КОНТРОЛЬНЫЙ ЭКЗЕМПЛЯР

На правах рукописи

Кузнецов Константин Сергеевич

ПРОЧНОСТЬ ТРУБОБЕТОННЫХ КОЛОНН С ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБЖАТЫМ ЯДРОМ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

00317426 1

Магнитогорск
2007

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, член-корреспондент РААСН Соколов Борис Сергеевич
	кандидат технических наук Кручинин Александр Александрович
Ведущая организация	ФГУП НИЦ «Строительство» - НИИЖБ, г. Москва

Защита состоится «_6_» _ноября_2007 г. в 14^{30} 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 «_5_» _октября__ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн наук,
доцент А.Л. Кришан

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы: Из года в год в нашей стране растут темпы промышленного, гражданского, гидротехнического и транспортного строительства, появляются новые материалы и конструкции, совершенствуется технология их изготовления При этом современное строительство характеризуется увеличением высоты сооружений и пролетов перекрытий, ростом крановых нагрузок, увеличением массы технологического оборудования, настоятельно требуя применения стержней в виде стоек и колонн, обладающих высокой несущей способностью при малых поперечных сечениях.

Одним из решений этой проблемы является применение трубобетонных колонн Они представляют собой пример, когда бетон и сталь взаимно и существенно повышают несущую способность друг друга и всего элемента в целом В трубобетонных колоннах эффективно используются специфические свойства применяемых материалов, что дает существенную экономию стали и бетона, приводит к уменьшению размеров поперечного сечения элементов конструкций, а следовательно их массы и транспортных затрат. Трубобетонные колонны обладают всеми свойствами рациональных трубчатых металлических конструкций, которые находят все большее применение в строительстве. Трубчатый цилиндрический профиль в настоящее время рассматривается как наиболее прогрессивный и целесообразный, требующий минимального количества сварочных работ и дополнительных элементов. Одним из важных качеств трубобетонных колонн является их обтекаемость Благодаря этому на их поверхности не скапливается влага и пыль, конструкции легко окрашиваются, осматриваются и очищаются, что также повышает их долговечность. Внутренняя поверхность трубы в этих конструкциях надежно защищена от агрессивных воздействий плотным бетонным ядром

По сравнению с железобетонными, трубобетонные конструкции более индустриальны при изготовлении и монтаже Они сравнительно легки и транспортабельны, хорошо противостоят механическим повреждениям, и при этом не нуждаются в дополнительной отделке

Кроме того открывается перспектива использования в трубобетонных колоннах высокопрочных бетонов, что так же позволит существенно снизить размеры поперечных сечений конструкций, а следовательно и общие затраты на строительство.

Несмотря на то, что прочность трубобетона изучалась многими исследователями на протяжении десятков лет, отечественные нормативные документы не содержат указаний по расчету прочности и устойчивости трубобетонных элементов, работающих на внецентренное сжатие Предлагаемые исследователями методики расчета существенно отличаются друг от друга. В них не учитываются в комплексе свойства материалов, нелинейное деформирование бетона и стали, неполно отражаются основные особенности и специфика сопротивления железобетона деформированию в зависимости от характера действующей нагрузки.

Таким образом разработка методики расчета трубобетонных конструкций, позволяющей учитывать их действительное напряженно-деформированное состояние в условиях внецентренного сжатия, на данный момент весьма актуальна.

Цель работы – разработка методики расчета прочности сжатых трубобетонных элементов на основе нелинейной деформационной модели трубобетона, наиболее полно учитывающей напряженно-деформированное состояние конструкции

Автор защищает:

- конструкцию трубобетонного элемента с предварительно обжатым бетонным ядром и внутренним стальным трубчатым сердечником, защищенную патентом на полезную модель, и способ ее изготовления,
- анализ результатов экспериментальных исследований работы сжатых трубобетонных элементов, изготовленных с использованием высокопрочного бетона и оболочкой из стали повышенной прочности, в принятом диапазоне изменения конструктивных факторов и эксцентриситетов приложения кратковременной сжимающей нагрузки,
- методику расчета прочности сжатых трубобетонных элементов на основе нелинейной деформационной модели железобетона, и программу для реализации этой методики на ЭВМ.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждается использованием сертифицированных программных продуктов, достаточным объемом проведенных исследований и применением признанных способов статистической обработки данных.

Научную новизну работы составляют:

- результаты анализа влияния предварительного обжатия сжатых трубобетонных элементов с ядром из высокопрочного бетона и оболочкой из стали повышенной прочности, на их напряженно-деформированное состояние, выполненного на основании полученных экспериментальных данных;
- корректировка аналитической зависимости для определения коэффициента бокового давления, позволяющая учитывать влияние прочности бетона на величину этого коэффициента;
- корректировка аналитической зависимости для определения прочности бетона, твердеющего под давлением, позволяющая учитывать снижение эффективности прессования бетонной смеси при росте прочности исходного бетона;
- методика расчета прочности и теоретической оценки напряженно-деформированного состояния сжатых трубобетонных элементов на основе нелинейной деформационной модели

Практическую ценность работы представляют усовершенствованная конструкция и способ изготовления трубобетонных элементов из высокопрочного, предварительно обжатого бетона с внутренним стальным трубчатым сердечником, а также алгоритм и программа для ЭВМ по расчету прочности трубобетонных конструкций при работе на внецентренное сжатие Предложенная методика расчета прочности используется при подготовке материалов «Рекомендаций по расчету и проектированию трубобетонных колонн», которые разрабатываются

ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова» совместно с ФГУП «НИЦ «Строительство»

Внедрение результатов. Усовершенствованные трубобетонные элементы с внутренним стальным сердечником и методика их расчета нашли практическое применение в качестве несущих стоек на объекте Ресторан «Станица» в г. Магнитогорске. Материалы диссертации используются при подготовке «Рекомендаций по расчету и проектированию трубобетонных колонн», а также в учебном процессе на архитектурно-строительном факультете ГОУ ВПО «МГТУ им Г И Носова»

Апробация полученных результатов.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на трех международных научно-технических конференциях (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 ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И.Носова» Опытный образец трубобетонного элемента новой конструкции выставлялся на XI Петербургском международном экономическом форуме-выставке «Инновационные достижения» в 2006 году, где получил серебряную медаль и диплом II степени

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ, среди которых 6 статей, 1 тезисов докладов, 1 патент.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, основных результатов работы, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 152 страницах, содержит 10 таблиц, 59 рисунков, библиографический список из 119 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 объемного напряженного состояния, при кратковременном сжатии. Здесь же приведены общие сведения о трубобетоне, а также обзор исследований работы трубобетонных конструкций в условиях центрального и внецентренного сжатия В опубликованных данных отмечена высокая несущая способность и эффективность трубобетона У бетона в условиях объемного напряженного состояния существенно повышаются прочностные и деформативные характеристики, улучшаются реологические свойства.

По результатам анализа существующих источников можно сделать вывод, что исследованиям трубобетонных конструкций уделено довольно много внимания, но на сегодняшний день нет единого подхода к оценке напряженно-деформированного состояния сжатых трубобе-

тонных конструкций. Отсутствуют нормативные требования по расчету их прочности

Анализ опубликованных работ показал, что одной из наиболее перспективных направлений является разработка методики расчета трубобетонных конструкций с использованием нелинейной деформационной модели, позволяющей оценивать действительное напряженно-деформированное состояние конструкции.

В литературных источниках приведены и основные недостатки трубобетонных конструкций Одним из главных конструктивных недостатков сжатых трубобетонных элементов является возможность отрыва внешней стальной оболочки от бетонного сердечника на определенной стадии работы по причине разности начальных коэффициентов поперечных деформаций бетона и стали ($\nu_s \approx 0,3$, $\nu_b \approx 0,2$). 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 свойства бетона, а стальная оболочка получает предварительное напряжение в поперечном направлении. С технологической точки зрения этот метод отличается стабильностью получения материалов с заданными свойствами и относительной дешевизной.

В трубобетонных конструкциях бетон твердеющий под давлением (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, проявляющемся после извлечения пустотообразователя.

Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности дальнейшего совершенствования сжатых трубобетонных элементов, в том числе и с использованием для их изготовления высокопрочных материалов

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. Подобрать состав высокопрочного бетона твердеющего под давлением, используя рядовые цементы и заполнители
3. Экспериментально исследовать напряженно-деформированное состояние сжатых трубобетонных элементов с ядром из высокопрочного бетона, твердеющего под давлением, и оболочкой из стали повышенной прочности. Сопоставить эффективность работы сжатых трубобетонных стержней с предварительно обжатым и необжатым ядром из

высокопрочного бетона, при относительном эксцентриситете загружения e_0/d, изменяющемся в диапазоне от 0 до 0,375.

4 Выявить особенности в работе ядра сжатого трубобетонного элемента при изготовлении его из высокопрочного бетона и учесть эти особенности в расчете прочности нормального сечения.

5. Разработать методику расчета прочности и оценки напряженно-деформированного состояния сжатых трубобетонных элементов на основе нелинейной деформационной модели

6 Выполнить численный анализ напряженно-деформированного состояния сжатых трубобетонных конструкций с использованием программного комплекса «ЛИРА 9 4».

7. Выполнить сопоставление экспериментально полученных данных по прочности трубобетонных элементов и результатов машинного расчета с данными теоретического расчета.

Во второй главе разработана методика расчета прочности и оценки напряженно-деформированного состояния сжатых трубобетонных элементов, основанная на нелинейной деформационной модели.

Методика оценки НДС базируется на рассмотрении трансверсально-изотропной модели трубобетона. Для построения этой модели используются аналитические зависимости ортотропной модели Н.И.Карпенко Здесь имеется ввиду ортотропия, приобретаемая материалами в процессе роста напряжений. Она проявляется из-за неоднородного деформирования бетонного ядра, стальной оболочки и внутреннего сердечника при их объемном сжатии.

При использовании предложенной расчетной модели для трубобетонных конструкций прочность сечения считается достаточной до тех пор, пока выполняется хотя бы одно из следующих условий:

$$\left|\varepsilon_{by,\max}\right| \le \varepsilon_{b,ult}; \qquad (1)$$

$$\left|\varepsilon_{s,\max}\right| \le \varepsilon_{s,ult}, \qquad (2)$$

где $\varepsilon_{by,max}$ - максимальные относительные деформации в сжатом бетоне, возникающие по направлению действующей продольной силы (далее называемые «осевые» деформации);

$\varepsilon_{s\,max}$ - максимальная величина интенсивности относительных деформаций во внешней стальной оболочке, определяемая для наиболее сжатых и растянутых волокон;

$\varepsilon_{b,ult}$ - предельные относительные деформации бетона в осевом направлении;

$\varepsilon_{s,ult}$ - предельные относительные деформации внешней стальной оболочки.

