

Р
18.01 2019

На правах рукописи

Недорезов Андрей Владимирович

**ДЕФОРМАЦИИ И ПРОЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ПРИ СЛОЖНЫХ РЕЖИМАХ ОБЪЕМНОГО
НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ**

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Макеевка – 2019

Работа выполнена на кафедре железобетонных конструкций Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Корсун Владимир Иванович,
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», профессор кафедры железобетонных конструкций.

Официальные оппоненты: **Петров Алексей Николаевич,**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», заведующий кафедрой технологии и организации строительства, г. Петрозаводск;

Нескородев Роман Николаевич,
кандидат физико-математических наук, доцент,
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», доцент кафедры теории упругости и вычислительной математики, г. Донецк.

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»,**
г. Симферополь.

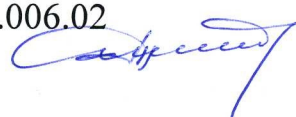
Защита состоится «27» марта 2019 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 01.006.02 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, зал заседаний ученого совета. Тел. факс: +38(062) 343-7033, e-mail: d01.006.02@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 01.006.02



Радионов Тимур Валерьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для большинства железобетонных конструкций зданий и сооружений характерна работа в условиях объемного (трехосного) напряженного состояния. Точность оценки характеристик напряженно-деформированного состояния (НДС) таких конструкций зависит, главным образом, от достоверности применяемых физических соотношений для бетона и арматуры.

Построение расчетной модели деформирования бетона для общего случая объемного напряженного состояния невозможно без применения достоверных критериев прочности и деформационных соотношений для бетона. Развитие методов расчета конструкций, базирующихся на учете закономерностей деформирования материалов в общем случае объемного напряженного состояния, в значительной степени сдерживается отсутствием достаточного количества достоверных экспериментальных данных о процессах деформирования и разрушения бетона, в том числе при сложных режимах нагружения.

Опытные данные ряда исследователей при сопоставимых программах нагружения имеют порой существенные расхождения вследствие различий в методиках экспериментальных исследований. Изучение закономерностей деформирования бетонных и железобетонных элементов, в том числе из высокопрочных бетонов, при неодноосных силовых воздействиях, в том числе при сложных режимах нагружения, является актуальной задачей, без решения которой невозможно построение достоверной модели деформирования бетона.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с государственной программой Д-2-04-11 «Разработка новых высококачественных композиционных материалов в виде стойких к коррозии и высокопрочных бетонов и исследование особенностей их работы в условиях объемного напряженно-деформированного состояния и повышенных температур» №0111U001805 (2011-2012 гг.), а также в рамках кафедральной научно-исследовательской работы К-02-04-16 «Экспериментальные исследования и разработка методов расчета железобетонных конструкций зданий и сооружений на температурно-влажностные воздействия с учетом сложных режимов нагружения и нагрева» №0117D000260 (2016-2020 гг.).

Целью исследования является выявление экспериментальными методами закономерностей деформирования и разрушения бетонов классов В25÷В80 при сложных режимах неодноосного сжатия и развитие варианта ортотропной модели деформирования бетона для общего случая объемного напряженного состояния.

Задачи исследований:

1. Выполнение сопоставительного анализа современных критериев прочности и моделей деформирования бетона для общего случая объемного напряженного состояния, определение направлений их дальнейшего развития.

2. Разработка методики экспериментальных исследований деформаций и прочности тяжелых бетонов классов В25÷В80 в условиях одно- и трехосного сжатия.

3. Выполнение экспериментальных исследований закономерностей деформирования и разрушения бетонов классов В25÷В80 в условиях трехосного равномерного и неравномерного сжатия при простых и сложных режимах нагружения.

4. Развитие модифицированного варианта ортотропной деформационной модели бетона для общего случая объемного напряженно-деформированного состояния в части учета влияния исходных характеристик механических свойств бетонов классов В25÷В80 и сложных режимов нагружения.

5. Оценка характеристик объемного напряженно-деформированного состояния элементов железобетонных конструкций зданий и инженерных сооружений при силовых и температурно-влажностных воздействиях.

6. Внедрение результатов исследований в практику проектирования конструкций зданий и сооружений из тяжелых бетонов.

Объект исследования – объемно напряженные элементы железобетонных конструкций из обычных и высокопрочных модифицированных бетонов.

Предмет исследования – прочность и деформации бетонов классов В25÷В80 при одно- и трехосных напряженных состояниях, характеристики НДС конструкций зданий и сооружений при неодноосных силовых и температурно-влажностных воздействиях.

