущая организация

АО «ЦНИИПромзданий»

Защита состоится «__» _____ 2023 г. в __ часов на заседании диссертационного совета 39.1.001.01 при НИИСФ РААСН по адресу: 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21, Светотехнический корпус.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-техническом фонде НИИСФ РААСН и на сайте <http://niisf.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 39.1.001.01, к.т.н

И.А. Шмаров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Одним из прогрессивных направлений развития строительной науки является изучение новых конструкционных материалов, обладающих более совершенными по сравнению с традиционными материалами характеристиками и открывающих новые перспективы для строительства. В последнее время все больший интерес вызывает такой материал, как мелкозернистый высокопрочный бетон (МВБ) нового поколения, значения прочности которого значительно превосходят таковые для обычного бетона. Эти свойства достигаются за счет применения новых модификаторов и тонкодисперсности заполнителя. Основной недостаток данного строительного материала – повышенная хрупкость и мгновенный характер разрушения. Одним из путей решения этой проблемы является введение в матрицу бетона стальной фибры в соотношении 1-3% по массе. Такое решение позволяет существенно повысить трещиностойкость и прочность конструкций из высокопрочных бетонов.

Благодаря своим характеристикам высокопрочный сталефибробетон (ВСФБ) может применяться при строительстве таких сложных объектов, как большепролетные мосты, оболочки, высотные сооружения. Однако, широкое применение этого конструкционного материала отчасти ограничивается недостаточным количеством исследований его свойств, в частности, его поведения при длительном действии нагрузок. Способы аналитического описания свойств сталефибробетона повышенной прочности на основе смесей нового поколения с применением комплексных модификаторов еще требуют изучения и дополнения. Исследования ползучести высокопрочного сталефибробетона в нашей стране практически не проводились. Данная работа направлена на устранение этих пробелов.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Часть исследований теоретического и прикладного характера по теме диссертации выполнена в рамках следующих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по планам РААСН:

- «Комплексные экспериментальные и теоретические исследования физико-механических и реологических свойств экономических высокопрочных сталефибробетонов для возведения высоконагруженных конструктивных элементов современных зданий и сооружений» (№ госрегистрации - АААА-А17-117070450051-5);

- «Разработка, исследование и развитие фундаментальных научных основ расчета строительных конструкций из высокопрочного сталефибробетона и мелкозернистого высокопрочного бетона при кратковременном и длительном нагружении» (№ госрегистрации - АААА-А19-119022190133-6);

- «Фундаментальные научные исследования влияния повышенных до 200°С температур на характеристики физико-механических и реологических

свойств высокопрочных модифицированных бетонов классов В70 ÷ В90» (№ госрегистрации - АААА-А19-119060690056-5).

Объект исследования – мелкозернистый высокопрочный бетон класса по прочности на сжатие В120 и полученный на его основе высокопрочный сталефибробетон с минимальным эффективным содержанием выбранного типа стальной фибры при кратковременном и длительном нагружении. **Предмет исследования** – характеристики физико-механических и реологических свойств мелкозернистого высокопрочного бетона класса по прочности на сжатие В120 и полученного на его основе высокопрочного сталефибробетона с минимальным эффективным содержанием выбранного типа стальной фибры при кратковременном и длительном нагружении в различном возрасте и их аналитическое описание.

Цель диссертационной работы – разработка и обоснование аналитических зависимостей по описанию характеристик физико-механических и реологических свойств мелкозернистого высокопрочного бетона нового поколения класса по прочности на сжатие В120 и изготовленного на его основе высокопрочного сталефибробетона с содержанием выбранного типа фибры на нижнем пороге эффективности для данного бетона на основе экспериментальных исследований при кратковременном и длительном нагружении, а также развитие диаграммного метода расчета железобетонных конструкций с учетом разработанных зависимостей.

Задачи диссертационной работы:

1. Определение на основе результатов экспериментальных исследований призмочной прочности и модуля упругости при сжатии исследуемого МВБ и изготовленного на его основе ВСФБ при минимальном эффективном содержании выбранного типа фибры с учетом возраста бетона.
2. Получение экспериментальными методами диаграмм деформирования исследуемых бетонов при кратковременном сжатии с определением количественных характеристик их основных параметров.
3. Определение деформаций ползучести исследуемых бетонов на основе экспериментальных исследований в зависимости от их возраста в момент загрузки и уровня длительного нагружения сжатием, а также деформаций усадки в зависимости от возраста в момент начала наблюдения.
4. Разработка аналитических зависимостей для описания изменения механических свойств исследуемых бетонов в части призмочной прочности и модуля упругости при сжатии, а также для описания диаграмм деформирования при кратковременном осевом сжатии в зависимости от их возраста.
5. Разработка аналитических зависимостей для описания изменения деформаций усадки исследуемых бетонов в зависимости от длительности наблюдения, а также общих и предельных мер ползучести в зависимости от возраста бетона в момент начала испытаний с учетом уровня длительного нагружения.

6. Разработка методики построения диаграмм-изохрон при сжатии для исследуемых бетонов в зависимости от возраста нагружаемого бетона, уровня и длительности нагружения, а также развитие диаграммного метода расчета железобетонных конструкций из высокопрочного бетона с учетом его ползучести на основе разработанных соотношений.

Научная новизна результатов работы:

1. На основе проведенных экспериментов установлены математические закономерности изменения количественных характеристик физико-механических свойств изучаемого МВБ нового поколения и полученного на его основе ВСФБ с минимальным эффективным содержанием выбранного типа стальной фибры в части призмной прочности и модуля упругости при сжатии в зависимости от возраста бетона.

2. На основе проведенных экспериментов получены диаграммы деформирования исследуемых бетонов при кратковременном сжатии в продольном и поперечном направлениях и развита методика их математического описания.

3. На основе проведенных экспериментов определена зависимость деформаций усадки исследуемых бетонов от возраста в момент окончания влажностного хранения и длительности наблюдения и разработан способ ее теоретического описания.

4. На основе экспериментального исследования ползучести исследуемых бетонов при длительном сжатии проведено математическое моделирование общих мер ползучести по теоретической методике В.М. Бондаренко и Н.И. Карпенко с учетом возраста нагружаемого бетона, уровня и длительности действия нагрузки, а также дано развитие экспериментальной методики определения мер ползучести И.Е. Прокоповича с учетом нелинейности ползучести.

5. Выявлена зависимость предельных мер ползучести исследуемых бетонов от их возраста и уровня длительного нагружения с привязкой к эталонным значениям в возрасте 28 суток и дано ее математическое описание.

6. Развита методика построения диаграмм-изохрон для исследуемых бетонов при сжатии, начиная с 1 часа нагружения до теоретической бесконечности. В рамках разработки этой методики предложены обобщенные математические выражения для определения характеристик и мер ползучести с учетом функции нелинейности.

7. Дано развитие диаграммного метода расчета железобетонных конструкций на основе разработанной методики диаграмм-изохрон.

Теоретическая и практическая значимость результатов.

Разработаны предложения по усовершенствованию аналитических способов описания характеристик свойств исследуемых бетонов при кратковременном и длительном нагружениях. Выполнена существенная переработка и уточнение методики построения диаграмм-изохрон при осевом сжатии применительно к высокопрочному сталефибробетону и его матрице класса

по прочности на сжатие В120 в части учета нелинейности предельных и общих мер ползучести в зависимости от уровня прикладываемой нагрузки. Предложен способ учета длительности действия нагрузки и влияния ползучести бетона на напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций с использованием современного диаграммного метода расчета.

Методология и методы исследования. Применены экспериментальные методы физического моделирования, механические методы испытания материалов нагружением и измерения перемещений, а также теоретические методы анализа и математического моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обобщенные аналитические выражения с установлением их параметров для описания изменения призмочной прочности и модуля упругости при сжатии изучаемого МВБ и полученного на его основе ВСФБ с минимальным эффективным содержанием выбранного типа фибры в зависимости от возраста бетона в привязке к эталонным значениям в возрасте 28 суток.

2. Обобщенные аналитические выражения для описания диаграмм деформирования бетонов при кратковременном сжатии для классов по прочности до В120 с возможным развитием на более высокие классы.

3. Аналитическое выражение для описания деформаций усадки изучаемых бетонов с установлением его параметров в зависимости от возраста бетона.

4. Обобщенные аналитические выражения для описания общих мер ползучести изучаемых бетонов с установлением их параметров в зависимости от возраста нагружаемого бетона и уровня длительного сжатия с использованием различных подходов, а также аналитическое выражение для описания предельных мер ползучести в зависимости от возраста бетона в привязке к эталонному значению при загрузении в возрасте 28 суток.

5. Методика построения диаграмм-изохрон изучаемых бетонов для описания деформаций материала при загрузении сжатием в различном возрасте с учетом длительности нагружения и уровня нагрузки.