В предлагаемой деформационной модели, как и в традиционной, значения относительных осевых деформаций в бетоне и стали определяются из решения следующих уравнений:

- уравнений равновесия внешних и внутренних сил в нормальном сечении;

- уравнений, устанавливающих распределение осевых деформаций в бетоне и арматуре по нормальному сечению, исходя из условия плоского поворота и плоского смещения сечения;
- уравнений, определяющих связь между напряжениями и относительными деформациями бетона и арматуры.

Для построения расчетных зависимостей между напряжениями и деформациями бетонного ядра и стальной оболочки первоначально рассматривается работа трубобетонного элемента в условиях осевого сжатия (первый этап расчета)

Для данной расчетной модели трубобетонного элемента, содержащего внутренний стальной сердечник, можно записать восемь уравнений, связывающих напряжения с деформациями.

- для бетонного ядра

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{by} \\ \varepsilon_{br} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\nu_b E_b} \times \begin{bmatrix} 1 & -2\mu_{xr} \\ -\mu_{yr} & (1-\mu_{rr}) \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \sigma_{by} \\ \sigma_{br} \end{Bmatrix}; \tag{3}$$

- для внешней стальной оболочки

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{sy} \\ \varepsilon_{s\tau} \\ \varepsilon_{sr} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\nu_s E_s} \times \begin{bmatrix} 1 & -\mu_s & -\mu_s \\ -\mu_s & 1 & -\mu_s \\ -\mu_s & -\mu_s & 1 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \sigma_{sy} \\ \sigma_{s\tau} \\ \sigma_{sr} \end{Bmatrix}; \tag{4}$$

- для внутреннего стального сердечника

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon'_{sy} \\ \varepsilon'_{s\tau} \\ \varepsilon'_{sr} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\nu_s E_s} \times \begin{bmatrix} 1 & -\mu_s & -\mu_s \\ -\mu_s & 1 & -\mu_s \\ -\mu_s & -\mu_s & 1 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \sigma'_{sy} \\ \sigma'_{s\tau} \\ \sigma'_{sr} \end{Bmatrix}. \tag{5}$$

В этих зависимостях напряжения и деформации бетона и стали в осевом направлении содержат индекс y, в радиальном направлении - индекс r, а в тангенциальном направлении - индекс τ. Буквами E, ν и μ обозначены соответственно начальные модули деформации, коэффициенты изменения секущего модуля деформации и коэффициенты Пуассона для бетона и стали (для внешней оболочки и внутреннего сердечника можно с небольшой погрешностью принимать E_s, ν_s и μ_s одинаковыми).

При аналитическом описании физических моделей материалов учтены некоторые особенности высокопрочного бетона.

В частности для бетона, заключенного в стальную обойму, прочность при сжатии определяется по известной формуле.

$$R_{b,3} = R_{bc} + k\sigma_{br}; \tag{6}$$

в которой σ_{br} – боковое давление на поверхности соприкосновения стальной трубы с бетоном,

R_{bc} – цилиндрическая прочность бетона при осевом сжатии;

k – коэффициент бокового давления.

Величину коэффициента k предлагается определять по формуле Н.И.Карпенко, с учетом поправки Δk

$$k = \frac{1}{0{,}1 + 0{,}9m} + \Delta k; \qquad (7)$$

где m – уровень обжатия бетона ($m = \sigma_{br} / R_{b3}$),

Δk – поправка, учитывающая влияние прочности бетона и определяется по формуле, полученной по результатам статистической обработки результатов экспериментов

$$\Delta k = 2{,}9 - \ln R_{bc}; \qquad (8)$$

Прочность БТД с учетом компьютерной обработки результатов экспериментально-теоретических исследований, выполненных независимо друг от друга Г.В.Мурашкиным и А Л Кришаном, вычисляются следующим образом·

$$R_{bp} = R_b\left(1 + \alpha\sqrt{0{,}1P\Delta f}\right), \qquad (9)$$

где P – величина давления обжатия бетона в МПа;

α – коэффициент, зависящий от состава бетонной смеси (для оптимизированных составов α=1);

Δf – поправка, учитывающая снижение влияния эффективности прессования бетонной смеси, при росте прочности исходного бетона. Значение данной поправки в этой работе предлагается вычислять по формуле:

$$\Delta f = \frac{p}{\sqrt{R_b}}; \qquad (10)$$

в которой величина p≈5, по результатам статистической обработки экспериментальных данных.

В общем случае внецентренного сжатия определение максимально допустимой продольной силы при известном эксцентриситете ее приложения производится следующим образом. Поперечное сечение трубобетонного элемента разбивается на отдельные участки (см рис 1).