Научную новизну полученных результатов составляют:

- экспериментальные данные в части диаграмм деформирования и показателей прочности бетонов классов В25 – В80 в условиях одно- и трехосного равномерного и неравномерного сжатия;

- установленные закономерности влияния шарового тензора и тензора-девиатора напряжений на параметры физической нелинейности и ортотропии псевдопластического деформирования бетонов при простом и сложных режимах трехосного сжатия;

- выявленные закономерности влияния начальной прочности бетонов классов В25, В50 и В80 на диаграммы их деформирования при пропорциональном и непропорциональных режимах трехосного сжатия;

- установленные сопоставлением с опытными данными границы применимости соотношений ортотропной дилатационной модели деформирования бетона при сложных (непропорциональных) программах нагружения;

- характеристики НДС объемно напряженных железобетонных элементов конструкций зданий и сооружений при практически реализуемых режимах сложных силовых и температурно-влажностных воздействий.

Практическое значение полученных результатов работы состоит:

- в усовершенствовании методики экспериментальных исследований деформаций и прочности бетонов, в том числе высокопрочных, в части способов

устранения контактного трения и измерения деформаций в условиях ограниченности доступа к поверхностям опытных образцов;

- в разработке аналитических выражений для учета влияния начальной прочности бетонов классов В25÷В80 на параметры диаграмм деформирования;

- в обосновании достоверности соотношений развиваемого модифицированного варианта ортотропной модели деформирования бетона;

- в обосновании эффективности применения высокопрочных бетонов для возведения сложно напряженных конструкций инженерных сооружений, эксплуатирующийся в условиях силовых и температурно-влажностных воздействий.

Методология и методы исследования.

- методы физического и математического моделирования;
- механические методы испытания материалов нагружением и измерения перемещений;

- методы механики деформируемого твердого тела;

- методы механики разрушения материалов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика испытаний образцов бетона в условиях трехосного сжатия в части способов устранения контактного трения и измерения деформаций, программа экспериментальных исследований;

2. Результаты экспериментальных и теоретических исследований закономерностей упругопластического и ортотропного псевдопластического деформирования бетона классов по прочности В25 – В80 в условиях одно- и трехосного сжатия;

3. Аналитические выражения, развивающие ортотропную дилатационную модель деформирования бетона в части описания его упругопластических и псевдопластических деформаций применительно к различным случаям трехосного сжатия;

4. Рекомендации по применению моделей деформирования бетона и критериев прочности в расчетах объемно напряженных железобетонных конструкций зданий и сооружений.

Личный вклад соискателя заключается в выполнении экспериментальных исследований, в теоретической обработке и интерпретации полученных данных, в расчетной оценке НДС ряда объемно напряженных конструкций, во внедрении результатов исследований. Представленные в диссертационной работе результаты получены автором самостоятельно. Отдельные составляющие теоретических и экспериментальных исследований, а также внедрение результатов диссертационной работы выполнены с соавторами научных работ, которые изложены в списке публикаций.

Степень достоверности результатов подтверждается результатами экспериментальных исследований, выполненных с применением современных методов, приборов и оборудования в лабораторных и в производственных условиях, а также соответствием расчетных характеристик НДС конструкций по

развиваемой расчетной модели с данными опытов и результатами исследований других авторов.

Апробация диссертационной работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на ежегодных научно-технических конференциях ДонНАСА в 2008-2018 годах, на международной научно-технической конференции студентов (г. Москва, МГСУ, апрель 2008 г.), на I международной научно-практической конференции «Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях» (г. Москва, МГСУ, 24-27 июня 2009 г.), на международной научной конференции РААСН «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов» (г. Воронеж, Воронежский ГАСУ, 14-20 октября 2013 г.), на IX международной научной конференции «Долговечность, прочность и механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов» (г. Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 30-31 марта 2016 г.) и на международной научно-практической конференции «Лопейтовские чтения – 150» «Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям» (г. Москва, МГСУ, 30 ноября 2018 г.).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы автором самостоятельно и в соавторстве в 9 научных изданиях, в том числе 5 публикаций – в рецензируемых научных изданиях: 4 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень специализированных научных журналов; 1 – в зарубежных изданиях, индексируемых международной реферативной базой цитирования SCOPUS, 3 – публикации по материалам научных конференций, 1 – публикация в других изданиях.

