

На правах рукописи

Аткишкин Игорь Владимирович

**ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ СЖАТЫХ
ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
С ВНУТРЕННИМ СТАЛЬНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции,
здания и сооружения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Магнитогорск
2006

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Кришан Анатолий Леонидович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Пирадов Константин Александрович

кандидат технических наук, доцент
Варламов Андрей Аркадьевич

Ведущая организация: НИИЖБ, г. Москва

Защита состоится «29» ноября 2006 г. в 14³⁰ часов на заседании диссертационного совета К 212.111.01 при ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, Челябинской обл., пр. Ленина, 38, Малый актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «18» октября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук,
доцент

А. Л. Кришан

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы: Трубобетонные конструкции уже давно доказали свою эффективность. Установлено, что в сжатых трубобетонных элементах преимущества косвенного армирования выражены наиболее полно по сравнению с конструкциями, в которых реализованы другие известные способы армирования, обеспечивающие условия объемного сжатия для бетона.

К основным достоинствам трубобетонных конструкций можно отнести простоту их изготовления, высокую эксплуатационную надежность и сравнительно небольшую площадь поперечного сечения, с вытекающей отсюда возможностью сокращения расхода материалов и денежных средств.

Трубобетонные элементы используются в сооружениях и конструкциях, предназначенных для длительных сроков эксплуатации. С этих позиций их практическое применение невозможно без комплексного исследования, неотъемлемой частью которого является изучение работы трубобетона под длительно действующей нагрузкой. Именно длительная прочность, которая напрямую влияет на долговечность, должна стать основной расчетной характеристикой как самой конструкции, так и всего сооружения в целом.

Однако, несмотря на вышесказанное, количество длительных исследований сталетрубобетонных необжатых элементов классической конструкции (СТБ) весьма немногочисленно. Для трубобетонных конструкций с внутренним стальным сердечником, в том числе с предварительно обжатым ядром (СТБО), такие исследования вообще не проводились.

С этих позиций представляется актуальным экспериментально-теоретическое исследование длительной прочности, ползучести и усадки трубобетонных элементов из бетона, твердеющего под давлением.

Цель работы – разработка методики расчета длительной прочности трубобетонных элементов с предварительно обжатым ядром и внутренним стальным сердечником, работающих на сжатие в области случайных эксцентриситетов.

Автор защищает:

- усовершенствованную технологию изготовления сталетрубобетонных элементов с предварительно обжатым бетонным ядром;

- конструкцию сталетрубобетонного элемента с предварительно обжатым бетонным ядром и внутренним стальным трубчатым сердечником, защищенную свидетельством на полезную модель;
- скорректированную стандартную методику проведения экспериментальных исследований по изучению реологических свойств сжатых сталетрубобетонных элементов с учетом их конструктивных особенностей;
- результаты анализа экспериментальных данных по определению ползучести и усадки трубобетонных элементов с предварительно обжатым ядром и внутренним стальным сердечником при длительном приложении осевой сжимающей нагрузки;
- методику и программу расчета длительной прочности сталетрубобетонных элементов с предварительно обжатым ядром и внутренним стальным сердечником, работающих на сжатие в области случайных эксцентриситетов.

Научную новизну работы составляют:

- усовершенствованная конструкция трубобетонного элемента с предварительно обжатым бетонным ядром и внутренним стальным трубчатым сердечником;
- результаты анализа экспериментальных данных по определению усадки и ползучести сжатых трубобетонных элементов с предварительно обжатым ядром и внутренним стальным сердечником при длительном приложении осевой нагрузки;
- аналитические зависимости, связывающие характеристики ползучести исходного бетона, бетона твердеющего под давлением и предварительно обжатого ядра трубобетонных элементов;
- методика расчета длительной прочности трубобетонных элементов с предварительно обжатым ядром и внутренним стальным сердечником, работающих на сжатие в области случайных эксцентриситетов.

Практическую ценность работы представляют усовершенствованная конструкция и способ изготовления сталетрубобетонных элементов из предварительно обжатого бетона с внутренним стальным трубчатым сердечником, а также алгоритм и программа для ЭВМ по расчету длительной прочности этих конструкций при работе на сжатие в области случайных эксцентриситетов. Предложенная методика расчета длительной прочности используется при подготовке материалов «Рекомендаций по расчету и проектированию сталетрубобетонных колонн», которые разрабатываются ГОУ ВПО «МГТУ» совместно с ФГУП «НИЦ «Строительство».

Внедрение результатов. Усовершенствованные трубобетонные элементы с внутренним стальным сердечником и методика их расчета нашли практическое применение в качестве колонн связевого каркаса на объекте «Российский объект уничтожения химического оружия» в г. Щучье Курганской обл., а также при усилении несущего каркаса «Производственного здания вспомогательного назначения (бомбоубежища)» в г. Пласт Челябинской обл. Материалы диссертации используются при подготовке «Рекомендаций по расчету и проектированию стале-трубобетонных колонн», а также в учебном процессе на архитектурно-строительном факультете ГОУ ВПО «МГТУ».

Апробация полученных результатов.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на четырех международных научно-технических конференциях («Эффективные строительные конструкции. Теория и практика», Пенза, 2004; 64-я научно-техническая конференция, г. Магнитогорск, 2006; 63-я научно-техническая конференция НГАСУ, г. Новосибирск, 2006; «Бетон и железобетон в третьем тысячелетии», Ростов-на-Дону, 2006), на заседаниях и семинарах, проводимых кафедрой Строительных конструкций МГТУ им. Г.И. Носова. Опытный образец трубобетонного элемента новой конструкции выставлялся на X и XI Петербургских международных экономических форумах-выставках «Инновационные достижения», где получил диплом II степени.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ, среди которых 7 статей, 2 тезисов докладов, 1 свидетельство на полезную модель.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, основных результатов работы, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 154 страницах, содержит 12 таблиц, 39 рисунков, библиографический список из 140 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении освещена актуальность проблемы, научная новизна и практическая ценность работы, изложена сущность диссертации, поставлены цель и задачи и указаны основные пути их решения.