Для каждого участка вычисляются его площадь и координата центра тяжести. Далее пошагово увеличивается величина относительных деформаций крайнего сжатого волокна элемента $\varepsilon_{s,max}$ и меняется наклон эпюры деформаций по высоте поперечного сечения На каждом шаге вычисляются деформации бетонного ядра и стальной оболочки для всех участков и кривизна элемента $1/r$ Принимается допущение, что в пределах каждой выделенной полосы сечения, деформации бетона и стали, для фиксированного уровня нагружения, остаются одинаковыми. При этом, для всех выделенных участков, в зависимости он уровня загружения, определяют значения коэффициентов Пуассона μ_{bi}, μ_{si} и коэффициентов упругости v_{bi}, v_{sj} бетона и стали, а из совместного решения систем уравнений - величины нормальных напряжений в бетоне и стали σ_{byi}, σ_{bri}, σ_{syi}, $\sigma_{s\pi}$, σ_{sri}, σ_{syi}`, $\sigma_{s\pi}$`, σ_{sri}`.

Переход от напряжений в бетонном ядре и стальной оболочке к обобщенным внутренним усилиям осуществляется с помощью процедуры численного интегрирования напряжений по высоте нормального сечения.

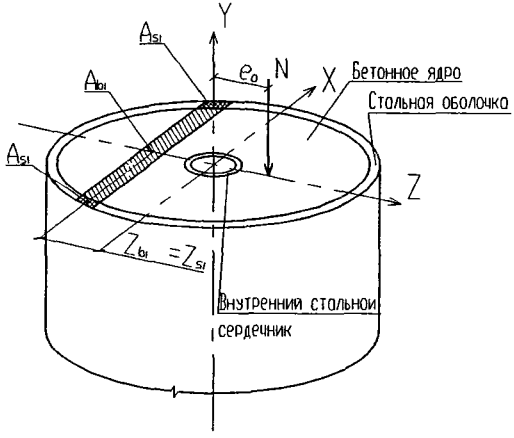

Рис 1. Расчетная схема нормального сечения трубобетонного элемента

В итоге для каждого шага устанавливается распределение деформаций по высоте нормального сечения трубобетонного элемента, удовлетворяющее условиям равновесия внешних и внутренних сил Затем значение базового параметра деформирования сечения $\varepsilon_{s,max}$ увеличивается и описанная выше процедура расчетов повторяется.

При достижении краевых относительных деформаций в бетоне и стали максимально допустимых значений по условиям (1) и (2) определяется предельная величина продольной сжимающей силы

Значения предельных относительных деформаций бетона $\varepsilon_{b,ult}$ при однозначной равномерной эпюре деформаций принимают равными деформациям бетонного ядра центрально сжатого трубобетонного эле-

мента. Величина деформаций для каждого трубобетонного элемента определяется на первом этапе расчета его прочности. Таким образом производится учет специфических свойств работы бетонного ядра элемента (применимый диапазон возможных значений $\varepsilon_{b,ult}$ = 0,003 – 0,007)

Предельные относительные деформации сжатого бетона при двузначной эпюре деформаций в нормальном сечении принимаются равными $\varepsilon_{b\,ult} = 1{,}5\varepsilon_b$ При однозначной неравномерной эпюре деформаций бетона ее максимально допустимая величина определяется по линейной интерполяции. Для исключения чрезмерных деформаций трубобетонных колонн, значение предельных относительных деформаций бетона при сжатии со случайными эксцентриситетами рекомендуется принимать не более $\varepsilon_{b,ult} = 0{,}005$

Предельную интенсивность относительных деформаций стальной оболочки при сжатии и растяжении рекомендуется принимать равной $\varepsilon_{s,ult} = 0{,}015$

По окончании расчета прочности нормальных сечений трубобетонных элементов выполняется проверка прочности от среза по наклонному сечению. При этом принимается допущение, что напряженно-деформированное состояние нормального сечения, установленное расчетом при разбиении его на отдельные участки, сохраняется по всей высоте элемента. Зная величины осевых и радиальных нормальных напряжений для каждого выделенного участка можно определить значение сдвигового усилия в бетонном ядре. Описанная методика реализована в виде алгоритма и программы для расчета на ЭВМ

В третьей главе описывается методика экспериментального исследования трубобетонных элементов при кратковременном действии сжимающей нагрузки. Для решения поставленных задач было изготовлено 16 серий опытных образцов. Основу каждой серии составляли три образца-близнеца. Экспериментальные образцы имели кольцевое сечение. Были изготовлены восемь серий с наружным диаметром сечения 159 мм и восемь серий с диаметром 106 мм. Отношение диаметра элемента к длине для всех серий было равным 1/4

С целью повышения эффективности исследуемых колонн был проведен подбор состава тяжелого бетона. Для изготовления бетонной смеси использовались рядовые заполнители, микрокремнезем Челябинского электрометаллургического комбината и цемент ПЦ-500 В результате трехфакторного эксперимента был получен БТД (Р = 3 МПа), с призменной прочностью 75 ÷ 78 МПа Применение высокопрочных бетонов предполагает в качестве оболочки трубобетонного элемента использовать стали повышенной прочности. В соответствии с этим для внешней оболочки образцов применялись трубы из стали 16Г2АФ

Из общего количества образцов по 4 серии каждого диаметра были изготовлены без предварительного обжатия бетона и по 4 серии с предварительно обжатым бетоном Основной особенностью изготовления трубобетонных элементов с обжатым ядром являлось применение длительного прессования бетонной смеси давлением порядка 1,5 – 2 МПа. Прессующее давление на бетонную смесь передавалось через перфорированные стальные трубки разного диаметра.