Общий объем публикаций – 5,95 п.л., из которых 2,83 п.л. принадлежат лично автору.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, выводов, списка использованной литературы (155 наименований) и приложений. Общий объем работы составляет 229 страниц, в том числе 132 страницы основного текста, 67 полных страниц с рисунками и таблицами, 17 страниц списка использованной литературы, 13 страниц приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во **введении** изложена общая характеристика работы, приведено обоснование актуальности темы, определены цель, задачи исследования, представлены характеристика объекта и предмета исследования, сформулированы научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В первом разделе анализируется состояние вопроса. Развитие методов расчета конструкций с учетом объемного напряженного состояния бетона в значительной степени сдерживается отсутствием достаточного количества достоверных экспериментальных данных о процессах деформирования и разрушения бетона при сложных напряженных состояниях. Опытные данные ряда исследователей Берга О.Я., Бича П.М., Кириллова А.П., Корсуна В.И., Малашкина Ю.Н., Яшина А.В., Кулманова А.К., Dupray F., Geel Van E., Hilsdorf H., Kupfer H., Mier Van J.G.M., Petkovski M., Crouch R.S., Waldron P.,

Sohm J., Gabet T., Horny P., Piau J.M. Schröder S., Opitz H., Tasuji M.E., Slate F.O., Nilson A.H., Thomas G., Torrenti J.M. и др. при сопоставимых программах нагружения имеют порой существенные расхождения вследствие различий в конструкциях опытных образцов и в методиках испытаний.

Представлены результаты сопоставления расчетных величин прочности бетонов при неосесимметричных напряженных состояниях по наиболее разработанным критериям. Приведено описание определяющих соотношений критериев прочности Г.А. Гениева, Г.А. Гениева - Н.М. Аликовой, Е.С. Лейтеса, Н.И. Карпенко, С.Ф. Клованича - Д.И. Безушко, А.В. Яшина, K.J. Willam - E.P. Warnke. Выполнена оценка соответствия расчетных величин прочности опытным значениям в условиях одно-, двух- и трехосных напряженных состояний. Установлено, что наиболее разработанными являются условия прочности С.Ф. Клованича - Д.И. Безушко и K.J. Willam - E.P. Warnke. Высокая степень соответствия указанных критериев опытным данным достигается введением в их определяющие соотношения достаточного количества корректируемых на основе опытных данных параметров.

Представлены для случаев простых и сложных режимов одно-, двух- и трехосных нагружений результаты сопоставительных расчетов деформаций бетона по наиболее разработанным деформационным теориям и соотношениям авторов: Г.А. Гениева, Н.И. Карпенко, В.И. Корсуна, Е.С. Лейтеса и А.Н. Петрова. Наиболее разработанной и пригодной для практической реализации является деформационная теория пластичности бетона Г.А. Гениева, соотношения которой устанавливают связи между инвариантами напряженного и деформированного состояния бетона при кратковременном простом (пропорциональном) нагружении. Модель Г.А. Гениева получила дальнейшее развитие в работах Е.С. Лейтеса и В.И. Корсуна. Е.С. Лейтесом предложено аналитическое выражение для модуля дилатации. В исследованиях Корсуна В.И. модель Г.А. Гениева получила развитие в части учета влияния вида напряженного состояния на основные параметры диаграмм деформирования бетона, а также в части учета направленного развития микроразрушений в структуре бетона – эффектов сжимаемости и дилатации.

Установлена достаточная близость результатов экспериментов и варианта ортотропной деформационной модели бетона, разрабатываемой в ДонНАСА В.И. Корсуном. Она достаточно хорошо отражает характер связей между напряжениями и деформациями в бетоне в условиях плоского напряженного состояния и учитывает направленный характер развития микроразрушений в его структуре.

На основании выполненного анализа сформулированы цель, задачи и методы исследования.

Во втором разделе изложены методики проведения экспериментальных и теоретических исследований, методы обработки полученных результатов, представлены составы примененных тяжелых бетонов низкой, средней и высокой прочности, конструкции и характеристики свойств опытных образцов.

Экспериментальные исследования физико-механических свойств тяжелых бетонов выполнены на образцах, изготовленных из составов (табл. 1) для обычных и высокопрочных модифицированных бетонов.

Расход материалов на 1м³ бетонной смеси

Таблица 1.