В первой главе выполнен аналитический обзор экспериментально-теоретических исследований бетона, работающего в условиях объемно-

го напряженного состояния, при кратковременном и длительном загрузениях.

Кроме того, в данной главе приведены общие сведения о трубобетоне, а также обзор исследований, посвященных кратковременным и длительным испытаниям трубобетонных конструкций. Этими вопросами занимались А.А. Гвоздев, Г.П. Передерий, В.А. Росновский, А.Ф. Маренин, А.Б. Ренский, Н.Ф. Скворцов, И.Г. Людковский, С.В. Коврыга, А.П. Нестерович, Л.И. Стороженко, А.А. Долженко, Р.С. Санжаровский, А.И. Кикин, В.А. Труль, Л.К. Лукша, Н.В. Микула, В.М. Фонов, В.И. Гнедовский, Г.М. Мартиросов, А.И. Шахворостов, В.М. Сурдин, А.Л. Кришан, М.Ш. Гареев, А. Менаже, Ф. Бойд, У. Кофер, Цай Ш.-Х. и др.

Результатами вышеперечисленных исследований подтверждена высокая несущая способность и эффективность трубобетона. У бетона в условиях объемного напряженного состояния существенно повышаются прочностные и деформативные характеристики, улучшаются реологические свойства. Деформации усадки и ползучести бетонного ядра существенно меньше таковых в традиционных бетонных и железобетонных конструкциях. Стальная оболочка оказывает сдерживающее влияние на развитие деформаций и препятствует влагообмену с окружающей средой.

По результатам анализа существующих источников можно сделать вывод, что длительным испытаниям трубобетонных конструкций уделено мало внимания. На сегодняшний день нет единого подхода к оценке напряженно-деформированного состояния бетона, работающего в трехосном сжатии при длительном нагружении. Отсутствуют нормативные требования по расчету длительной прочности трубобетона.

Анализ опубликованных работ показал, что одной из наиболее перспективных разработок в этом направлении является методика диаграмм-изохрон, разработанная Н.И. Карпенко. Предложенный им способ аналитического описания длительного деформирования бетона в условиях трехосного сжатия был принят за основу при разработке методики расчета длительной прочности сталетрубобетонных элементов с учетом ползучести бетонного ядра.

Проведенные исследования позволили выявить и недостатки трубобетонных конструкций. Одним из главных конструктивных недостатков сжатых трубобетонных элементов является отрыв внешней стальной оболочки от бетонного сердечника на определенной стадии работы по причине разности начальных коэффициентов поперечных

деформаций бетона и стали ($\nu_s \approx 0,3$, $\nu_b \approx 0,2$). Кроме того, существует мнение, что вследствие усадочных деформаций бетонного ядра может образоваться зазор между ядром и оболочкой. Это приводит к тому, что на начальных этапах нагружения бетонное ядро работает в условиях одноосного напряженного состояния, что негативно сказывается на несущей способности всего элемента в целом.

Известны различные способы устранения описанного недостатка. Наиболее эффективным из них является приложение длительного механического давления на бетонную смесь в процессе твердения. В результате длительного прессования улучшаются прочностные и реологические свойства бетона, а стальная оболочка получает предварительное напряжение в поперечном направлении.

Большой вклад по изучению влияния прессования на характеристики бетона внесли И.Н. Ахвердов, Я.М. Белкин, И.Р. Енукашвили, Г.З. Лохвицкий, Г.В. Мурашкин, В.Г. Матвеев, А.Н. Попов и А.Л. Ционский, А.Л. Кришан и А.А. Варламов, И.Е. Сеськин, А.С. Кубанейшвили, А.Б. Пирадов, А.М. Юрятин и др. Среди зарубежных ученых можно отметить работы Е.В. Робертса и Л.Е. Лесе, Д.М. Роя, Е. Фрейсинэ, Р. Лермита, И.Ф. Иден, А. Гумела, И.И. Баломея, С.И. Беллами.

Выявлено, что обработка бетона давлением в ранние сроки твердения значительно повышает его прочностные и деформативные характеристики. С технологической точки зрения этот метод отличается стабильностью получения материалов с заданными свойствами и относительной дешевизной. Установлено также, что усадка и ползучесть БТД ниже, чем обычного.

В трубобетонных конструкциях БТД впервые применили Г.В. Мурашкин с А.А. Сахаровым и А.Л. Кришан с М.Ш. Гареевым. Для опрессовки бетонной смеси и предварительного напряжения стальной оболочки этими учеными использовались пустотообразователи разных конструкций. Один из основных недостатков данной технологии заключается в эффекте распрессовки бетонного ядра сразу же после извлечения пустотообразователя. Здесь же следует отметить, что для этих конструкций испытаний в условиях длительного приложения нагрузки не проводилось.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости дальнейшего совершенствования трубобетонных конструкций. Проблема разработки методики расчета длительной прочности трубобетонных элементов также является актуальной.