Образцы испытывались в вертикальном положении на гидравлическом прессе в возрасте 60 суток кратковременной сжимающей нагрузкой по стандартной методике. Центрально сжатые элементы испытывались с шарнирным опиранием торцов. Для задания требуемого эксцентриситета приложения продольной сжимающей силы применялись цилиндрические опоры. Эксцентриситеты сжимающей силы e_0/d варьировались от 0 до 0,375

В четвертой главе проведен анализ результатов экспериментального исследования трубобетонных элементов при кратковременном действии сжимающей нагрузки Осредненные результаты испытаний для серий экспериментальных образцов при центральном и внецентренном сжатии приведены соответственно в таблицах 1 и 2.

В маркировке серий приняты следующие условные обозначения· В – при изготовлении образцов использовался высокопрочный бетон; Н – цилиндрический образец с не обжатым ядром; О – цилиндрический образец с предварительно обжатым ядром, К – контрольный образец с ядром из высокопрочного неопрессованного бетона (прочность бетонного ядра сопоставима с прочностью образцов серий ВОЦ), ВНЦ или ВОЦ – образцы испытывались на центральное сжатие, ВНВ №.159 или ВОВ №.159 – образцы испытывались на внецентренное сжатие при разных относительных эксцентриситетах (1 – e_o/d=0,125, 2 – e_o/d=0,25, 3 – e_o/d=0,375), 159 или 106 – внешний диаметр оболочки в мм; 6 или 4 – толщина оболочки, мм.

В таблицах 1 и 2 представлены осредненные по сериям данные по призменной (R_{bu}) прочности исходного бетона, а также экспериментально определенные значения нагрузок, соответствующие: пределу упругой работы N_{el}, и текучести металла оболочки N_y, верхней границе микротрещинообразования в бетоне N_{crc}, максимально достигнутой нагрузке N_u, суммарному усилию, воспринимаемому бетонным ядром, внешней и внутренней стальными трубами, испытанными отдельно ($N_{bs} = R_{bc}A_b+R_sA_s+R_sA_s$).

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что образцы с предварительно обжатым ядром работают на сжатие эффективнее образцов из обычного бетона. Практически для всех предварительно напряженных образцов наблюдалось значительное повышение предела упругой работы и уровня разрушающей нагрузки. Для центрально сжатых цилиндрических элементов это повышение составило 20 – 23 %. Несущая способность этих элементов возросла в меньшей степени - на 18 ÷ 20 %

Сравнительные диаграммы «N - ε» для таких образцов диаметром 159 мм приведены на рис. 2

С увеличением эксцентриситета приложения сжимающей нагрузки эффективность трубобетонных конструкций снижается (рис. 3). С повышением эксцентриситетов сжимающей силы увеличивается площадь растянутой зоны. Так как бетон плохо работает на растяжение, нагрузка при этом воспринимается в основном стальной трубой. Роль бетонного ядра в данном случае сводиться лишь к повышению местной устойчивости стенок трубы.

Таблица 1

Основные результаты испытаний трубобетонных образцов на центральное сжатие

№	Серия	R_{bu}, МПа	N_{el}, кН	N_y, кН	N_u, кН	N_{bs}, кН	N_{el}/N_u	N_y/N_u	N_{crc}/N_{bs}	N_u/N_{bs}
1	ВНЦ 106 4	41 3	634	742	1075	789	0,59	0 69	1,09	1,36
2	ВОЦ 106 4	37 9	826	907	1355	939	0,61	0,67	1,16	1,44
3	ВНЦ 159 6	40 0	1299	1618	2223	1555	0,57	0,71	1,13	1,43
4	ВОЦ 159 6	38 6	1788	1990	2884	1972	0,62	0,69	1,20	1,46
5	ВКЦ 159 6	62,3	1535	1848	2603	1859	0,59	0,71	1,14	1,40

Таблица 2

Основные результаты испытаний трубобетонных образцов на внецентренное сжатие

№	Серия	e_o/d	R_{bu}, МПа	N_{el}, кН	N_y, кН	N_u, кН	N_{bs}, кН	N_{el}/N_u	N_y/N_u	N_u/N_{bs}
1	ВНВ1 106 4	0 125	39,9	451	534	834	613	0,54	0,64	1,36
2	ВНВ2 106 4	0 250	41,2	336	424	633	506	0,53	0,67	1,25
3	ВНВ3 106 4	0 375	37,4	201	301	478	412	0,42	0,63	1,16
4	ВОВ1 106 4	0 125	42,9	528	606	900	687	0,61	0,70	1,31
5	ВОВ2 106 4	0 250	39,2	434	463	712	578	0,61	0,65	1,23
6	ВОВ3 106 4	0 375	42,4	343	390	582	493	0,59	0,67	1,18
7	ВНВ1 159 6	0 125	38,9	905	1029	1774	1407	0,51	0,58	1,26
8	ВНВ2 159 6	0 250	43,6	552	647	1346	1094	0,41	0,48	1,23
9	ВНВ3 159 6	0 375	36,9	437	498	1016	868	0,43	0,49	1,17
10	ВОВ1 159 6	0 125	39,9	940	1215	1842	1306	0,51	0,66	1,41
11	ВОВ2 159 6	0 250	37,6	727	954	1515	1156	0,48	0,63	1,31
12	ВОВ3 159 6	0 375	39,9	656	755	1238	990	0,53	0,61	1,25

Вместе с тем, проведенные исследования свидетельствуют о том, что при малых эксцентриситетах приложения сжимающих нагрузок (значения относительных эксцентриситетов $e_o/d \leq 0,25$) предварительно обжатые трубобетонные элементы с небольшой гибкостью остаются заметно эффективнее традиционных железобетонных конструкций.