Расход материалов на 1м³ бетонной смеси			Расход, кг(л)/м³		
№ п/п	Наименование компонентов		Расход, кг(л)/м³		
			B25	B50	B80
1.	Портландцемент пластифицированный Балаклейского цемкомбината	M400	450	-	-
		M500	-	332	545
2.	Щебень гранитный Караньского карьера		1128	1080	870
3.	Песок кварцевый Краснолиманского карьера		630	750	660
4.	Вода		180 л	215 л	153 л
5.	Органоминеральный модификатор (ОММ)		-	-	190
6.	Суперпластификатор SicaViscocrete5-600		-	-	16,8 л
Объемный вес			2388	2377	2388

Органоминеральный модификатор получен с использованием вторичного сырья промышленности Донбасса и представлен в виде сухой смеси, содержащей следующие составляющие (в % от общего веса): микрокремнезем в составе *Sica Fume* (20%); тонкомолотую золошлаковую смесь Углегорской ТЭС (30%); золу-унос Зуевской ТЭС (48%); суперпластификатор С-3 (2%).

Испытаны 3 серии образцов с классами прочности на сжатие соответственно: I – B25; II – B50; III – B80.

Программа исследований включала:

- исследование способа устранения контактного трения;
- исследование характеристик прочностных и деформационных свойств тяжелых бетонов в условиях осевого и трехосного сжатия при простом (пропорциональном) и сложном (непропорциональном) режимах нагружения.

Опытные образцы для испытаний - призмы размерами 150×150×600 (мм) и кубы размерами 150×150×150 (мм) соответственно. Возраст бетона к началу механических испытаний – 28-30 сут.

По результатам испытаний на осевое сжатие бетонных образцов-призм определялись: призменная прочность R_b , начальный модуль упругости E_b , предельные деформации укорочения $\bar{\varepsilon}_b$, коэффициенты поперечных деформаций μ , диаграммы продольного и поперечного деформирования.

Схемы расположения индикаторов часового типа и тензорезисторов на образцах-призмах и кубах при одно- и трехосном сжатии представлены на рисунке 1.

Выбор способа устранения трения на границах контакта образца с элементами нагружающих устройств осуществлен на основе специальных экспериментальных исследований, в которых образцы различной формы (куб, призма) испытывались на осевое сжатие при различных составах устраняющих трение прокладок на осевое сжатие. Применительно к испытаниям бетонных образцов-кубов в условиях двух- и трехосного сжатия определена и экспериментально обоснована конструкция антифрикционной прокладки, состоящей из четырнадцати слоев алюминиевой фольги, чередующихся со слоями графитовой смазки. При этом два наружных слоя фольги были приняты

толщиной $\delta = 0,15\text{мм}$, двенадцать внутренних слоев - толщиной $\delta = 0,009\text{мм}$, Смазка выполнена из порошкообразного графита марки ГЛ-1 (ГОСТ 5279-74), пропитанного маслом И-40.

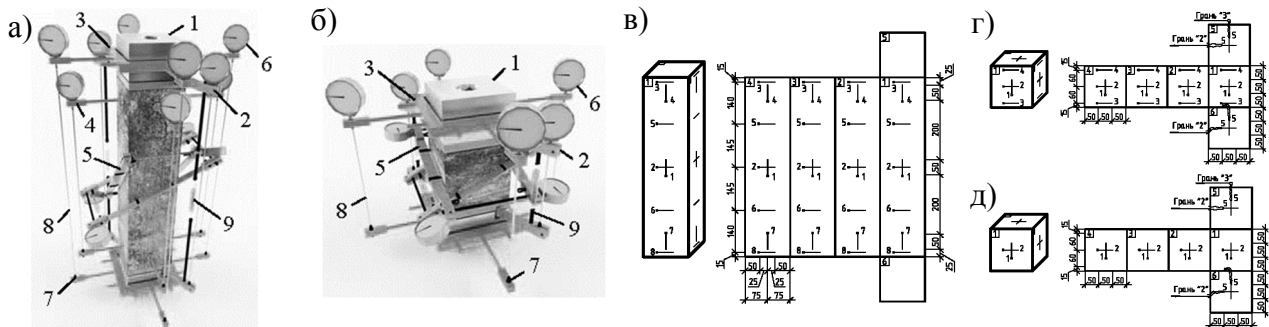


Рис. 1. Схема расположения индикаторов часового типа и тензорезисторов на образцах-призмах (а, в) и кубах (б, г, д) при одно- (а, б, в, г) и трехосном (д) сжатии. Условные обозначения: 1 – нагружающий штамп; 2, 3, 4, 5 – рамки соответственно №№ 1, 2, 3, 4 крепления индикаторов; 6 – индикаторы часового типа; 7 – упорные болты; 8 – удлинители; 9 – стяжные пружины.