На основании проведенного анализа экспериментально-теоретических исследований трубобетонных конструкций автором обоснована тема диссертационной работы и сформулирована цель, в рамках которой поставлены следующие задачи:

1. Усовершенствовать конструкцию и способ изготовления трубобетонных элементов.
2. Скорректировать стандартную методику проведения экспериментальных исследований по изучению длительной прочности и реологических свойств трубобетонных элементов с учетом их конструктивных особенностей.
3. Экспериментально исследовать деформации усадки и ползучести исходного и опрессованного бетона принятого состава.
4. Экспериментально исследовать усадочные деформации бетонного ядра трубобетонных элементов с внутренним сердечником.
5. Экспериментально исследовать деформации ползучести центрально сжатых трубобетонных элементов с внутренним сердечником и предел их длительной прочности.
6. Получить зависимости, связывающие реологические свойства предварительно обжатого бетонного ядра трубобетонных элементов с аналогичными свойствами исходного бетона.
7. Разработать методику расчета длительной прочности трубобетонных элементов, позволяющую наиболее полно учесть их конструктивные особенности и действительное напряженно-деформированное состояние при сжатии в области случайных эксцентриситетов.

Во второй главе описывается способ изготовления усовершенствованной конструкции трубобетонного элемента с внутренним стальным сердечником в виде трубки, расположенной коаксиально внешней стальной оболочке. Уплотнение бетонной смеси и предварительное напряжение внешней стальной оболочки достигаются посредством последовательного введения в отформованную бетонную смесь нескольких металлических трубок. Наружный диаметр последней трубки выбирался таким образом, чтобы получить расчетную величину уплотнения бетонной смеси, соответствующей требуемой степени бокового обжатия бетона (порядка 2,5 МПа).

С целью решения поставленных в диссертационной работе задач было изготовлено несколько серий опытных образцов. Для экспериментов по определению усадки было изготовлено две серии СТБ и СТБО элементов высотой 600 мм и наружным диаметром оболочки 159 мм. Для определения деформаций линейной и нелинейной ползучести

при сжатии также было изготовлено шесть серий СТБ и СТБО элементов высотой 500 мм и наружным диаметром оболочки 115 мм. В этих испытаниях принятые уровни длительного нагружения составили 0.41, 0.6, 0.81 и 0.90 от кратковременной разрушающей нагрузки. Кроме того, с целью оценки влияния объемного напряженного состояния, сдерживающего влияния оболочки, а также длительного прессования на реологические свойства бетона исходного состава было изготовлено восемь серий изолированных бетонных призм, неопрессованных и опрессованных при давлениях 1, 2 и 3 МПа.

Для получения основных прочностных и деформативных характеристик конструкций были проведены кратковременные испытания трубобетонных образцов и бетонных призм на осевое сжатие.

Скорректирована стандартная методика определения деформаций усадки и ползучести с учетом конструктивных особенностей трубобетонных элементов. Предварительно проведенные испытания для оценки надежности и достоверности предложенного способа измерений деформаций показали хорошие результаты. Измерения деформаций бетонных призм производились согласно ГОСТ 24544-81*.

Длительные испытания проводились в климатической лаборатории кафедры строительных конструкций МГТУ. Нагружение трубобетонных образцов осуществлялось в силовых установках с помощью плоских гидравлических домкратов. Бетонные изолированные призмы испытывались в установках пружинного типа.

В третьей главе проведен анализ результатов длительных испытаний СТБ и СТБО образцов, а также изолированных бетонных призм.

В начальный период наблюдения при изучении усадки во всех трубобетонных образцах наблюдались деформации набухания. Впоследствии в продольном направлении фиксировались усадочные деформации. В СТБ элементах в поперечном направлении фиксировалось набухание, тогда как в СТБО элементах после небольшого периода набухания деформации стали указывать на незначительное уменьшение объема. Однако, это скорее связано не с усадочными процессами, а вызвано деформациями ползучести, проявившимися вследствие действия усилия предварительного обжатия стальной оболочки.

Проведенными исследованиями подтвержден тот факт, что усадочные деформации трубобетона на порядок меньше аналогичных в традиционных бетонных и железобетонных конструкциях. Доказана целесообразность применения БТД. В конечном итоге, предельные деформации усадки в продольном направлении для СТБО элементов оказа-

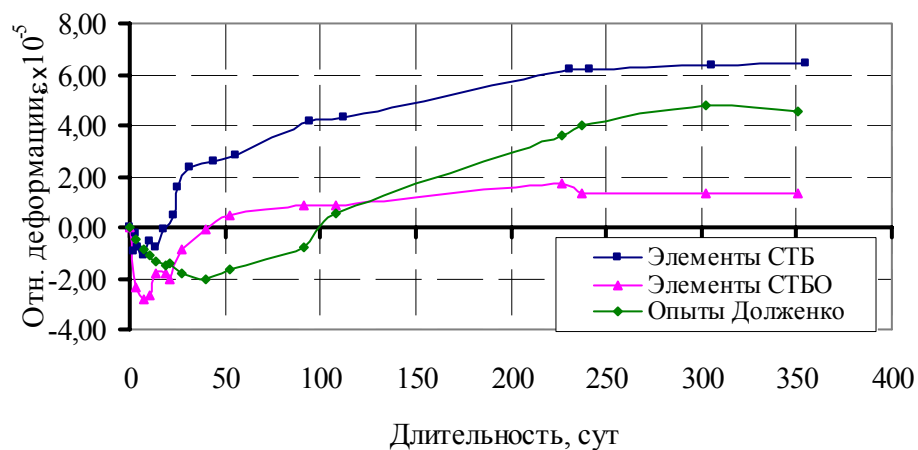


Рис. 1. График изменения продольных усадочных деформаций бетонного ядра трубобетонных элементов