Опыты показали, что на характер изменения деформаций продольной оси элементов с ростом сжимающих нагрузок оказывали влияние как величины относительного эксцентриситета e_o/d, так и наличие предварительного обжатия у испытываемых образцов С ростом e_o/d наблюдалась тенденция к увеличению прогибов при одном и том же уровне загружения С другой стороны, полученные зависимости свидетельствуют о том, что жесткость предварительно обжатых трубобетонных элементов несколько выше, по сравнению с традиционными трубобетонными конструкциями

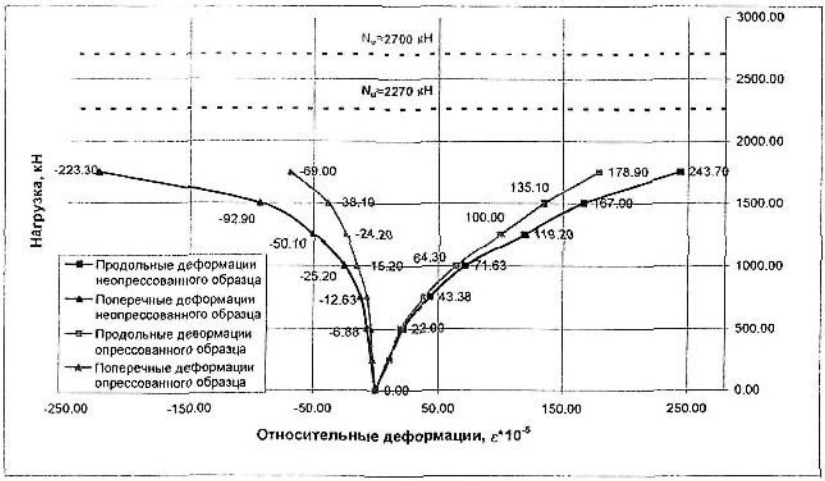

Рис 2. Зависимости «N-ε» для образцов серии ВНЦ.159.6 и ВОЦ.159.6

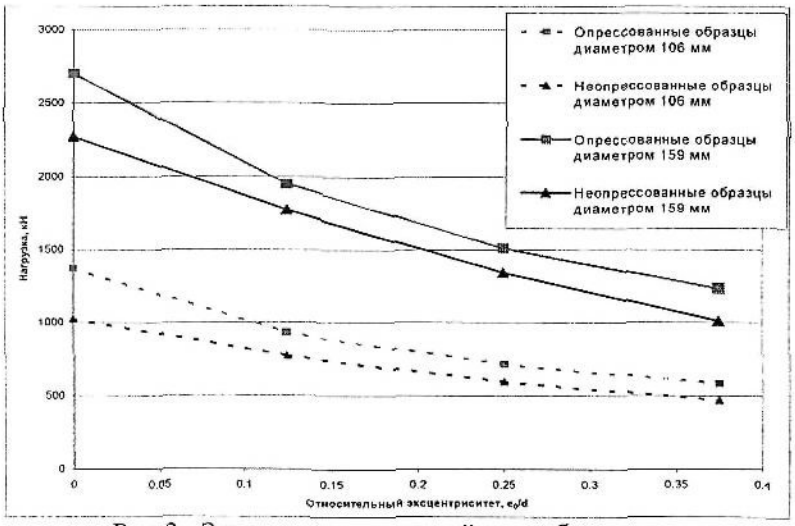

Рис.3 Зависимость несущей способности от величины относительного эксцентриситета приложенной нагрузки

Исключительно важным следует отметить тот факт, что характер разрушения образцов всех серий, не смотря на применение в них высокопрочного бетона, был пластичным.

В целом, на основании результатов экспериментов можно утверждать, что удалось усовершенствовать конструкцию трубобетонных элементов За счет приложения на бетонную смесь избыточного давления и эффективного отвода из нее «лишней» воды, не связанной с частицами цемента, на обычных цементах и рядовых заполнителях получены трубобетонные элементы с высокопрочным предварительно обжатым бетонным ядром. Благодаря этому существенно повышается несущая способность трубобетона как при центральном так и при внецентренном сжатии.

В пятой главе приводится оценка эффективности расчетной модели путем сравнения теоретически полученных результатов с экспериментальными данными и данными численного анализа на ЭВМ

Для численного анализа напряженно-деформированного состояния трубобетонного элемента при действии на него сжимающей нагрузки был использован вычислительный программный комплекс «ЛИРА 9 4»

В расчетной схеме был смоделирован трубобетонный образец круглого сечения с внутренним стальным сердечником и без него Ввиду симметричности поперечного сечения элемента и действующей на него нагрузки рассмотрен фрагмент, составляющий четвертую часть его объема

Для получения более детальной картины деформирования образец трубобетонного элемента был разбит по высоте на 12 уровней по 50 мм каждый Полная высота образца составила 600 мм Каждый уровень набирался из изопараметрических физически-нелинейных объемных восьми и шести узловых железобетонных конечных элементов. В соответствии со схемами армирования и разбиения образца трубобетонного элемента на конечные элементы, последние имели два типа жесткости. 1 – КЭ, армированный продольной арматурой; 2 – чисто бетонный КЭ.