Испытания образцов-кубов при трехосном сжатии выполнены на специальной установке (рис. 2), разработанной Корсуном В.И. и Калмыковым Ю.Ю. Установка выполнена в виде пространственной рамной конструкции, в которой вертикальное усилие создается прессом ПММ-1000, а горизонтальные – гидравлическими домкратами ДГ-200. Используются нагружающие штампы специальной конструкции, обеспечивающие свободное размещение рамок для крепления индикаторов часового типа. Одновременно выполнялось измерение деформаций с помощью электротензорезисторов.

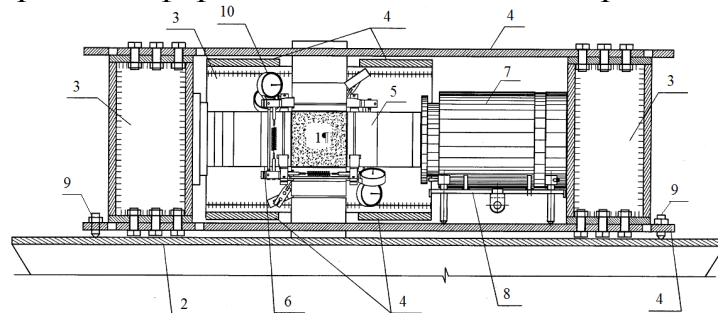


Рис. 2. Схема установки для испытаний бетонных кубов на трехосное сжатие: 1 – бетонный образец; 2 – подвижная тележка прессы; 3 – упорные траверсы пространственной рамы; 4 – тяги пространственной рамы; 5 – нагружающий штамп; 6 – рамки для крепления индикаторов; 7 – домкрат ДГ-200; 8 – столик для центровки домкрата; 9 – вывинчивающиеся опоры; 10 – индикаторы часового типа МИГ-2.

В экспериментальных исследованиях реализованы следующие программы нагружения (рис. 3) опытных образцов:

- программа 1 - трехосное равномерное (гидростатическое) сжатие при $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ до уровня наибольшего среднего напряжения $\sigma_{0,max} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$, создаваемого домкратами ДГ-200 и достигающего величин $1,25 \cdot R_b$, $2,03 \cdot R_b$ и $4,6 \cdot R_b$ для бетонов классов В80, В50 и В25 соответственно;

- программа 2 – догружение сжимающим напряжением σ_3 ступенями по $\Delta\sigma_3$ при сохранении неизменным среднего напряжения $\sigma_{0,max} = const$ и равномерном боковом обжатии $\sigma_1 = \sigma_{1,max} - \Delta\sigma_3/2$; $\sigma_2 = \sigma_{2,max} - \Delta\sigma_3/2$;

- программа 3 – догружение сжимающим напряжением σ_3 ступенями по $\Delta\sigma_3$ при сохранении $\sigma_{0,max}=const$, $\sigma_{2,max}=const$ и снижающимся боковым обжатием $\sigma_1=\sigma_{1,max}-\Delta\sigma_3$.

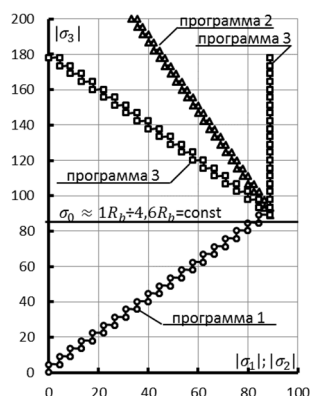


Рис. 3. Траектории нагружения опытных образцов напряжением $\Delta\sigma_3$ на этапах трехосного сжатия:

- - программа 1 – гидростатическое сжатие при $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$ до уровня $\sigma_0=88$ МПа;
- △— - программа 2 – догружение напряжениями $\Delta\sigma_3$ при $\sigma_{0,max}=const$ и $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_{2,max}-\Delta\sigma_3/2$;
- - программа 3 – догружение напряжениями $\Delta\sigma_3$ при $\sigma_{0,max}=const$ и при $\sigma_1=\sigma_{1,max}-\Delta\sigma_3$ и $\sigma_{2,max}=const$.

В процессе испытаний на трехосное сжатие образцов-кубов на каждом этапе нагружения фиксировались главные относительные линейные деформации ε_1 , ε_2 , ε_3 . По задаваемым величинам главных напряжений определялись средние нормальные напряжения σ_0 и интенсивности касательных напряжений τ_i , а по измеренным величинам деформаций – относительное изменение объема θ и интенсивность деформаций сдвига γ_i , которые использовались при конструировании деформационных соотношений и условий разрушения.