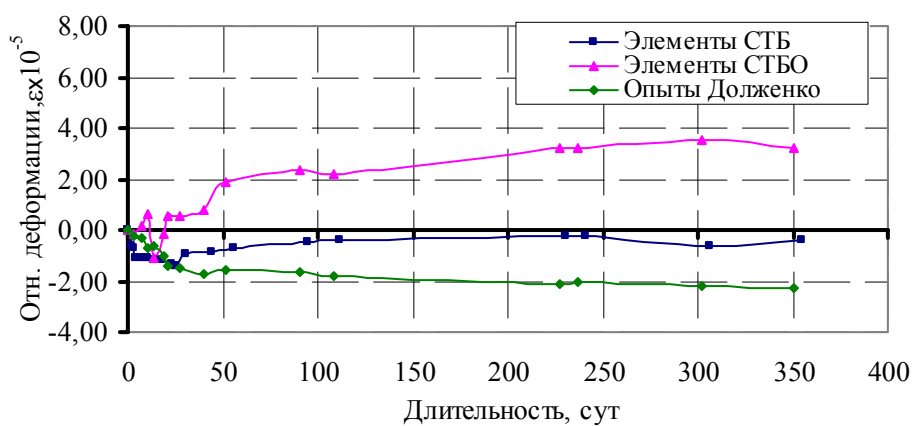


Рис. 2. График изменения поперечных усадочных деформаций бетонного ядра трубобетонных элементов

лись меньше, чем для СТБ, а затухание усадочных процессов наступило быстрее. Полученные данные хорошо согласуются с результатами работ, проведенных ранее другими исследователями.

Результаты по определению усадки изолированных бетонных

призм свидетельствуют, что:

- стальная оболочка оказывает существенное сдерживающее влияние, вследствие чего зафиксированные деформации бетона ненагруженных призм оказались примерно вдвое больше, чем усадка бетонного ядра в трубобетонных конструкциях;
- благодаря длительному прессованию усадка опрессованных бетонных призм на 25÷35 % меньше, чем неопрессованных.

Проведенные испытания по определению ползучести трубобетонных конструкций позволили установить, что при низких уровнях загрузки ($\eta=0,4\div0,6$) ползучесть трубобетонных элементов относительно невелика и существенно меньше аналогичных деформаций для обычных железобетонных конструкций. Резкое увеличение деформаций ползучести происходит при более высоких уровнях загрузки ($\eta>0,8$), вследствие того, что стальная оболочка к этому моменту уже переходит в пластическое состояние, а величина продольных напряжений в бетонном ядре близка к верхней границе микротрещинообразования.

При относительном уровне загрузки $\eta=0,81$ рост деформаций ползучести СТБО элементов прекратился примерно через 3 месяца после загрузки и разрушения конструкций не произошло. При $\eta=0,90$ проявилось интенсивное развитие ползучести, приведшее к разрушению опытных образцов в течение 5 суток. Опытные данные были сопо-

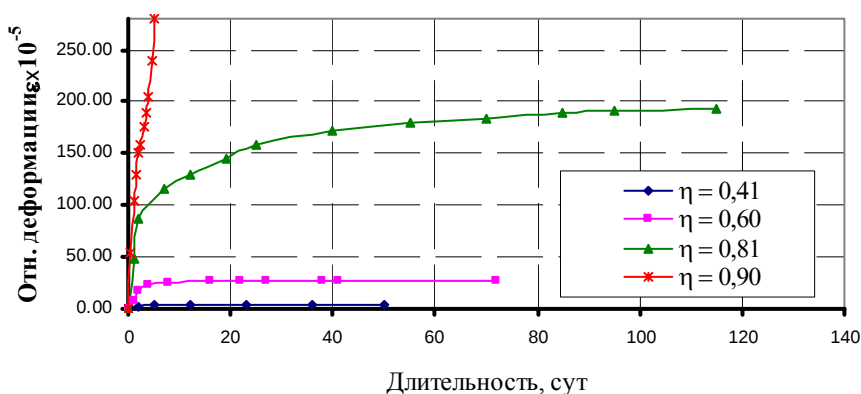


Рис. 3. Сравнительный график деформаций ползучести в продольном направлении СТБО элементов для всех уровней длительного нагружения

ставлены с результатами, полученными ранее А.И. Кикиным и Р.С. Санжаровским. При исследовании работы СТБ элементов они установили, что при относительном уровне длительного нагружения $\eta = 0,83$ ползучесть постепенно затухала. При $\eta = 0,855$ рост деформаций ползучести не прекращался и через некоторое время происходило разрушение опытных образцов.

На основании анализа полученных данных можно сделать вывод, что относительный предел длительной прочности для сжатых трубобетонных образцов составляет величину порядка $\eta = 0,84 \div 0,86$.

Установлено, что ползучесть СТБО элементов ниже на $30 \div 40 \%$, чем у СТБ. Это подтверждает целесообразность опрессовки бетонной смеси и создания предварительного обжатия на стадии их изготовления.

На основании результатов экспериментов можно утверждать, что:

- трубобетонные элементы эффективно работают под действием длительно действующей осевой сжимающей нагрузки;
- усадка и ползучесть трубобетонных конструкций значительно ниже, чем бетонных и железобетонных;
- доказано, что применение бетона, твердеющего под давлением, и создание предварительного напряжения в стальной обойме трубобетонных конструкций позволяют существенно улучшить их реологические характеристики.

В четвертой главе представлена методика расчета длительной прочности сталетрубобетонных элементов. Предлагаемый подход базируется на рассмотрении трансверсально-изотропных моделей бетона и стали для случая длительного деформирования и является продолжением разработанного ранее метода расчета напряженно-деформированного состояния СТБ и СТБО элементов при кратковременном сжатии в области случайных эксцентриситетов. Длительность нагружения учитывается с помощью разработанной Н.И. Карпенко методики диаграмм-изохрон. Она позволяет аналитически описать напряженно-деформированное состояние (НДС) бетона с учетом его физической нелинейности при различных характерах нагружения.