6. Предложения по развитию диаграммного метода расчета железобетонных конструкций в части применения разработанных аналитических выражений для оценки деформаций ползучести бетона.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов достигается применением общепринятых гипотез строительной механики, достаточно развитых вариантов теорий ползучести, сопоставлением результатов расчетов с полученными экспериментальными данными. Для достижения достоверности полученных результатов в процессе проведения экспериментов и обработки полученных данных соблюдались требования нормативных документов: ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам», ГОСТ 24452-80 «Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля

упругости и коэффициента Пуассона», ГОСТ 24544-2020 «Бетоны. Методы определения деформации усадки и ползучести», а также «Методических рекомендаций по исследованию усадки и ползучести бетона», разработанных в НИИЖБ.

Апробация работы и публикации. Основное содержание диссертации и результаты исследований представлены в восьми научных статьях, опубликованных в специализированных изданиях, в том числе опубликовано семь научных статей в изданиях, входящих в перечень Высшей аттестационной комиссии (ВАК) при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации. Часть результатов исследований была вынесена для обсуждения на IX, X и XIII Академических чтениях «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность», посвященных памяти академика РААСН Г.Л. Осипова, состоявшихся в 2018, 2019 и 2022 гг. Результаты исследований, выполненных в рамках НИОКР по плану РААСН по теме «Разработка, исследование и развитие фундаментальных научных основ расчета строительных конструкций из высокопрочного сталефибробетона и мелкозернистого высокопрочного бетона при кратковременном и длительном нагружении» (№ госрегистрации - АААА-А19-119022190133-6), были одобрены на заседании Ученого совета НИИСФ РААСН и утверждены на заседании Ученого совета Отделения строительных наук РААСН в 2019 г.

Внедрение результатов работы. Результаты исследований использованы в рамках выполнения НИР по заданию ФАУ «ФЦС» при разработке Методического пособия «Автоматизированные методы расчета массивных железобетонных конструкций при объемном напряженном состоянии» (раздел 6), а также при проведении АО «ЦНИИПроектлегконструкция» работ по реконструкции объектов «Гостиница (апартаменты) с нежилыми помещениями и подземной автостоянкой по адресу г. Москва, ул. Пресненский Вал, вл. 21» в 2017 г.; «Многофункциональный комплекс с подземной автостоянкой по адресу: г. Москва, ЦАО, Пресненская набережная дом 4, стр. 2» (башня «Эволюция» ММДЦ «Москва-Сити») в 2018 г.

Область исследования соответствует паспорту специальности ВАК 2.1.1 – «Строительные конструкции, здания и сооружения», и относится к пункту 3 «Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований вновь возводимых, восстанавливаемых и усиливаемых строительных конструкций, наиболее полно учитывающих специфику воздействий на них, свойства материалов, специфику конструктивных решений и другие особенности».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы (184 наименования) и приложения. Работа изложена на 238 машинописных

страницах, в том числе 212 страниц основного текста, 93 рисунка, 47 таблиц, 23 страницы списка использованной литературы, 2 страницы приложения.

Диссертация выполнялась в период с 2017 г. по 2022 г. в лаборатории «Проблемы прочности и качества в строительстве» НИИСФ РААСН под руководством д.т.н., профессора Н.И. Карпенко. Экспериментальные исследования проводились в рамках НИОКР по плану РААСН. Исследования влияния дозировки фибры на характеристики высокопрочного бетона при различных режимах кратковременного нагружения проводились совместно с лабораторией химических добавок НИИЖБ им. А.А. Гвоздева с участием И.А. Чилина при непосредственной консультации по технологии бетонов на основе модификаторов серии МБ д.т.н., профессора С.С. Каприелова. Экспериментальные исследования физико-механических и реологических свойств высокопрочного сталефибробетона с рациональным содержанием фибры при кратковременном и длительном нагружении проводились в лаборатории НИУ МГСУ под руководством И.М. Безгодова. Начальная обработка результатов экспериментальных исследований проводилась совместно с М.В. Степановым.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, данные об апробации работы, публикации автора, структуре и объеме диссертации.

В **первой главе** представлены результаты анализа современного состояния вопроса, выполнен обзор работ по исследованию высокопрочных бетонов и высокопрочного сталефибробетона. Рассмотрены различные изложения физических основ ползучести бетона и основные варианты теорий ползучести. Представлено теоретическое описание построения диаграмм деформирования бетона с учетом длительности действия нагрузок в форме диаграмм-изохрон при эталонных режимах нагружения. Приведены рекомендации по учету влияния масштабного фактора на физико-механические и реологические свойства бетона.

Четкой границы разделения бетонов на обычные и высокопрочные не существует в силу постоянного развития технологий. Как правило, высокопрочными считаются бетоны классов В60 и выше. Помимо этой классификации существует условное разделение бетонов на традиционные и бетоны нового поколения, получаемые с добавлением микрокремнезема и суперпластификаторов. Изучением традиционных высокопрочных бетонов в СССР занимались В.И. Сытник, Р.А. Мельник, А.Я. Пацула, В.И. Федорчук, И.И. Лубенец, О.Я. Берг, Н.В. Свиридов, С.В. Александровский, В.В.

Соломонов, Н.А. Колесников, О.М. Попкова Е.Н. Щербаков и их ученики. Исследуемые смеси, в основном, относились к жестким. Рассматривались различные вопросы ползучести и усадки исследуемых бетонов, изучались поперечные деформации и деформации последействия. Исследованиями высокопрочных бетонов нового поколения в России занимались, в основном, в НИИЖБ и ЦНИИС. В работах С.С. Каприелова, М.Г. Булгаковой, Я.Л. Вихмана, Н.В. Смирнова, Ф.А. Иссерса, Н.И. Вершининой изучалось влияние содержания различных модификаторов и добавок на физико-механические и реологические свойства бетонов. В НИИСФ РААСН проводились исследования разновидностей высокопрочных бетонов Е.Н. Кузнецовым, А.А. Андриановым, Д.С. Ромкиным под руководством Н.И. Карпенко.

Изучению сталефибробетона, в целом, посвящено большое количество работ как в России, так и за рубежом. Существенный вклад в решение различных экспериментально-теоретических задач по изучению фибробетонов в нашей стране был внесен Ю.М. Баженовым, Г.И. Бердичевским, В.М. Бондаренко, И.В. Волковым, А.А. Гвоздевым, Ю.В. Зайцевым, В.И. Корсуном, Б.А. Крыловым, Л.Г. Курбатовым, И.А. Лобановым, Р.Л. Маилином, В.И. Морозовым, Ю.В. Пухаренко, Ф.Н. Рабиновичем, Б.Г. Скрамтаевым, К.В. Талантовой и другими исследователями. Исследования касались как вопросов производства и технологических особенностей сталефибробетона, так и его свойств при различных режимах загрузки. В основном изучался сталефибробетон на основе матрицы рядовой прочности. Под руководством С.С. Каприелова была разработана оригинальная технология производства ВСФБ из высокоподвижных и самоуплотняющихся смесей на основе отечественных компонентов с их последующим внедрением в практику строительства сложных объектов, требующих использования материалов с улучшенными характеристиками.

Несмотря на большое количество публикаций и материалов по исследуемой теме, можно говорить о том, что большинство исследований высокопрочных бетонов относится к так называемым традиционным бетонам с классом по прочности до В40. Общая картина свойств сталефибробетона повышенной прочности на основе высокопрочного бетона нового поколения с применением комплексных модификаторов еще требует изучения и дополнения. Возникает необходимость расширения экспериментально подтвержденной базы данных о свойствах ВСФБ, изготовленного по разработанной в России технологии с применением отечественных компонентов. Особенную актуальность приобретают исследования сталефибробетона с минимальным эффективным процентом содержания фибры, так как данный параметр оказывает существенное влияние на стоимость бетона. При этом должны учитываться современные запросы проектирования. Как известно, в настоящее время в практике проектирования широко применяются диаграммные методы расчета, позволяющие отразить реальную работу материалов и конструкций под нагрузкой. Для бетона, как

упруго-пластического материала, весьма важным фактором является учет длительности действия нагрузок, что сопряжено с такими сложными для изучения и систематизации явлениями, как ползучесть и усадка.

Для объяснения природы ползучести было выдвинуто множество теорий различными исследователями, среди которых – Е. Фрейсине, А.А. Гвоздев, А.Е. Шейкин, И.И. Улицкий, И.Н. Ахвердов, Н.Х. Арутюнян, К.З. Галустов и другие. Для расчетов используются так называемые феноменологические теории, основой которых являются соотношения между напряжениями и деформациями с учетом влияния времени. В настоящее время существуют три основные разновидности феноменологических теорий ползучести: *теория упругой наследственности* (Л. Больцман, В. Вольтерра, А.Ю. Ишлинский, А.К. Малмейстер, Ю.Н. Работнов, А.Р. Ржаницын и др.); *теория старения* (Х. Уитней, Ф. Дишингер, Н.А. Буданов); *наследственная теория старения* (Г.Н. Маслов, Н.Х. Арутюнян, С.В. Александровский, А.А. Гвоздев, В.М. Бондаренко, П.И. Васильев и др.). Последняя, как наиболее полно согласующаяся с данными экспериментов, легла в основу большого количества практических методик расчета конструкций. Помимо этого, теории ползучести можно разделить на две большие группы – линейные и нелинейные. Для практики проектирования на основе феноменологических теорий разработаны частные подходы к решению инженерных задач, которые, тем не менее, позволяют с достаточной точностью описать стадии деформирования бетонных элементов вплоть до разрушения. Одним из перспективных направлений для практического применения является методика построения **диаграмм-изохрон** при эталонных режимах загрузки, позволяющих определять деформации в зависимости от уровня прикладываемой нагрузки в любой момент времени нагружения. В связи с этим актуальным представляется рассмотрение применимости разработанных для обычного бетона методик построения диаграмм-изохрон в случае исследуемого ВСФБ нового поколения.