В процессе экспериментальных исследований испытано 112 образцов, из которых на одноосное сжатие – 24 призмы и 39 кубов, на трехосное сжатие – 49 кубов.

В **третьем разделе** представлены результаты экспериментальных исследований процессов деформирования и разрушения бетона в условиях одно- и трехосного равномерного и неравномерного сжатия, а также результаты теоретических исследований в части развития модифицированной ортотропной дилатационной модели деформирования бетона.

В исследованиях В.И. Корсуна разработка модели ортотропного деформирования бетона осуществлена на основе деформационной теории пластичности бетона Г.А. Гениева в предположении условного разделения тензора полных деформаций на два составляющих: тензор упруго-пластических деформаций условно сплошного тела и тензор псевдопластических деформаций, связанных с микроразрушениями в структуре бетона. Для описания деформаций первого типа использованы соотношения механики деформируемого твердого тела, для деформаций второго типа – соотношения, дополненные моделью разрушения бетона по сдвиго-отрывному механизму, предложенной В.И. Корсуном.

Разработка модели деформирования бетона на основе указанных предпосылок потребовала проведения специальных экспериментальных исследований по сложным программам нагружения. Одновременно изучалось влияние исходной прочности бетона на процессы его деформирования при высоких уровнях равномерного и неравномерного трехосного сжатия.

Результаты экспериментальных исследований образцов-призм в условиях осевого сжатия представлены в табл. 2 и на рис. 4 и иллюстрируют существенную зависимость основных характеристик диаграмм деформирования от величины начальной прочности бетона. С увеличением класса бетона по прочности на сжатие с В25 до В80 значения призмочной прочности бетона R_b выросли, в среднем, в 3,6 раза, начального модуля упругости – в 2,17 раза, коэффициента Пуассона – в 1,19 раза, предельные деформации укорочения в вершинах диаграмм деформирования снизились в 1,28 раза.

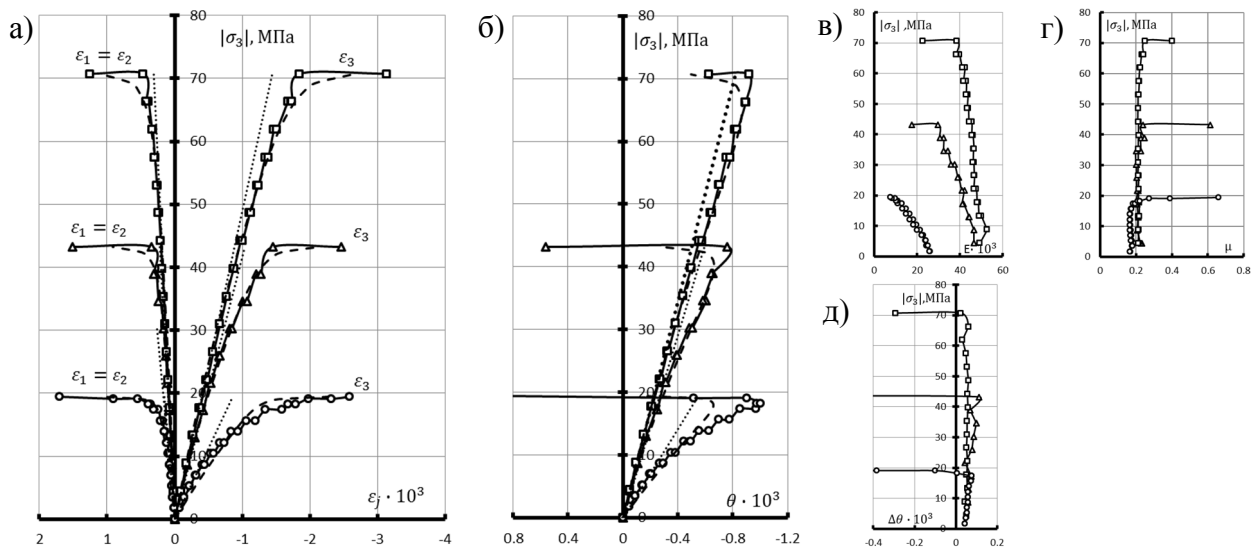


Рис.4. Изменение компонент относительных линейных (а) и объемных деформаций (б), модулей продольных деформаций (в), коэффициентов поперечных деформаций (г) и приращений упругих составляющих объемных деформаций бетона $\Delta\theta$ (д) на этапах одноосного сжатия.