На узлы нижнего торца исследуемого элемента были наложены связи, запрещающие перемещения по всем координатным осям и вращение вокруг них. Узлы верхнего торца были закреплены аналогично нижнему торцу, однако, для получения деформированной схемы, связь, запрещающая перемещения вдоль продольной оси элемента, не устанавливалась.

Расчет осуществлялся двумя этапами. На первом этапе загружения к образцу прикладывалось усилие обжатия. На втором - на верхний торец образца была ступенчато приложена полная равномерно распределенная по площади нагрузка величиной 100 МПа На первом шаге величина нагрузки составляла 40 % от полной, а на последующих - суммарная нагрузка возрастала на 5 %.

Расчет трубобетонных образцов на ПК «Лира 9.4» показал удовлетворительную сходимость результатов компьютерного анализа НДС с экспериментальными данными, и данными теоретического расчета, а так же то, что наиболее эффективен элемент с ядром из БТД и внутренним стальным сердечником. Максимальная деформация в таком элементе составляет порядка 8 ÷ 10 % от полной длины образца. Разрушающая нагрузка составила 3100 кН.

Наиболее деформативным является образец с ядром из обычного бетона и без внутреннего стального сердечника. Разрушение такого элемента наблюдалось при нагрузке 2400 кН.

По описанному в третьей главе алгоритму, реализованному в компьютерной программе «КРАТ 1.0», выполнены расчетные исследования НДС трубобетонных элементов которые были испытаны ранее учеными научных школ НИИЖБ и Л.И.Стороженко Полученные данные свидетельствуют о том, что расчеты по предложенной методике дают результаты близкие к опытным значениям

Сопоставление экспериментальных и теоретических величин приведено в табл. 3. Анализ представленных данных свидетельствует о том, что предложенная расчетная методика позволяет с необходимой точностью определять несущую способность трубобетонных колонн как традиционной конструкции, так и с предварительно обжатым бетонным ядром. Наибольшее отклонение расчетной разрушающей нагрузки с экспериментальными данными составил в среднем 7,8 %.

Таблица 3.

Сопоставление результатов исследований трубобетонных элементов

№ п/п	Авторы	Геометрические характеристики образцов, мм			Прочностные характеристики образцов		Предельная нагрузка, кН		Разница, %
		диаметр оболочки	толщина стенки	e_0/d	прочность бетона, МПа	предел текучести стали, МПа	экспери-ментальная	теорети-ческая	
1	Санжаровский Р С	89,30	4,10	0,227	24,9	288,0	130	119,9	-7,8
2		102,0	2,04	0,209	34,8	393,0	220	213,4	-3,0
3		102,1	2,10	0,240	34,8	396,0	150	142,8	-4,8
4		108,5	1,25	0,460	34,8	313,0	215	196,5	-8,6
5		108,5	4,28	0,230	34,8	312,5	220	236,5	+7,5
6		140,0	4,60	0,233	44,7	311,5	495	478,2	-3,4
7	Шабров В Л	530,0	7,80	0,0623	34,5	349	12500	11962	-4,3
8		530,0	7,80	0,0755	22,2	349	8100	8812	+8,8
9		530,0	7,80	0,1245	34,5	349	10700	10314	-3,6
10		530,0	11,95	0,0623	34,5	323	14500	13891	-4,2
11		530,0	11,95	0,0755	22,2	323	10000	8270	-7,3
12		530,0	11,95	0,1245	34,5	323	12500	13075	+4,6
13	Сагадатов А И	159,0	6,00	0,065	20,2	270	1390	1298	-6,6
14		159*	6,00	0,26	23,0	270	1059	1160	+9,6
15		219,0	8,00	0,065	31,9	290	2927	2786	-4,8
16		219*	8,00	0,26	32,9	290	2289	2046	-10,6
17	Собственные исследования	106,0	4,00	0,125	39,9	440	834	872,8	+4,6
18		106*	4,00	0,25	39,2	440	712	646,4	-9,2
19		159,0	6,00	0,375	36,9	440	1016	1059	+4,3
20		159*	6,00	0,375	39,9	440	1238	1182	-4,5