Вторая глава содержит описание программы исследований, общей методики и методик проведения конкретных экспериментов, приводятся полученные экспериментальные данные о свойствах МВБ и ВСФБ при кратковременном и длительном нагружении.

Программа экспериментальных исследований включала два основных этапа:

- исследование влияния дозировки стальной фибры на физико-механические характеристики свойств ВСФБ при различных видах нагружения - осевом сжатии, растяжении и растяжении при изгибе. Данные исследования проводились совместно с лабораторией химических добавок НИИЖБ им. А.А. Гвоздева при участии И.А. Чилина.

- комплекс экспериментов по изучению физико-механических и реологических свойств при кратковременном и длительном нагружении

сталефибробетона с минимальным рациональным содержанием фибры в сравнении с матрицей без фибры.

Бетонная матрица образцов представляла собой высокопрочный бетон нового поколения, модифицированный с помощью органо-минерального модификатора МБ 3-50К. Состав смеси принят на основании результатов исследований лаборатории химических добавок НИИЖБ и относится к категории самоуплотняющихся. Для приготовления смесей применялись следующие компоненты: портландцемент марки ПЦ 500 ДОН производства ОАО «Новоросцемент», соответствующий ГОСТ 31108 и ГОСТ 30515; песок кварцевый, мытый I класса, крупный, соответствующий ГОСТ 8736; органо-минеральный модификатор МБ 3-50К, соответствующий ТУ 5743-323-36554501-2014; минеральный порошок неактивированный МП-1, максимальная крупность зерен – менее 1,25 мм, соответствующий ГОСТ Р 52129; вода затворения, соответствующая ГОСТ 23732.

Для получения сталефибробетона в состав бетонной матрицы вводилась стальная латунированная фибра прямого профиля из высокоуглеродистой стали, выпускаемая по ТУ ВУ 400074854.628-209, со следующими характеристиками: длина L – 13 мм; номинальный диаметр D – 0,3 мм; индекс фибры $L/D = 43,3$; минимальное временное сопротивление разрыву – 1000 Н/мм²; модуль упругости – 200 ГПа.

Методика и основные результаты экспериментальных исследований.

На первом этапе исследований были изготовлены четыре серии образцов. Для определения призмной прочности (R_b), модуля упругости при осевом сжатии (E_b) и прочности на растяжение при изгибе (R_{bt}) были изготовлены образцы-призмы размером 100×100×400 мм. Для определения прочности при осевом растяжении (R_{bt}) были изготовлены образцы-восьмерки сечением 70×70 мм. Каждый вид нагружения исследовался по трем образцам. Кубиковая прочность (R) в каждой серии определялась по шести образцам-кубам с ребром 100 мм. Серия 1 изготавливалась без стальной фибры, а серии 2, 3, 4 армировались стальной фиброй выбранного типа в количестве, соответственно, 80 кг/м³, 120 кг/м³, 150 кг/м³ (1%, 1,5%, 2% по массе). Испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 10180 и ГОСТ 24452. Все образцы после распалубки выдерживались в камере нормального твердения в течение 2-х месяцев. Измерения деформаций в условиях осевого сжатия и осевого растяжения проводились с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 мм.

Кубиковая прочность у ВСФБ в зависимости от дозировки фибры составила от 119,8 до 132,6 МПа, призмная прочность – от 86,3 до 115,4 МПа, модуль упругости – от $37,0 \times 10^3$ до $44,4 \times 10^3$ МПа, коэффициент поперечной деформации – от 0,277 до 0,273. Существенного прироста кубиковой и призмной прочности ВСФБ по сравнению с МВБ не наблюдается, однако, при этом изменяется характер разрушения – с хрупкого взрывного для бетона без фибры на квазипластичный с постепенным

растрескиванием для ВСФБ. Наблюдается незначительная тенденция к повышению модуля упругости и снижению коэффициента поперечной деформации с ростом дозировки фибры. Прочность ВСФБ на осевое растяжение при содержании фибры в диапазоне 1,5 - 2% по массе составила от 4,80 до 5,98 МПа, что выше, чем у МВБ, на 5 - 30%. При этом деформации, соответствующие началу трещинообразования, возрастают на 12% – 33% по сравнению с МВБ. При 1% армирования разрушение при осевом растяжении происходит хрупко, начиная с 1,5% - имеет пластический характер. Наибольшее влияние на несущую способность введение фибры оказывает при испытании на растяжение при изгибе, с резким возрастанием начиная с 1,5% (R_{btf} при 1,5% армирования составила 16,52 МПа, прирост прочности - 89% по сравнению с МВБ). При этом образцы МВБ при образовании первых трещин в растянутой зоне разрушаются, а образцы ВСФБ при содержании фибры 1,5 - 2% продолжают деформироваться при увеличении нагрузки с последующим существенным раскрытием трещин. Таким образом, можно говорить о том, что минимальный «порог эффективности» для исследуемого типа фибры составляет 1,5% по массе (120 кг/м^3). При этом в значительной степени начинают проявляться наиболее важные свойства сталефибробетона – повышение прочности при растяжении и растяжении при изгибе, а также повышенная трещиностойкость и пластический характер разрушения.

На втором этапе исследований проводились эксперименты для получения физико-механических и реологических свойств ВСФБ при минимальном эффективном количестве фибрового армирования 1,5% по массе, установленном на первом этапе исследований, в сравнении с неармированным бетоном.

По специальной методике были проведены эксперименты для получения полных диаграмм деформирования МВБ и ВСФБ при напряжениях вплоть до предела прочности бетона на сжатие. Сопоставление диаграмм деформирования МВБ и ВСФБ при сжатии, а также анализ характера изменения приращений модуля деформаций, коэффициента поперечной деформации и суммы объемных деформаций на ступенях нагружения свидетельствует о том, что введение стальной фибры в состав бетона способствует сдерживанию деформаций при нагружении. Возникает так называемый «эффект обоймы», при котором по мере возрастания поперечных деформаций фибровое армирование начинает воспринимать часть нагрузки, передаваемой на бетонную матрицу, за счет чего происходит снижение предельных поперечных деформаций, повышение верхней границы трещинообразования и сдерживание процесса разрушения образца.

Влияние стальной фибры на деформации ползучести и усадки исследовалось на образцах-призмах МВБ и ВСФБ размером $70 \times 70 \times 280 \text{ мм}$. Испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 24544. После распалубки образцов через двое суток они помещались в камеру нормального твердения. Согласно программе исследований загрузка образцов осуществлялась в возрасте 7, 28 и 100 суток. С целью поддержания

температурно-влажностного режима внутри образца после извлечения из камеры они изолировались двумя слоями парафина. Для измерения продольных и поперечных деформаций использовались индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 и 0,001 мм. Перед загрузкой на длительное воздействие проводились кратковременные испытания контрольных образцов с целью определения призмной прочности и других физико-механических характеристик в зависимости от возраста бетона. Наблюдается некоторый прирост призмной прочности ВСФБ по сравнению с МВБ – от 8% в возрасте 7 суток до 13% в возрасте 240 суток. Модуль упругости ВСФБ был выше по сравнению с МВБ на 22% в 7 суток и на 13% в 240 суток. По значениям средней призмной прочности определялись величины длительных нагрузок соответственно уровням $0,3R_b$, $0,6R_b$ и $0,8R_b$. Нагружение осуществлялось 200-тонными домкратами. Деформации усадки измерялись на двух образцах без нагрузки, находившихся рядом с нагруженными образцами. Длительность нагружения составляла 180 суток, затем образцы разгружались и измерялись деформации последствия в течение 60 суток.

Деформации усадки зависели от возраста бетона и к концу наблюдения составили у ВСФБ от $2,5 \times 10^{-5}$ до 20×10^{-5} в продольном направлении и от 5×10^{-5} до 21×10^{-5} в поперечном направлении, что значительно ниже, соответственно, на 31 - 61% и на 34 - 38%, соответствующих деформаций усадки у МВБ. По мере старения бетона от 7 до 100 суток продольные деформации усадки сокращаются: у МВБ на 79%, у ВСФБ – на 87%; поперечные – у МВБ на 75%, у ВСФБ на 76% к концу времени наблюдения.