Опытные данные соответственно классам бетона: \square – В80; \triangle – В50; \circ – В25. Теоретические значения: – упругий расчет; – – – – расчет по выражениям (1÷16).

Характеристики механических свойств опытных образцов в условиях осевого сжатия

Таблица 2.

Класс бетона	Призмочная прочность в возрасте 28 сут., R_b , [МПа]	Начальный модуль упругости, E_b , [МПа]	Предельные значения в вершинах диаграмм деформирования			Коэффициент Пуассона, μ
			Линейные компоненты деформации, $\varepsilon_b \times 10^{-3}$	Интенсивность касательных напряжений, τ_i [МПа]	Интенсивность деформаций сдвига $\gamma_i \times 10^{-3}$	
В25	19.40	22680	-2.58	11.20	4.940	0.180
В50	43.22	41700	-2.45	24.95	4.593	0.214
В80	70.70	49200	-1.84	40.82	5.058	0.215

Сопоставительные графики на рис. 4 б свидетельствуют о существенном влиянии начальной прочности опытных образцов на закономерности изменения объемных деформаций. Деформации относительного изменения объема образцов из бетона классов В50 и В80 практически во всем диапазоне сжимающих напряжений изменяются по закону, близкому к закону деформирования упругих тел. Разрушение образцов происходит мгновенно и характеризуется как хрупкое. Псевдопластические деформации, связанные с

макроразрушениями в структуре бетона, заметно проявляются для бетонов классов В50 и В80 с уровнями нагружений порядка $0.78 R_b$ и $0.85 R_b$.

Дополнительно это подтверждается характером изменения величин коэффициентов Пуассона μ и величин приращений относительных объемных деформаций $\Delta\theta$ (рис. 4 г, д).

Для бетона класса В25 характерна более высокая доля пластических деформаций в полной величине деформаций (рис. 4 а-д). Проявление псевдопластических деформаций (эффекта дилатации) отмечено при уровнях напряжений выше $(0.65...0.75) R_b$.

Выявленные различия в характере деформирования бетонов с различной начальной прочностью обусловлены, прежде всего, относительной большей однородностью структуры более прочных бетонов за счет более высокой прочности цементного камня. Диаграммы деформирования более прочных бетонов по форме близки к диаграммам деформирования упругих тел.

Основные результаты экспериментальных исследований образцов-кубов в условиях трехосного сжатия для бетонов исследованных классов прочности представлены на рис. 5, 6 и содержат траектории нагружения образцов (рис. 5 а, б, г, д), графики изменения относительных линейных (рис. 6) и объемных деформаций (рис. 5 в, е).

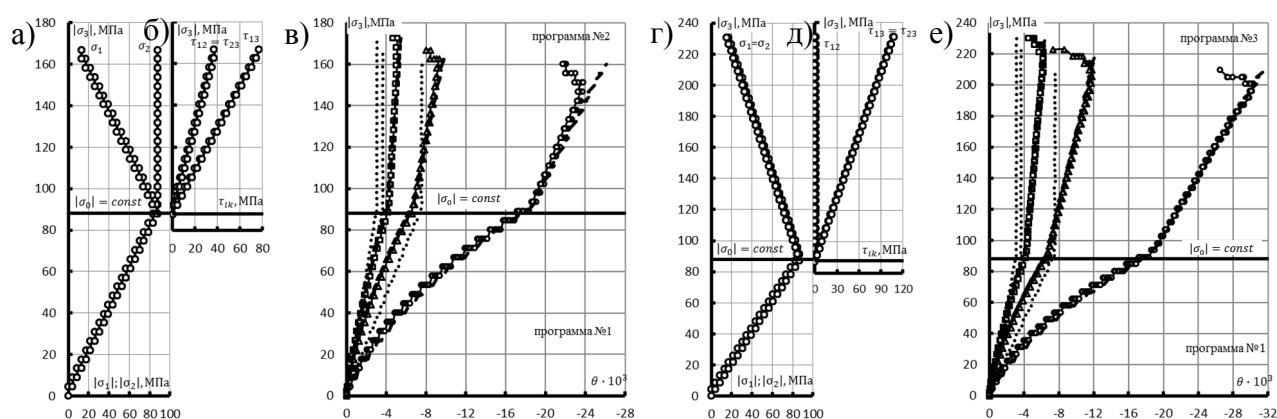


Рис.5. Деформации относительного изменения объема (в, е) при догрузении образцов бетона класса В25, В50 и В80 напряжениями $\Delta\sigma_3$ на этапах трехосного сжатия по программам (№1+№2) (а, б) и (№1+№3) (г, д). Условные обозначения - согласно рис.4.