Примечание * - наличие предварительного обжатия бетонного ядра.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Усовершенствование конструкции сжатого трубобетонного элемента, совместно с использованием для его ядра высокопрочного бетона, позволило существенно улучшить его эксплуатационные характеристики, повысить несущую способность при снижении размеров поперечного сечения.
2. Предложенный способ изготовления трубобетонных колонн позволил, за счет использования БТД, создать предварительное обжатие бетонного ядра давлением величиной порядка 1,5 ÷ 2 МПа. В результате на рядовых цементах и заполнителях удалось получить высокопрочный бетон класса В160, благодаря чему существенно повысить несущую способность сжатых трубобетонных элементов.
3 Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния трубобетонных элементов с предварительно обжатым и необжатым ядром из высокопрочного бетона и оболочки из стали повышенной прочности, загруженных центрально и внецентренно приложенной кратковременной сжимающей нагрузкой свидетельствуют, что их несущая способность существенно выше, чем у традиционных железобетонных элементов Для предварительно обжатых трубобетонных элементов несущая способность при центральном сжатии оказалась на 26 – 40 % выше, чем для конструкций без обжатия.
4 Получена закономерность изменения несущей способности трубобетонных элементов с ядром из высокопрочного бетона в зависимости от величины относительного эксцентриситета сжимающей нагрузки e_0/d = 0, 0,125; 0,25 и 0,375 С увеличением эксцентриситетов несущая способность трубобетонных элементов падает и при e_0/d = 0,375 приближается к несущей способности традиционных железобетонных элементов. Предварительное обжатие бетонного ядра наиболее эффективно для трубобетонных элементов, работающих на сжатие с эксцентриситетами в пределах ядра их поперечного сечения
5. В проведенных исследованиях разрушение сжатых трубобетонных элементов, имеющих ядро из высокопрочного бетона, всегда носило пластический характер.
6 С учетом экспериментально выявленных особенностей в работе ядра предварительно обжатых трубобетонных элементов, изготовленных из высокопрочного бетона, предложены корректировки для аналитических зависимостей по определению коэффициента бокового давления и прочности бетона, твердеющего под давлением.
7. На основании нелинейной деформационной модели разработана методика оценки напряженно-деформированного состояния и расчета прочности нормальных сечений трубобетонных колонн, работающих на внецентренное сжатие. Методика учитывает работу бетонного ядра в условиях трехосного сжатия, сложное напряженное состояние стальной оболочки и процессы

перераспределения усилий между стальной оболочкой и ядром в упругопластической и пластической стадиях работы трубобетонного элемента.

8. Произведен расчет сжатых трубобетонных конструкций на программном комплексе «Лира 9 4» с учетом физической нелинейности бетона, в результате чего было получено напряженно-деформированное напряженное состояние во всем теле элемента. Расхождение результатов машинного расчета с экспериментальными данными составила порядка 12 – 18 %, с результатами полученными по предложенной методике – 7 ÷ 12 %.
9 Сопоставление величин напряжений и деформаций при различных уровнях напряжений, полученных в результате расчетов по разработанной методике, с данными опытов свидетельствует об их удовлетворительном совпадении. Имеющиеся расхождения не превышают 15 %. Наибольшее отклонение расчетной разрушающей нагрузки, определенной по этой методике, с экспериментальными данными для отдельного образца составило 12 %, а средняя величина этого отклонения для всех исследованных образцов – 7 % На базе предложенной методики построены алгоритм и программа для расчета прочности сжатых трубобетонных элементов на ЭВМ

Основные положения и результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **Кузнецов, К.С.** Исследование НДС сжатых трубобетонных элементов [Текст] / А.Л Кришан, И.В.Аткишкин, К.С Кузнецов // Вестник УГТУ-УПИ «Строительство и образование»: Сб. науч. тр. – Вып 7 - № 11(41). - Екатеринбург· УГТУ-УПИ, 2004 - Библиогр.: с. 105-107.
2 **Кузнецов, К.С.** Экономическая эффективность применения трубобетонных конструкций [Текст] / А.Л.Кришан, И В Аткишкин, К.С.Кузнецов // Предотвращение аварий зданий и сооружений Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 4 - Магнитогорск. МГТУ, 2005. - Библиогр.: с 152-157
3. **Кузнецов, К.С.** К расчету прочности сжатых трубобетонных элементов [Текст] / А Л.Кришан, И.В Аткишкин, К.С Кузнецов // Тез докл. 63-й науч.-техн. конф. – Новосибирск: НГАСУ, 2006 – Библиогр : с. 29-30
4. **Кузнецов, К.С.** Подбор состава бетонной смеси для изготовления высокопрочного бетона [Текст] / А.Л Кришан, И В Аткишкин, К.С.Кузнецов // Предотвращение аварий зданий и сооружений. Межвуз. сб. науч. тр Вып. 5. – Магнитогорск· МГТУ, 2006. – Библиогр : с. 153-155.
5. **Кузнецов, К.С.** Сжатые сталетрубобетонные элементы из высокопрочного предварительно обжатого бетона [Текст] / А.Л.Кришан, И.В.Аткишкин, К.С.Кузнецов // Бетон и железобетон в третьем тысячелетии. Мат.-лы IV Междунар науч.-практич. конф. – Ростов н/Д: РГСУ, 2006. – Библиогр.: с. 257-265
6 **Кузнецов, К.С.,** Проектирование бетонной смеси для изготовления сталетрубобетонных колонн с предварительно обжатым ядром [Текст] / К.С.Кузнецов [и др] // Вестник УГТУ-УПИ «Строительство и образование»: Сб. науч. тр. – №12(83) – Екатеринбург УГТУ-УПИ, 2006 – Библиогр.: с. 190-192.
7. **Кузнецов, К.С.** Методика определения усадочных деформаций трубобетонных элементов [Текст] / К.С.Кузнецов [и др] // Вестник УГТУ-УПИ «Строительство и образование»: Сб. науч. тр. №12(83) – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. – Библиогр.. с. 102-104.
8. Патент на полезную 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.

Подписано в печать 2 10 2007 Формат 60х84 1/16 Бумага тип № 1
Плоская печать Усл печ л 1,00 Тираж 100 экз Заказ 586

455000, Магнитогорск, пр Ленина, 38
Полиграфический участок ГОУ ВПО «МГТУ»