Преимущество методики диаграмм-изохрон заключается в возможности описывать диаграммы деформирования при различных режимах кратковременного и длительного нагружения на всех стадиях деформирования с помощью единообразных зависимостей. Кроме того, данный подход позволяет максимально использовать нормативные (унифицированные) характеристики ползучести для учета нелинейности бетона.

В данной расчетной модели принимаются следующие основные допущения:

1. Материалы бетонного ядра, стальной оболочки и внутреннего стального сердечника трансверсально-изотропны. Зависимости между напряжениями и деформациями записываются в форме обобщенного закона Гука, но с переменными модулями деформаций и коэффициентами Пуассона бетона и стали.

2. При рассмотрении напряженно-деформированного состояния сталетрубобетонных элементов направления их геометрических осей симметрии считаются совпадающими с направлениями нормалей главных площадок для всех этапов загрузки.

3. При передаче осевого сжимающего усилия на трубобетонный элемент предполагается совместная работа бетонного ядра, внешней стальной оболочки и внутреннего стального сердечника вплоть до наступления предельного состояния.

4. В предельном состоянии бетонное ядро находится в условиях трехосного сжатия, а стальная труба – в состоянии объемного напряженного состояния «сжатие-растяжение-сжатие».

5. После наступления текучести величины интенсивности напряжений в стальной оболочке и внутреннем сердечнике считаются постоянными и равными напряжениям в момент перехода в пластическое состояние. При этом сталь оболочки и сердечника подчиняется условию начала пластичности Губера-Мизеса-Генки.

6. Деформации ползучести стали ничтожны по сравнению с ползучестью бетонного ядра и их развитие во времени в расчете не учитывается.

7. Усадочные деформации бетонного ядра СТБ и СТБО элементов в расчете не учитываются в виду их малой величины и несущественного влияния на изменение напряженно-деформированное состояние с течением времени.

С учетом вышесказанного, физические соотношения для бетона и стали для случая длительного нагружения центрально сжатых трубобетонных элементов, в цилиндрической системе координат, записываются следующим образом:

а) для бетонного ядра

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{by}(t, t_0) \\ \varepsilon_{br}(t, t_0) \end{Bmatrix} = \frac{1}{\nu_{b3}(t, t_0) E_{b3}(t, t_0)} \times \begin{bmatrix} 1 & -2\mu_{yr}(t, t_0) \\ -\mu_{rr}(t, t_0) & (1 - \mu_{rr}(t, t_0)) \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \sigma_{by}(t, t_0) \\ \sigma_{br}(t, t_0) \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{by}(t, t_0)$, $\varepsilon_{br}(t, t_0)$ – относительные деформации в бетонном ядре, соответственно в продольном и радиальном направлениях;
 $\sigma_{by}(t, t_0)$, $\sigma_{br}(t, t_0)$ – напряжения в бетонном ядре, соответственно в продольном и радиальном направлениях;
 $E_{b3}(t, t_0)$ – начальный модуль упругости бетона при трехосном сжатии;
 $\nu_{b3}(t, t_0)$ – коэффициент изменения секущего модуля деформаций бетона при трехосном сжатии;
 $\mu_{yr}(t, t_0)$, $\mu_{rr}(t, t_0)$ – коэффициенты поперечной деформации бетона по соответствующим осям;
 t_0 – возраст бетона к началу загрузки;
 t – рассматриваемый момент времени после загрузки.

б) для внешней стальной оболочки

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{sy}(t, t_0) \\ \varepsilon_{s\tau}(t, t_0) \\ \varepsilon_{sr}(t, t_0) \end{Bmatrix} = \frac{1}{\nu_s(t, t_0)E_s} \times \begin{bmatrix} 1 & -\mu_s(t, t_0) & -\mu_s(t, t_0) \\ -\mu_s(t, t_0) & 1 & -\mu_s(t, t_0) \\ -\mu_s(t, t_0) & -\mu_s(t, t_0) & 1 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \sigma_{sy}(t, t_0) \\ \sigma_{s\tau}(t, t_0) \\ \sigma_{sr}(t, t_0) \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{sy}(t, t_0)$, $\varepsilon_{sr}(t, t_0)$, $\varepsilon_{s\tau}(t, t_0)$, $\sigma_{sy}(t, t_0)$, $\sigma_{sr}(t, t_0)$, $\sigma_{s\tau}(t, t_0)$ – напряжения и относительные деформации в оболочке, соответственно в продольном, радиальном и тангенциальном направлениях;
 E_s – начальный модуль упругости стали оболочки;
 $\nu_s(t, t_0)$ – коэффициент изменения секущего модуля деформаций стали оболочки;
 $\mu_s(t, t_0)$ – коэффициент поперечной деформации стали оболочки;

в) для внутреннего стального сердечника

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{sy}^{\cdot}(t, t_0) \\ \varepsilon_{s\tau}^{\cdot}(t, t_0) \\ \varepsilon_{sr}^{\cdot}(t, t_0) \end{Bmatrix} = \frac{1}{\nu_s(t, t_0)E_s^{\cdot}} \times \begin{bmatrix} 1 & -\mu_s(t, t_0) & -\mu_s(t, t_0) \\ -\mu_s(t, t_0) & 1 & -\mu_s(t, t_0) \\ -\mu_s(t, t_0) & -\mu_s(t, t_0) & 1 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \sigma_{sy}^{\cdot}(t, t_0) \\ \sigma_{s\tau}^{\cdot}(t, t_0) \\ \sigma_{sr}^{\cdot}(t, t_0) \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

В системе уравнений (3) обозначения аналогичны системе (2). С целью упрощения решения поставленной задачи принято допущение, что $E_s = E_s^{\cdot}$, $\nu_s(t, t_0) = \nu_s^{\cdot}(t, t_0)$, $\mu_s(t, t_0) = \mu_s^{\cdot}(t, t_0)$.