Анализ полученных кривых ползучести свидетельствует о следующем. Продольные деформации ползучести у ВСФБ к концу наблюдения составили от 42×10^{-5} до 246×10^{-5} , поперечные - от 5×10^{-5} до 50×10^{-5} в зависимости от возраста бетона и уровня нагрузки, что ниже, в среднем, на 25%, чем у МВБ при любом возрасте нагружения. По мере старения бетона продольные и поперечные деформации ползучести сокращаются как у МВБ, так и у ВСФБ. Коэффициент поперечной деформации ползучести (КПДП) значительно, в среднем на 40% у МВБ и на 50% у ВСФБ, ниже коэффициента поперечной деформации (КПД) при кратковременном нагружении. Обратимые деформации ползучести отличаются незначительно: у ВСФБ они несколько меньше, в среднем на 15%, чем у МВБ, однако при этом остаточные деформации ползучести МВБ существенно, на 20 - 70%, превышают аналогичные деформации ВСФБ. Обратимые поперечные деформации для низкого уровня нагружения ($0,3R_b$) практически отсутствуют.

В третьей главе представлены результаты теоретической обработки данных кратковременных испытаний. Установлены теоретические зависимости для определения призмной прочности и начального модуля

упругости при сжатии исследуемого ВСФБ при минимальном эффективном содержании фибры и его матрицы в различном возрасте. Выполнена корректировка выражений, описывающих диаграммы изменения продольных и поперечных деформаций исследуемых бетонов в зависимости от уровня нагружения при кратковременном сжатии по методике Н.И. Карпенко.

Изменение призмной прочности и начального модуля упругости в зависимости от возраста бетона. Экспериментально установлено, что набор прочности как МВБ, так и ВСФБ происходит стремительно в первые дни твердения (до 7 суток), достигая 78% от значений 28-суточной прочности. Теоретическое описание зависимости набора прочности исследуемого ВСФБ от возраста бетона в привязке к 28-суточной прочности проводится в соответствии с модифицированной зависимостью Е.Н. Щербакова:

$$R_b(t) = R_b(28) \left[1 + \frac{23}{55+B} \cdot \left(\frac{t-28}{t+5} \right) \right], \quad (1)$$

где $R_b(t)$ – призмная прочность бетона на сжатие в возрасте t , МПа; $R_b(28)$ – призмная прочность бетона на сжатие в возрасте 28 суток, МПа; B – условный класс бетона по прочности на сжатие, принимаемый равным $1,4R_b(28)$, МПа; t – возраст бетона, сут.

Также для ВСФБ возможно применение зависимости, предложенной в работах А.В. Мишиной:

$$R_b(t) = R_b(28) \frac{t}{2,3+0,92t}. \quad (2)$$

Для МВБ характер набора прочности после 28 суток твердения требует корректировки приведенных зависимостей. Предлагается разбить кривую набора прочности МВБ на два участка – до 28 суток и после 28 суток. С учетом корректировки выражения (1), (2) для МВБ соответственно примут вид:

$$\begin{aligned} &\text{- при } t \leq 28 \text{ сут: } R_b(t) = R_b(28) \left[1 + \frac{23}{55+B} \cdot \left(\frac{t-28}{t+5} \right) \right], \\ &\text{- при } t > 28 \text{ сут: } R_b(t) = R_b(28) \left[1 + \frac{10}{55+B} \cdot \left(\frac{t-28}{t+5} \right) \right]; \end{aligned} \quad (1^*)$$

$$\begin{aligned} &\text{- при } t \leq 28 \text{ сут: } R_b(t) = R_b(28) \frac{t}{2,3+0,92t} \\ &\text{- при } t > 28 \text{ сут: } R_b(t) = R_b(28) \frac{t}{4,1+0,92t} \end{aligned} \quad (2^*)$$

Для модуля упругости характерен также стремительный рост в раннем возрасте, составляющий для МВБ и ВСФБ, за 7 первых суток твердения соответственно 80% и 87% от 28-суточного значения. Для теоретического описания изменения модуля упругости с течением времени в привязке к значению возраста бетона в 28 суток используются два варианта зависимостей по аналогии с работами Д.С. Ромкина и А.В. Мишиной. При этом требуется корректировка для исследуемых бетонов. Временная ось представляется двумя отрезками – до и после 28 суток.

Предлагаемые зависимости начального модуля упругости от возраста бетона принимают вид:

- для МВБ

$$\begin{aligned} \text{при } t < 28 \text{ сут: } E_b(t) &= E_b(28) \left[1 + \frac{55}{55+B} \cdot \left(\frac{t-28}{t+5} \right) \right]^{0,3}, \\ \text{при } t \geq 28 \text{ сут: } E_b(t) &= E_b(28) \left[1 + \frac{23}{55+B} \cdot \left(\frac{t-28}{t+5} \right) \right]^{0,3}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{при } t < 28 \text{ сут: } E_b(t) &= E_b(28) \left(\frac{t}{5,5+0,92t} \right)^{0,4}, \\ \text{при } t \geq 28 \text{ сут: } E_b(t) &= E_b(28) \left(\frac{t}{2,3+0,92t} \right)^{0,4}. \end{aligned} \quad (4)$$

- для ВСФБ

$$\begin{aligned} \text{при } t < 28 \text{ сут: } E_b(t) &= E_b(28) \left[1 + \frac{45}{55+B} \cdot \left(\frac{t-28}{t+5} \right) \right]^{0,3}, \\ \text{при } t \geq 28 \text{ сут: } E_b(t) &= E_b(28) \left[1 + \frac{23}{55+B} \cdot \left(\frac{t-28}{t+5} \right) \right]^{0,3}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{при } t < 28 \text{ сут: } E_b(t) &= E_b(28) \left(\frac{t}{3,5+0,92t} \right)^{0,4}, \\ \text{при } t \geq 28 \text{ сут: } E_b(t) &= E_b(28) \left(\frac{t}{2,3+0,92t} \right)^{0,4}. \end{aligned} \quad (6)$$

Расхождение значений призмочной прочности и начального модуля упругости, полученных по приведенным зависимостям, с экспериментальными данными составляет не более 4%.

Диаграммы деформирования бетонов при сжатии. Теоретическое описание полученных диаграмм выполнено с использованием методики Н.И. Карпенко, разработанной для традиционных бетонов. Одним из основных параметров в данной методике является определение предельных относительных деформаций бетона в вершине диаграммы. Для лучшей сходимости с экспериментальными данными исходная формула для определения деформаций в вершине диаграммы была откорректирована и представлена в виде:

$$\hat{\varepsilon}_b = -\frac{B}{E_b} \lambda \frac{k + \left(0,8 - 0,15 \frac{B^2}{10000} \right) \lambda B / 60 + 0,2 \lambda / B}{0,12 + 1,03 B / 60}, \quad (7)$$

где k – безразмерный коэффициент (для МВБ $k = 1$, для ВСФБ $k = 1,3$).

Характеристику $\hat{\varepsilon}_b$ возможно также вычислять по зависимости:

$$\hat{\varepsilon}_b = k \cdot 10^{-5} \left(\sqrt[4]{\frac{R_b}{R_0}} \right), \quad (8)$$

где k – безразмерный коэффициент (для МВБ $k = 200$, для ВСФБ $k = 220$); R_0 – размерный коэффициент, принимаемый равным 20 МПа.

Полученные в соответствии с предложенными соотношениями теоретические диаграммы сжатия, а также экспериментальные диаграммы сжатия исследуемых бетонов представлены на рисунке 1. Максимальное расхождение экспериментальных и теоретических данных составляет не более 4,5% в вершинах диаграмм деформирования.



Рисунок 1 - Теоретические и экспериментальные диаграммы сжатия МВБ и ВСФБ

Четвертая глава содержит теоретическую обработку результатов длительных испытаний ВСФБ при минимальном эффективном содержании фибры и его матрицы. Исследованы деформации усадки и ползучести исследуемых бетонов в различном возрасте (7 суток, 28 суток, 100 суток) с разработкой и уточнением аналитических зависимостей и подбором их параметров для описания соответствующих характеристик. Выполнена корректировка разработанного ранее для традиционных бетонов экспериментального подхода к описанию мер ползучести применительно к новым исследуемым бетонам с учетом нелинейности. Выполнена разработка методики построения диаграмм-изохрон для исследуемых ВСФБ и МВБ, позволяющая описывать процессы деформирования бетона в любом возрасте.

Деформации усадки исследуемых бетонов. Теоретическая обработка результатов экспериментального определения деформаций усадки исследуемого мелкозернистого высокопрочного бетона и высокопрочного сталефибробетона была проведена в соответствии с методикой, предложенной И.Е. Прокоповичем и М.М. Заставой для моделирования деформаций усадки тяжелого бетона классов до В60. Предельные деформации усадки определены по методике ГОСТ 24544. Зависимость для описания деформаций усадки исследуемых ВСФБ и МВБ предлагается представить в следующем виде:

$$\varepsilon_{bs}(t, t_w) = \varepsilon_{bs}(\infty, t_w) * [1 - e^{-\alpha(t-t_w)}] * \left[\frac{A}{e^{-\alpha(t-t_w)} + 1} \right], \quad (9)$$

где t_w – возраст бетона в момент окончания влажностного хранения, сут; α – безразмерный параметр, зависящий от модуля открытой поверхности образца; $\varepsilon_{bs}(\infty, t_w)$ – предельное значение деформации усадки бетона.