Для трубобетонных элементов сплошного сечения без внутреннего сердечника количество уравнений, связывающих напряжения с деформациями, сводится к пяти, а число неизвестных в системах уравнений равно восьми. Для трубобетонных элементов с внутренним сердечником количество уравнений сводится к восьми, а число неизвестных в системах уравнений к двенадцати. Используя уравнения совместности деформаций бетона и стали, связь между трансверсальными деформациями, а также условие равенства проекций внешних сил и внутренних усилий на продольную ось элемента, можно вычислить все составляющие напряженно-деформированного состояния.

Основная идея построения диаграммы-изохроны заключается в том, что она представляет собой диаграмму деформирования, все точки которой получены за одинаковый промежуток времени натекания деформаций $(t-t_0)$. Аналитическая запись диаграмм-изохрон для любого времени t в общем виде подобна аналогичной записи диаграмм кратковременного деформирования бетона:

$$\varepsilon_b(t, t_0) = \frac{\sigma_b(t, t_0)}{E_b(t, t_0)\nu_b(t, t_0)}. \quad (4)$$

Так как трубобетонные элементы являются статически неопределимыми конструкциями, то процесс описания диаграмм-изохрон применительно к трубобетону несколько усложняется. Прежде всего необходимо получить диаграмму деформирования бетонного ядра для кратковременного сжатия. Затем, отталкиваясь от полученной диаграммы, определять для каждой последующей диаграммы-изохроны при времени $(t-t_0)$ коэффициент изменения секущего модуля деформаций бетона с учетом ползучести в условиях объемного сжатия $\nu_{b3}(t, t_0)$ на всех этапах деформирования. Для каждой из выбранных ступеней загрузки следует учитывать процесс перераспределения усилий между бетонным ядром, стальной оболочкой и внутренним стальным сердечником.

Зависимость по определению $\nu_{b3}(t, t_0)$ предлагается записать в таком же виде, как и известное выражение для одноосного сжатия:

$$\nu_{b3}(t, t_0) = \frac{\nu_{b3}(t_0)\alpha_{E3}(t_0)}{\alpha_{E3}(t_0) + \nu_{b3}(t_0)f_c\varphi_3(t, t_0)}, \quad (5)$$

где $\nu_{b3}(t_0)$ – коэффициент изменения секущего модуля бетона в условиях трехосного кратковременного сжатия;
 $\alpha_{E3}(t_0)$ – отношение $E_{b3}/E_{b3}(t_0)$ в условиях объемного напряженного состояния;
 $\varphi_3(t, t_0)$ – характеристика линейной ползучести бетона в условиях трехосного сжатия;
 f_c – функция нелинейности для связи общей и линейной ползучести.

В начале диаграммы деформирования функция нелинейности $f_c = 1$, коэффициент изменения секущего модуля в условиях трехосного кратковременного сжатия $\nu_{b3}(t_0) \cong 1$. В вершине диаграммы f_c определяется при $\eta_3(t, t_0) = 1$, а $\nu_{b3}(t_0) = \nu_{b3,u}(t_0)$. Учитывая это, из формулы (5) можно получить выражения для определения $\nu_{b3}(t, t_0)$ в начале и в вершине диаграммы деформирования бетона в условиях трехосного длительного сжатия.

Тогда коэффициент изменения секущего модуля $\nu_{b3}(t, t_0)$ на любом этапе построения диаграммы вычисляется согласно предложению Н.И. Карпенко:

$$\nu_{b3}(t, t_0) = \nu_{b3,u}(t, t_0) + [\nu_{03}(t, t_0) - \nu_{b3,u}(t, t_0)] \times \\ \times \sqrt{1 - \omega_{1b}\eta_3(t, t_0) - \omega_{2b}\eta_3^2(t, t_0)}, \quad (6)$$

где ω_{1b}, ω_{2b} – параметры кривизны диаграммы « σ_{by} - ε_{by} » (определяются с использованием экспериментальных данных для конкретного состава бетона).

Используемую в формуле (5) характеристику линейной ползучести бетона с учетом сдерживающего влияния трубы при трехосном сжатии предлагается определять следующим образом:

$$\varphi_3(t, t_0) = \frac{A_\varphi}{1 + m} \varphi_l(t, t_0), \quad (7)$$

где φ_l – линейная составляющая характеристики ползучести;
 A_φ – эмпирический коэффициент (по результатам испытаний 30 ла-

бораторных образцов трубобетонных конструкций его значение рекомендуется принять равным 0,6. По мере накопления статистических данных величина A_ϕ будет уточняться);

$$m = \frac{\sigma_{br,u}(t_0)}{R_{b3}(t_0)}, \quad (8)$$

где $\sigma_{br,u}(t_0)$ – напряжения в бетонном ядре в радиальном направлении в вершине диаграммы деформирования при кратковременном осевом сжатии;
 $R_{b3}(t_0)$ – значения кратковременной прочности бетона в условиях трехосного кратковременного сжатия.

Принимая во внимание предложения И.Е. Прокоповича по определению характеристики ползучести стареющего бетона во времени:

$$\varphi_l(t, t_0) = 0,5\varphi_p(1 + e^{-2\gamma_1(t-t_0)}) \times (1 - 0,8e^{-\gamma_1(t-t_0)})\Delta(t, t_0). \quad (9)$$

В формуле (9) параметр φ_p обозначает предельную характеристику линейной ползучести бетона, твердеющего под давлением. Ее значение предлагается определять следующим образом:

$$\varphi_p = (a + b \cdot e^{-P})\varphi, \quad (10)$$

где $a = 0,5$ и $b = 0,5$ – эмпирические коэффициенты;

P – осредненная величина давления обжатия бетонной смеси, МПа.

Формула (10) получена в результате статистической обработки экспериментальных данных на ЭВМ с помощью программы «STATISTICA 5.0». В связи с относительно небольшим количеством этих данных (12 образцов) значения коэффициентов a и b в дальнейшем будут уточняться.

Если расчет производится для СТБ элементов, то в формулу (9) подставляется предельная характеристика линейной ползучести без учета прессования, определяемая по известной формуле:

$$\varphi = \varphi^N \xi_1 \xi_2 (0,5 + de^{-2\gamma_1 t_0}). \quad (11)$$

Значения ϕ^N , ξ_1 , ξ_2 , γ_1 и d учитывают класс исходного бетона, влажность, модуль открытой поверхности. Все они являются табличными и назначаются в соответствии с имеющимися нормативными документами.

В предлагаемой методике за критерий длительной прочности трубобетонных конструкций принят момент достижения напряжениями в бетонном ядре уровня длительной прочности, при условии, что металл оболочки уже находится в пластическом состоянии.

Относительный предел длительной прочности бетона в условиях трехосного напряженного состояния определяется по аналогии с известной формулой Ю.В. Зайцева, предложенной для случая одноосного сжатия:

$$\eta_3(t, t_0) = \frac{m(t, t_0) * R_{b3}(t)}{R_{b3}(t_0)} \sqrt{\frac{1}{1 + E_{b3}(t) C_3^*(t, t_0)}}, \quad (12)$$

где $m(t, t_0)$ – функция, учитывающая влияние предшествующего нагружения материала на кратковременную прочность материала (в запас прочности ее величину можно брать равной 1);

$R_{b3}(t)$ и $R_{b3}(t_0)$ – значения кратковременной прочности бетона в условиях трехосного сжатия в рассматриваемый момент времени и в момент нагружения;

$E_{b3}(t)$ – начальный модуль упругости бетона в условиях трехосного сжатия в данный момент времени;

$C_3^*(t, t_0)$ – мера ползучести бетона в условиях трехосного сжатия, вычисляемая с учетом изменения во времени его модуля упругости согласно предложению С.В. Александровского для случая одноосного сжатия.

Для определения кратковременной прочности при одноосном сжатии и начального модуля упругости незагруженного бетона в любой момент времени с учетом процессов старения можно воспользоваться известными формулами, например, предложенными Г.А. Гениевым или Е.Н. Щербаковым.

Переход от значений прочности бетона при одноосном сжатии $R_b(t_0)$ и $R_b(t)$ к значениям прочности в условиях трехосного сжатия $R_{b3}(t_0)$ и $R_{b3}(t)$ рекомендуется определять с использованием известной формулы:

$$R_{b3}(t) = R_b(t) + k \cdot \sigma_{br,u}(t), \quad (13)$$

где k – коэффициент бокового давления, значение которого зависит от величины $m = \sigma_{br,u}(t)/R_{b3}(t)$.

Этот подход позволяет учитывать реальные процессы, происходящие в бетоне при длительном приложении нагрузки: увеличение прочности бетона во времени – старение, и развитие деструктивных процессов, связанных с проявлением нелинейной ползучести.

При расчете прочности трубобетонных элементов важнейшей задачей является правильный учет перераспределения усилий между бетонным ядром и стальной оболочкой. Для выполнения этой задачи на каждом этапе загрузки необходимо учитывать изменение секущего модуля деформаций стали $\nu_s(t, t_0)$ и коэффициента ее поперечной деформации $\mu_s(t, t_0)$. Для определения $\nu_s(t, t_0)$ предлагается воспользоваться предложением Н.И. Карпенко, Т.А. Мухамедиева и А.Н. Петрова. Коэффициент поперечной деформации $\mu_s(t, t_0)$ при сложном напряженном состоянии рекомендуется искать по формуле, предложенной Н.А. Махутовым, в зависимости от уровня интенсивности напряжений в стали в данный момент времени.

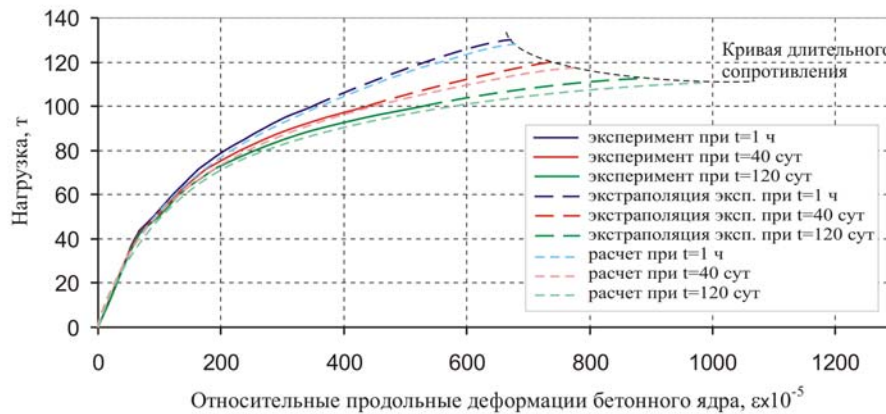


Рис. 4. Сопоставление диаграмм-изохрон деформирования бетонного ядра в продольном направлении, полученных экспериментальным и аналитическим путем

Разработанная методика реализована в программном виде.