Значения коэффициентов γ , α , A в формуле (9) подобраны для МВБ и ВСФБ в зависимости от возраста бетона к началу наблюдения. На рисунке 2 представлено сопоставление экспериментальных и теоретических данных деформаций усадки для МВБ и ВСФБ при начале наблюдения в возрасте 28 суток.

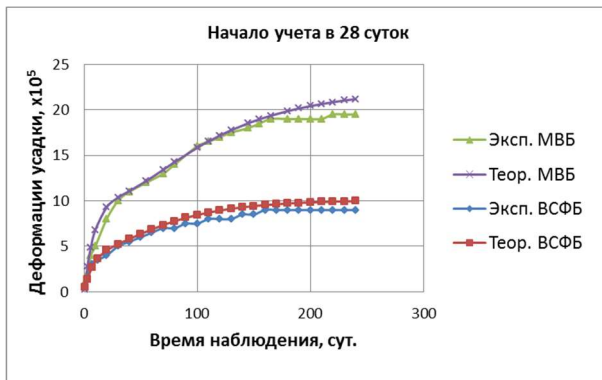


Рисунок 2 - Экспериментальные и теоретические значения деформаций усадки для МВБ и ВСФБ при начале учета в возрасте 28 суток

Теоретическая методика описания мер ползучести. Для описания удельных деформаций (мер) ползучести возможно использовать как экспериментальные подходы, основанные на аппроксимации экспериментальных данных, так и теоретический подход, разработанный в работах В.М. Бондаренко и Н.И. Карпенко. Согласно этому подходу, текущая мера ползучести бетона при возрасте нагружения t_0 уровнем нагрузки η в момент времени t составит:

$$C_0(\eta, t, t_0) = C_0(\eta, \infty, t_0) - \left[\frac{C_0(\eta, \infty, t_0) - C_0(\eta, t_0, t_0)}{\left[1 + \alpha \frac{m-1}{s+1} (\tilde{t}^{s+1} - 1) \right]^{\frac{1}{m-1}}} \right], \quad (10)$$

где $C_0(\eta, \infty, t_0)$ – предельная мера простой ползучести бетона возраста t_0 ; $C_0(\eta, t_0, t_0)$ – начальный вертикальный отрезок меры ползучести бетона; $\tilde{t} = \frac{t}{t_0}$ – относительное время нагружения; α , m , s – безразмерные эмпирические коэффициенты.

В практических расчетах возможно принятие в формуле (10) вместо $C_0(\eta, t_0, t_0)$ значения $C_0(\eta, t_0 + 1, t_0)$, которое соответствует мере ползучести бетона для времени нагружения $t - t_0 = 1$ сут., при этом $\tilde{t} = \frac{t}{t_0 + 1}$.

Предельные деформации ползучести $\varepsilon^n(\infty, t_0)$ определялись по ГОСТ 24544. По предельным деформациям определялись предельные меры ползучести $C_0(\eta, \infty, t_0)$. Значения $C_0(\eta, t_0 + 1, t_0)$ определялись по данным экспериментов. Параметры s , α , m теоретической меры ползучести

подбирались в зависимости от возраста МВБ и ВСФБ в момент нагружения и уровня нагрузки. Полученные по указанной методике теоретические меры ползучести согласуются с экспериментальными данными с высокой степенью точности.

Зависимость предельных мер ползучести от возраста бетона.

При описании ползучести целесообразно установить соотношение предельных мер ползучести $C_0(\eta, \infty, t_0)$ бетона, нагруженного в различном возрасте, с эталонным значением при возрасте нагружения 28 суток. По аналогии с вычислением кратковременных характеристик ранее для этого была предложена следующая формула:

$$C_0(\eta, \infty, t_0) = C_0(\eta, \infty, 28) \cdot \left[1 + \frac{A}{C+B} \left(\frac{t-28}{t+D} \right) \right]^n \quad (11)$$

где $C_0(\eta, \infty, t_0)$ – предельная мера ползучести при уровне напряжений η и возрасте нагружения t_0 ; $C_0(\eta, \infty, 28)$ – предельная мера ползучести при уровне напряжений η и возрасте нагружения 28 суток; A, C, D, n – подбираемые эмпирическим путем безразмерные параметры; B – класс бетона по прочности, в данном случае принимаемый равным $I,4R_b$.

Сопоставление с данными экспериментов показывает, что для ВСФБ необходимо ввести разграничение для параметра A по возрасту нагружения – до и после 28 суток.

Экспериментальная методика описания мер ползучести. Для определения деформаций ползучести в соответствии с экспериментальным подходом использована основанная на большом количестве экспериментов с обычными бетонами формула, предложенная И.Е. Прокоповичем и М.М. Заставой в виде:

$$C(t, t_0) = C(\infty, 28) \cdot \Omega(t_0) \cdot f(t - t_0), \quad (12)$$

где $C(\infty, 28)$ – предельное значение меры ползучести, определяемое по методике ГОСТ 24544; $\Omega(t_0)$ – функция, учитывающая влияние старения бетона на меру ползучести; $f(t - t_0)$ – функция, учитывающая нарастание во времени меры ползучести.

Для функций $\Omega(t_0)$ и $f(t - t_0)$ принимаются выражения

$$\Omega(t_0) = 0,5 + d e^{-\gamma_1 t_0} \quad (13)$$

$$f(t - t_0) = 1 - D e^{-\alpha(t-t_0)} - B e^{-\gamma_1(t-t_0)} \quad (14)$$

где d и γ_1 – назначаются в зависимости от модуля открытой поверхности конструкции; $B = 0,475$; $D = 0,525$; $\alpha = 0,1$.

Для применения изложенной методики к исследуемым высокопрочным бетонам необходимо выполнить корректировку функций $f(t - t_0)$ и $\Omega(t_0)$. Корректировка осуществляется за счет подбора коэффициентов d, B, D и α . При подборе коэффициентов учтено два условия:

- произведение значения предельной меры ползучести бетона, нагруженного в возрасте 28 суток, на функцию учета старения бетона $\Omega(t_0)$ дает значение предельной меры ползучести бетона, нагруженного в возрасте t_0 :

$$C(\eta, \infty, 28) \cdot \Omega(t_0) = C(\eta, \infty, t_0); \quad (15)$$

- значение выражения $C(\eta, t, t_0) = C(\eta, \infty, 28) \cdot \Omega(t_0) \cdot f(t - t_0)$ при $t = t_0$ дает экспериментальное значение начальной меры ползучести $C(\eta, t_0, t_0)$:

$$C(\eta, \infty, 28) \cdot \Omega(t_0) \cdot f(t_0 - t_0) = C(\eta, t_0, t_0). \quad (16)$$

Подбор коэффициентов d , B , D , α производился при разных уровнях нагрузки ($\eta = 0,3R_b$, $\eta = 0,6R_b$, $\eta = 0,8R_b$) в зависимости от возраста загрузки. Сравнение полученных теоретических кривых с экспериментальными данными при уровне напряжений $\eta = 0,3R_b$ приведено на рисунке 3.

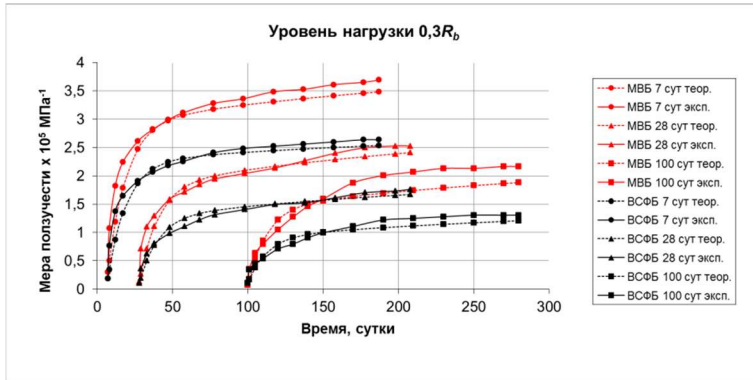


Рисунок 3 - Теоретические и экспериментальные кривые мер ползучести МВБ и ВСФБ при $\eta=0,3R_b$

Построение диаграмм-изохрон МВБ и ВСФБ при сжатии.

Результаты экспериментальных исследований, представленные в главе 2, соответствуют так называемому «жесткому» режиму нагружения, при котором нагрузка, прикладываемая к испытываемым образцам, в короткий срок (в пределах 1 часа) доводится до проектного уровня и затем выдерживается постоянной в течение длительного времени. Время нагружения $t - t_0$ является одним из основных факторов при построении диаграмм-изохрон.