Также в данной главе произведены оценки эффективности и достоверности предложенной методики расчета. Предложенные теоретические зависимости позволили построить веер диаграмм деформирования исследуемых трубобетонных элементов для различного времени приложения нагрузки ($t-t_0$). Сопоставление реальных диаграмм деформирования и диаграмм-изохрон показало хорошую сходимость (рис. 2). Полученная аналитическим путем кривая длительного сопротивления сжатию СТБО элементов показала, что при относительном уровне длительного нагружения $\eta = 0,90$ разрушение сжатых трубобетонных элементов должно происходить на 6 суток. А минимальный предел длительной прочности соответствует $\eta = 0,85$.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Усовершенствована конструкция трубобетонного элемента и способ ее изготовления. Это позволило устранить ранее выявленные недостатки сжатых трубобетонных конструкций и улучшить их прочностные и реологические характеристики.
2. Скорректирована и практически использована методика проведения экспериментальных исследований трубобетонных элементов при длительном нагружении, позволяющая с помощью стандартных механических тензометров и индикаторов часового типа измерять продольные и поперечные деформации бетонного ядра и стальной оболочки.
3. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что усадочные деформации бетонного ядра предварительно обжатых и необжатых трубобетонных элементов на порядок меньше, чем у традиционных железобетонных конструкций и могут не учитываться при определении длительной прочности сжатых трубобетонных конструкций.
4. Экспериментально подтверждено, что ползучесть трубобетонных элементов в 2-3 раза меньше, чем у традиционных железобетонных конструкций. Проведенные испытания позволили установить, что при низких уровнях нагружения ($\eta=0,4\div 0,6$) ползучесть трубобетонных элементов имеет линейный характер. При более высоких уровнях нагружения ($\eta>0,8$), вследствие того, что стальная оболочка переходит в пластическое состояние, а величина продольных на-

пряжений в бетонном ядре близка к верхней границе микротрещинообразования, деформаций ползучести имеют ярко выраженный нелинейный характер.

5. Выполненные исследования показали, что предел длительной прочности трубобетонных элементов из бетона, твердеющего под давлением, исчерпывается при уровнях загрузки $\eta = 0,84 \div 0,86$.
6. Доказано, что применение длительного прессования бетона и создание предварительного напряжения стальной оболочки значительно улучшает реологические свойства сжатых трубобетонных элементов. Получены аналитические зависимости, связывающие характеристики ползучести исходного бетона и предварительнообжатого бетонного ядра трубобетонных элементов.
7. Разработана методика расчета длительной прочности трубобетонных элементов, работающих на сжатие в области случайных эксцентриситетов, которая позволяет наиболее полно учесть их конструктивные особенности. Аналитическим путем и на основе экспериментальных данных построены диаграммы-изохроны для исследованных трубобетонных элементов. Сопоставление опытных и теоретических значений деформаций бетонного ядра на диаграммах-изохронах при различных уровнях загрузки показало, что расхождение между ними не превышает 15 %. Экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами работ других исследователей, опубликованных ранее.

Основные положения и результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Кришан А.Л., Аткишкин И.В., Кузнецов К.С. Исследование НДС сжатых трубобетонных элементов // Строительство и образование: Межвуз. сб. науч. тр. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2004. – Вып. 5. – С. 105-107.
2. Кришан А.Л., Сагадатов А.И., Аткишкин И.В. Распределение прес-сующего давления в толще бетонной смеси // Строительство и образование: Межвуз. сб. науч. тр. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2004. – Вып. 5. – С. 108-110.
3. Кришан А.Л., Гареев М.Ш., Аткишкин И.В. Методика расчета стале-трубобетонных колонн // Эффективные строительные конструкции: теория и практика. Сб. статей III Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза, 2004. – С. 4-6.

4. Кришан А.Л., Аткишкин И.В., Кузнецов К.С. Экономическая эффективность применения трубобетонных конструкций // Предотвращение аварий зданий и сооружений: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2005. – Вып. 4. – С. 152-157.
5. Кришан А.Л., Аткишкин И.В., Кузнецов К.С. К расчету прочности сжатых трубобетонных элементов // Тез. докл. 63-й науч.-техн. конф. - Новосибирск: НГАСУ, 2006. – С. 76.
6. Аткишкин И.В., Кузнецов К.С., Дроздов И.К. Методика измерений деформаций при определении реологических свойств трубобетонных элементов // Предотвращение аварий зданий и сооружений: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2006. – Вып. 5. – С. 121-127.
7. Кришан А.Л., Аткишкин И.В., Кузнецов К.С. Подбор состава бетонной смеси для изготовления высокопрочного бетона // Предотвращение аварий зданий и сооружений: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2006. – Вып. 5. – С. 127-132.
8. Кришан А.Л., Аткишкин И.В., Кузнецов К.С. Сжатые сталетрубобетонные элементы из высокопрочного предварительно обжатого бетона // Бетон и железобетон в третьем тысячелетии: Мат.-лы IV Междунар. науч.-практич. конф. – Ростов н/Д: РГСУ, 2006. – С. 257-265.
9. Аткишкин И.В. Исследования реологических свойств сталетрубобетонных элементов из опрессованного бетона при длительном нагружении // Бетон и железобетон в третьем тысячелетии: Мат.-лы IV Междунар. науч.-практич. конф. – Ростов н/Д: РГСУ, 2006. – С. 9-15.
10. Полезная модель № RU 49861 U1, МПК 7 Е 04 С 3/36. Строительный элемент в виде стойки / А.Л. Кришан, А.И. Сагадатов, И.В. Аткишкин, К.С. Кузнецов, А.В. Чернов. – 6 с.: ил.