Исследования ряда авторов свидетельствуют о том, что при длительном нагружении бетона сжимающими напряжениями высокого уровня происходит снижение его прочности, в среднем, на 10 - 25%. При построении кривой длительного сопротивления учитывается возраст бетона при нагружении t_0 и время нагружения $t - t_0$. Для жесткого режима нагружения используется следующая зависимость:

$$R_{b,ser}(t, t_0) = R_{b,ser}(t_0) \left\{ [0,95 - 1,57 \cdot 10^{-2} \ln(t - t_0)] \gamma_t + \frac{\bar{\gamma}_{b2}(1 - \gamma_t)}{1 - (1 - \bar{\gamma}_{b2})e^{-4\gamma_1(t - t_0)}} \right\}, \quad (17)$$

где $\gamma_t = 1$ для жесткого режима нагружения; γ_{b2} – коэффициент, учитывающий влияние возраста бетона и условий твердения на длительное

сопротивление; $R_{b,ser}(t_0)$ – начальный предел прочности при сжатии, зависящий от возраста нагружения.

При построении диаграмм-изохрон исследуемого МВБ и ВСФБ и сопоставлении результатов с данными экспериментов возникла необходимость корректировки существующих методик. Помимо этого, была выполнена оптимизация алгоритмов описания ползучести бетона с учетом фактора нелинейности. Приведем итоговую методику с учетом предлагаемых изменений.

Для практического построения диаграмм-изохрон в любой момент времени t выражение для определения деформаций образца представляется по аналогии со случаем кратковременного сжатия, но входящие в него параметры вычисляются для текущего момента нагружения $t - t_0$:

$$\varepsilon_b(t) = \frac{\sigma_b(t, t_0)}{E_b(t, t_0) \nu_b(t, t_0)}, \quad (18)$$

где напряжения сжатия для текущего момента времени $\sigma_b(t, t_0) = \eta(t, t_0) R_b(t, t_0)$; $E_b(t, t_0)$ для жесткого режима нагружения принимается равным $E_b(t_0)$; значения коэффициента изменения секущего модуля вычисляются по формулам:

$$\nu_b(t, t_0) = \hat{\nu}_b(t, t_0) + [\nu_0(t, t_0) - \hat{\nu}_b(t, t_0)] \sqrt{1 - \omega \eta(t, t_0) - (1 - \omega) \eta^2(t, t_0)}, \quad (19)$$

$$\omega = 2 - 2,5 \hat{\nu}_b(t, t_0). \quad (20)$$

Выражения для определения граничных значений коэффициента изменения секущего модуля в начале и в вершине диаграммы принимаются в виде:

$$\nu_0(t, t_0) = \frac{1}{1 + \varphi_0(t, t_0)}, \quad (21)$$

$$\hat{\nu}_b(t, t_0) = \frac{\hat{\nu}_b}{1 + \hat{\nu}_b \hat{\varphi}(t, t_0)}, \quad (22)$$

где $\varphi_0(t, t_0)$ и $\hat{\varphi}(t, t_0)$ – соответственно, характеристика ползучести в начале диаграммы при $\eta(t, t_0) = 0$ и в вершине диаграммы при $\eta(t, t_0) = 1$; $\hat{\nu}_b$ – коэффициент изменения секущего модуля в вершине диаграммы при краткосрочном сжатии.

Характеристика ползучести с учетом длительности нагружения определяется выражением:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi f(t - t_0) \Delta(t, t_0), \quad (23)$$

где $\varphi = \varphi(\infty, t_0)$ – предельная характеристика ползучести для данного возраста; $f(t - t_0)$ – функция для учета влияния возраста нагружения на характеристику ползучести, вычисляемая согласно (14).

Множитель $\Delta(t, t_0)$ к функции $f(t - t_0)$ вводится для учета влияния быстронатекающей ползучести на начальных этапах нагружения:

$$\begin{aligned} - \Delta(t, t_0) &= \sqrt{1 + 0,314 \ln(t - t_0)} \text{ при } t - t_0 \leq 1 \text{ сут;} \\ - \Delta(t, t_0) &= 1 \text{ при } t - t_0 > 1 \text{ сут.} \end{aligned} \quad (24)$$

Предельную характеристику ползучести с учетом нелинейности предлагается описывать следующим образом:

$$\varphi = \varphi^N \xi_1 \xi_2 \Omega(t_0) f_c, \quad (25)$$

где параметр φ^N представляет собой предельную функцию для данного вида бетона, находящегося в эталонных условиях; $\Omega(t_0)$ – функция, учитывающая развитие деформаций ползучести во времени, вычисляется согласно (13); коэффициенты ξ_1 и ξ_2 вводятся для учета, соответственно, влияния влажности среды и условий влагообмена со средой; f_c – функция нелинейности ползучести в зависимости от уровня нагружения.

Функцию нелинейности f_c рекомендуется принимать в виде:

$$f_c = 1 + v_c \tilde{\gamma}_{b2}^2 \eta^2(t, t_0), \quad (26)$$

где $\tilde{\gamma}_{b2} = \frac{R_b(t, t_0)}{R_b(t_0)}$; v_c – коэффициент учета возраста загрузки и вида бетона в функции нелинейности.

Предлагаемая запись характеристики ползучести в форме (25), в которую заложена нелинейность в зависимости от уровня действующих напряжений, дает возможность определения общей меры ползучести по выражению:

$$C(t, t_0, \eta) = \frac{\varphi(t, t_0)}{E_b(t_0)}. \quad (27)$$

При этом предельную меру ползучести при возрасте нагружения 28 суток с приемлемой степенью соответствия экспериментальным данным возможно вычислять по формуле:

$$C(\infty, 28) = \frac{\varphi^N \xi_1 \xi_2}{E_b(t_0)} f_c. \quad (28)$$

Предложенная методика позволяет единообразно описать нелинейность характеристик ползучести, а также выполнить проверку по полученным экспериментально мерам ползучести. Основной проверкой метода служит наложение диаграмм-изохрон для продолжительности нагружения 0,05 и 180 суток на экспериментальные диаграммы. Сопоставление диаграмм для бетонов, нагруженных в возрасте 28 суток, показано на рисунках 4 – 5.

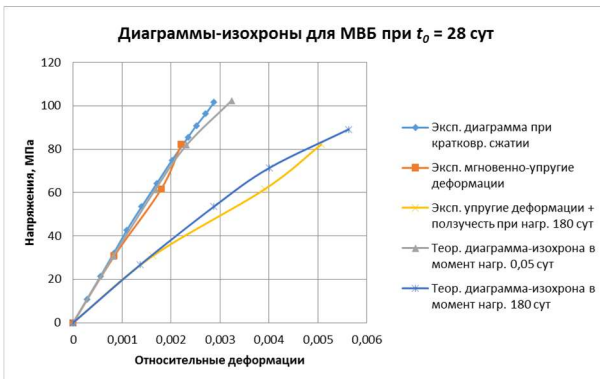


Рисунок 4 - Теоретические и экспериментальные диаграммы-изохроны для МВБ, нагруженного в возрасте 28 суток

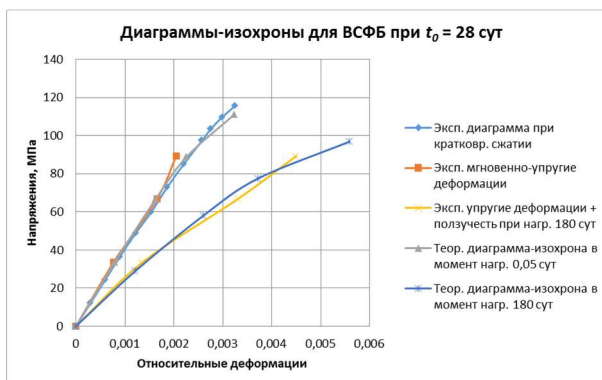


Рисунок 5 - Теоретические и экспериментальные диаграммы-изохроны для ВСФБ, нагруженного в возрасте 28 суток

В пятой главе разработаны предложения по развитию современного диаграммного метода расчета стержневых железобетонных конструкций на основе нелинейной деформационной модели с учетом фактора ползучести бетона и длительности нагружения. В качестве иллюстрации проведен расчет центрально сжатой колонны из исследуемых бетонов по предлагаемой методике с использованием диаграмм-изохрон в сравнении со стандартной методикой расчета по нелинейной деформационной модели, изложенной в СП 63.13330.2018, при кратковременном и длительном нагружении.

Развитие диаграммного метода расчета железобетонных конструкций на основе методики построения диаграмм-изохрон. Диаграммный метод расчета железобетонных конструкций построен на использовании обобщенных физических соотношений, связывающих кривизны элемента и его относительные деформации на уровне выбранной оси в продольном направлении с изгибающими моментами и нормальной силой от внешней нагрузки. При этом сечение разделяется на малые участки с отдельным учетом напряжений в каждом участке бетона и каждом арматурном стержне с последующим численным интегрированием по высоте сечения элемента при определении связи напряжений в бетоне и арматурных стержнях с обобщенными усилиями (изгибающими моментами и нормальной силой) от внешнего нагружения. Данный метод расчета был положен в основу методики расчета стержневых конструкций, предлагаемой в СП 63.13330.2018. Согласно п. 6.1.19, при расчете стержневых железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели используются диаграммы состояния бетона. Однако, при этом при построении криволинейных диаграмм состояния бетона не рассматривается длительность нагружения, вследствие чего влияние ползучести бетона на деформирование конструкций остается неучтенным, что может привести к существенным погрешностям, в особенности, при длительном нагружении конструкций.

В целях более точного соответствия используемых в расчете диаграмм деформирования бетона реальному поведению материала под нагрузкой предлагается ввести в расчет диаграммы деформирования бетона с учетом длительности нагружения, то есть диаграммы-изохроны.

Для учета фактора ползучести бетона на относительные деформации железобетонного элемента в методику расчета стержневых конструкций согласно СП 63.13330.2018 предлагается внести следующие изменения:

- при определении относительных деформаций бетона в любой момент времени t следует учитывать длительность действия расчетной нагрузки $(t - t_0)$ при загрузении конструкции в возрасте бетона t_0 ;

- в качестве расчетной диаграммы состояния бетона следует принимать диаграмму-изохрону для соответствующей длительности нагружения;

- для арматуры влияние длительности нагружения не учитывается;

- за расчетное время нагружения $(t - t_0)$ принимается проектируемое время эксплуатации конструкции при заданном нагружении.

Условия для расчета нормальных сечений элемента по прочности с учетом длительности нагружения имеют вид:

$$|\varepsilon_{b,max}(t, t_0)| \leq \varepsilon_{b,ult}, \quad (29)$$

$$|\varepsilon_{s,max}| \leq \varepsilon_{s,ult}, \quad (30)$$

где $\varepsilon_{b,max}(t, t_0)$ - относительная деформация наиболее сжатого волокна бетона в нормальном сечении элемента от действия внешней нагрузки при длительности нагружения $(t - t_0)$; $\varepsilon_{s,max}$ - относительная деформация наиболее растянутого стержня арматуры в нормальном сечении элемента от действия внешнего нагружения; $\varepsilon_{b,ult}$ - предельное значение относительной деформации бетона при сжатии; для высокопрочных бетонов класса выше В80, для которых нисходящая ветвь не учитывается, рекомендуется принимать в качестве $\varepsilon_{b,ult}$ значение $\hat{\varepsilon}_b(t, t_0)$ в вершине диаграммы-изохроны для соответствующей длительности нагружения при $\eta = 1$; $\varepsilon_{s,ult}$ - предельное значение относительной деформации удлинения арматуры, принимаемое согласно указаниям п. 8.1.30 СП 63.13330.2018.

Величины $\varepsilon_{b,max}(t, t_0)$ и $\varepsilon_{s,max}$ находятся с использованием уравнений:

$$\varepsilon_{bi}(t, t_0) = \varepsilon_0(t, t_0) + \frac{1}{r_x(t, t_0)} \cdot Z_{bxi} + \frac{1}{r_y(t, t_0)} \cdot Z_{byi}; \quad (31)$$

$$\varepsilon_{sj} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r_x(t, t_0)} \cdot Z_{sxj} + \frac{1}{r_y(t, t_0)} \cdot Z_{syj}; \quad (32)$$

где $\varepsilon_0(t, t_0)$ - относительная деформация волокна, расположенного на пересечении выбранных координатных осей (в точке 0), при длительности нагружения $(t - t_0)$; $\frac{1}{r_x(t, t_0)}$, $\frac{1}{r_y(t, t_0)}$ - кривизны продольной оси в рассматриваемом поперечном сечении элемента в плоскостях действия изгибающих моментов M_x , M_y при длительности нагружения $(t - t_0)$; Z_{bxi} ,

Z_{byi} – координаты центра тяжести i -го участка бетона; Z_{sxj} , Z_{syj} – координаты центра тяжести j -го стержня арматуры.

В общем случае, когда на железобетонный элемент действуют изгибающие моменты двух направлений M_x, M_y и продольная сила N , для определения параметров $\varepsilon_0(t, t_0)$, $\frac{1}{r_x(t, t_0)}$, $\frac{1}{r_y(t, t_0)}$, входящих в выражения (31) – (32), используется система уравнений, в матричной форме имеющая вид:

$$\{M\} = [D(t, t_0)]\{\varepsilon(t, t_0)\}, \quad (33)$$

где $\{M\} = \{M_x, M_y, N\}^T$ – вектор-столбец усилий;

$\{\varepsilon(t, t_0)\} = \left\{ \frac{1}{r_x(t, t_0)}, \frac{1}{r_y(t, t_0)}, \varepsilon_0(t, t_0) \right\}^T$ – вектор-столбец кривизн и

относительного удлинения с учетом длительности нагружения;

$$[D(t, t_0)] = \begin{bmatrix} D_{11}(t, t_0) & D_{12}(t, t_0) & D_{13}(t, t_0) \\ D_{12}(t, t_0) & D_{22}(t, t_0) & D_{23}(t, t_0) \\ D_{13}(t, t_0) & D_{23}(t, t_0) & D_{33}(t, t_0) \end{bmatrix} - \text{матрица жесткости с}$$

учетом длительности нагружения.

В матрице жесткости $D_{ij}(t, t_0)$ ($i, j = 1, 2, 3$) – характеристики жесткости элемента с учетом длительности нагружения, определяемые следующими соотношениями:

$$D_{11}(t, t_0) = \sum_i A_{bi} Z_{bxi}^2 E_b(t, t_0) \nu_{bi}(t, t_0) + \sum_j A_{sj} Z_{sxj}^2 E_{sj} \nu_{sj}; \quad (34)$$

$$D_{22}(t, t_0) = \sum_i A_{bi} Z_{byi}^2 E_b(t, t_0) \nu_{bi}(t, t_0) + \sum_j A_{sj} Z_{syj}^2 E_{sj} \nu_{sj}; \quad (35)$$

$$D_{12}(t, t_0) = \sum_i A_{bi} Z_{bxi} Z_{byi} E_b(t, t_0) \nu_{bi}(t, t_0) + \sum_j A_{sj} Z_{sxj} Z_{syj} E_{sj} \nu_{sj}; \quad (36)$$

$$D_{13}(t, t_0) = \sum_i A_{bi} Z_{bxi} E_b(t, t_0) \nu_{bi}(t, t_0) + \sum_j A_{sj} Z_{sxj} E_{sj} \nu_{sj}; \quad (37)$$

$$D_{23}(t, t_0) = \sum_i A_{bi} Z_{byi} E_b(t, t_0) \nu_{bi}(t, t_0) + \sum_j A_{sj} Z_{syj} E_{sj} \nu_{sj}; \quad (38)$$

$$D_{33}(t, t_0) = \sum_i A_{bi} E_b(t, t_0) \nu_{bi}(t, t_0) + \sum_j A_{sj} E_{sj} \nu_{sj}; \quad (39)$$

здесь A_{bi} , A_{sj} – соответственно, площадь i -го участка бетона и j -го стержня арматуры; $E_b(t, t_0)$ – начальный модуль упругости бетона с учетом длительности нагружения; $\nu_{bi}(t, t_0)$ – коэффициент изменения секущего модуля упругости бетона i -го участка с учетом длительности нагружения; E_{sj} – модуль упругости j -го стержня арматуры; ν_{sj} – коэффициент изменения секущего модуля упругости j -го стержня арматуры.

При этом коэффициент изменения секущего модуля упругости бетона i -го участка следует принимать по методике диаграмм-изохрон для длительности нагружения $(t - t_0)$ согласно выражению (19). Начальный модуль упругости $E_b(t, t_0)$ для жесткого режима нагружения принимается как начальный модуль для данного возраста загрузки $E_b(t_0)$.

Предложенные изменения позволяют учитывать влияние фактора ползучести бетона на деформирование железобетонного элемента в любой момент времени эксплуатации конструкции.

Пример расчета деформаций конструкции колонны с учетом длительности нагружения. Исходные данные для расчета центрально сжатой колонны из ВСФБ и МВБ представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Исходные данные для расчета конструкции колонны

Параметр	Колонна из ВСФБ	Колонна из МВБ
Характеристики бетона	$R_{b,ser}(t_0) = 111,5$ МПа; $E_b(t_0) = 43100$ МПа	$R_{b,ser}(t_0) = 102,7$ МПа; $E_b(t_0) = 38200$ МПа
Высота колонны H	3000 мм	3000 мм
Размеры поперечного сечения $h \times b$	500 x 500 мм	500 x 500 мм
Фибровое армирование	1,5% по массе	нет
Стержневое армирование	конструктивное	конструктивное
Вертикальная нагрузка N	16600 кН	15290 кН
Влажность среды ϕ_{int}	100%	100%
Модуль открытой поверхности M_0	0 (рассматривается изолированная конструкция)	0 (рассматривается изолированная конструкция)
Возраст нагружения t_0	28 суток	28 суток
Режим нагружения	жесткий	жесткий

Определим относительные деформации в расчетном сечении для времени нагружения $t - t_0 = 1$ час, 10 суток, 33 суток, 180 суток, 365 суток.

Согласно описанной выше методике, при расчете сжатых бетонных элементов при расположении продольной сжимающей силы в пределах поперечного сечения элемента для определения $D_{ij}(t, t_0)$ в формулах (34) – (39) принимается площадь арматуры $A_{sj} = 0$. В рассматриваемом случае наибольшую деформацию имеет верхнее сечение колонны. Искомая деформация колонны в расчетном верхнем сечении с учетом длительности нагружения вычисляется по зависимости:

$$\varepsilon_b(t, t_0) = \frac{N}{A_b \cdot E_b(t, t_0) \cdot \nu_b(t, t_0)}, \quad (40)$$

где N – действующее усилие; A_b - площадь сечения конструкции; $E_b(t, t_0) = E_b(t_0)$ - начальный модуль упругости бетона; $\nu_b(t, t_0)$ - коэффициент изменения секущего модуля бетона в расчетном сечении для данного момента времени нагружения.

Сравнительный расчет относительной деформации колонны в расчетном верхнем сечении проведем с использованием методики Приложения Г СП 63.13330.2018 при криволинейной расчетной диаграмме состояния бетона. Искомая деформация колонны в верхнем сечении при кратковременном нагружении вычисляется по зависимости:

$$\varepsilon_b = \frac{N}{A_b \cdot E_b \cdot \nu_b}. \quad (41)$$

При продолжительном действии нагрузки, согласно рекомендациям п. 6.1.15 СП 63.13330.2018, значения модуля деформаций бетона определяют по формуле:

$$E_{b,\tau} = \frac{E_b}{1 + \varphi_{b,cr}}, \quad (42)$$

где $\varphi_{b,cr}$ – коэффициент ползучести бетона, принимаемый согласно п. 6.1.16 СП 63.13330.2018 равным 1 при рассматриваемых условиях задачи.

Сравнение полученных результатов расчета деформаций верхнего сечения колонны из ВСФБ и МВБ по предложенной методике диаграмм-

изохрон и по методике СП 63.13330.2018 при кратковременном и длительном действии нагрузки представлено на рисунке 6.

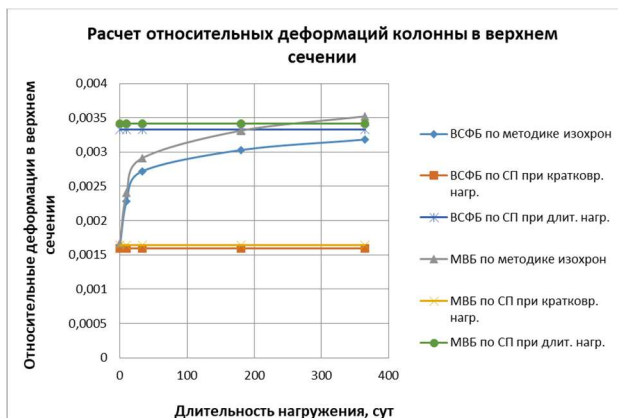


Рисунок 6 - Сравнение результатов расчета деформаций колонны из ВСФБ и МВБ в верхнем сечении по методике диаграмм-изохрон и по методике СП 63.13330.2018

Таким образом, применение методики диаграмм-изохрон при расчете конструкций позволяет получить полную картину деформирования в любой момент времени нагружения. Расчет деформаций по методике СП 63.13330.2018 дает значительную погрешность при длительности нагружения до 180 суток, при этом учет длительности действия нагрузки при помощи коэффициента ползучести завышает значения общих деформаций. Помимо этого, результаты расчета по данной методике практически не отражают снижения деформаций ползучести сталефибробетона за счет влияния фибры с течением времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов выполненного комплексного экспериментального и теоретического исследования формулируются следующие основные выводы.

1. Мелкозернистый высокопрочный бетон является весьма перспективным строительным материалом. Его основной недостаток — высокая хрупкость — может быть устранен путем введения в состав дисперсного армирования из стальной фибры. Результаты данной работы содержат важные для практики проектирования экспериментальные и теоретические данные о характеристиках механических и реологических свойств высокопрочных бетонов исследованных составов.

2. Представлены результаты комплексного экспериментального исследования свойств нового класса ВСФБ и его неармированной матрицы. Получены данные об изменениях характеристик основных механических

свойств ВСФБ с минимальным рациональным содержанием фибры и его матрицы в зависимости от возраста, изучены процессы усадки исследуемых составов с учетом возраста бетона, а также их ползучести при длительном нагружении различными уровнями нагрузки ($0,3R_b$, $0,6R_b$, $0,8R_b$) в возрасте 7, 28 и 100 суток. По отдельной методике получены диаграммы деформирования исследуемых бетонов при сжатии с доведением до высоких уровней нагрузки, близких к значениям прочности.

3. Разработаны аналитические зависимости для описания изменения призмочной прочности и модуля упругости при кратковременном сжатии исследуемого ВСФБ с минимальным эффективным содержанием фибры и его матрицы в зависимости от возраста в сравнении с эталонными значениями в возрасте 28 суток.

5. Выполнено уточнение методики описания полных диаграмм деформирования бетона при кратковременном сжатии применительно к рассматриваемым составам. Предложенная методика позволяет достоверно описывать продольные и поперечные деформации ВСФБ и МВБ в зависимости от уровня нагружения.

6. Предложена аналитическая зависимость для описания изменения деформаций усадки исследуемого ВСФБ при минимальном эффективном содержании фибры и его матрицы в зависимости от длительности наблюдения с учетом возраста бетона в момент окончания его влажностного хранения.

7. На основе анализа полученных экспериментальных значений мер ползучести МВБ и ВСФБ подобраны аналитические зависимости для построения теоретических кривых текущих и предельных мер ползучести бетонов с учетом возраста нагружаемого бетона и уровня нагружения, обеспечивающие хорошую сходимость с опытными данными. Выполнено развитие экспериментального подхода к описанию линейной меры ползучести на случай нелинейной ползучести.

8. Разработана методика построения полного спектра диаграмм-изохрон для нового класса исследуемых бетонов, начиная с 1 часа продолжительности нагружения до теоретической бесконечности. Полученные теоретическим путем диаграммы-изохроны имеют хорошую сходимость с данными экспериментальных исследований.

9. Разработаны предложения по развитию методики описания характеристик ползучести бетона при построении диаграмм-изохрон. Предлагаемые соотношения позволяют учитывать нелинейность как текущих, так и предельных мер ползучести бетона, их зависимость от возраста и уровня нагружения, а также старение бетона.

10. Внесены предложения по развитию современного диаграммного метода расчета конструкций из высокопрочных бетонов и сталефибробетона нового поколения на основе нелинейной деформационной модели с учетом разработанных методик расчета и аналитических соотношений.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1) Карпенко Н.И., Каприелов С.С., Безгодов И.М., **Моисеенко Г.А.**, Степанов М.В. Исследование деформаций усадки мелкозернистого высокопрочного бетона и сталефибробетона при рациональном содержании фибры // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. №3 (375) 2018. С. 227-230. *(входит в международную реферативную базу SCOPUS)*

2) Степанов М.В., **Моисеенко Г.А.** Развитие экспериментального подхода к определению меры ползучести мелкозернистого высокопрочного бетона и сталефибробетона при рациональном содержании фибры // Строительство и реконструкция. №3 (77) 2018, май-июнь. С. 98-104.

3) Степанов М.В., **Моисеенко Г.А.** Диаграммы деформирования мелкозернистого высокопрочного бетона и сталефибробетона при сжатии // Строительство и реконструкция. №3 (83) 2019, май-июнь. С. 11-21.

4) **Моисеенко Г.А.** Изменение призмочной прочности и модуля упругости высокопрочного сталефибробетона и его матрицы в зависимости от возраста // Строительные материалы. №6 (781). Июнь 2020 г. С. 13-17.

5) **Moiseenko G.A.** Method for construction of isochron diagrams of high-strength steel fiber concrete and its matrix // Строительство и реконструкция. № 5 (91) 2020. С. 32-45.

6) **Моисеенко Г.А.** Исследование текущих и предельных мер ползучести высокопрочного сталефибробетона и его матрицы с учетом возраста в момент нагружения // БСТ: Бюллетень строительной техники, 2022, №4 (1052), с. 42-45.

7) Карпенко Н.И., **Моисеенко Г.А.** Свойства высокопрочного сталефибробетона с минимальным эффективным содержанием фибры при нагружениях различной длительности // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений, 2022, Т. 18, №6, С. 503-514.

Публикации в изданиях, входящих в РИНЦ:

8) Карпенко Н.И., Каприелов С.С., Петров А.Н., Безгодов И.М., **Моисеенко Г.А.**, Степанов М.В., Чилин И.А. Исследование физико-механических и реологических свойств высокопрочных сталефибробетонов из самоуплотняющихся смесей // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2017 году: Сб. науч. тр. РААСН. Т.2. – М.: Издательство АСВ, 2018. – С. 237-246.