Высокие уровни равномерного трехосного (гидростатического) сжатия образцов бетона по программе нагружения №1 позволили количественно оценить эффект дополнительного неупругого деформирования бетонов различных классов по прочности (рис. 5). Величины дополнительных пластических деформаций относительного уплотнения объема θ_{pl} характеризуются величиной отклонения полных опытных величин деформаций θ от их расчетных значений θ_{el} по закону упругого изменения объема (рис. 5). Значения θ_{pl} для одних и тех же уровней нагружения возрастают по мере снижения начальной прочности бетона.

Для наибольшего достигнутого в опытах уровня среднего напряжения $\sigma_0 = 88$ МПа величины дополнительных пластических деформаций относительного изменения объема θ_{pl} для бетонов классов В25, В50 и В80 составили

соответственно 127%, 62% и 22% от соответствующих расчетных деформаций θ_{el} в предположении упругого относительного изменения объема.

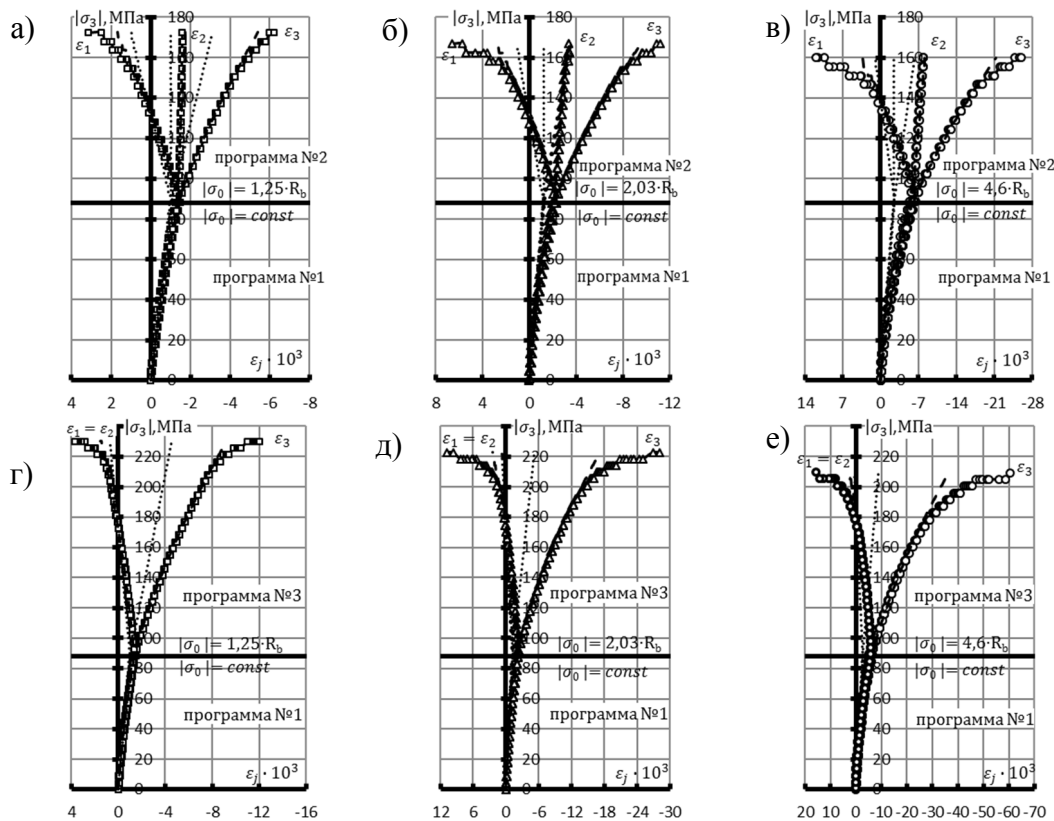


Рис.6. Изменение компонент относительных линейных деформаций на этапах трехосного сжатия по программам №1+№2 (а; б; в) и №1+№3 (г; д; е). Условные обозначения - согласно рис.4.

Догружение опытных образцов по программам №2 и №3 (рис. 5 б, д) характеризуется приростом компонент девиатора напряжений τ_{ik} при неизменной величине среднего напряжения $\sigma_{o,max} = const$. Действие компонент девиатора напряжений τ_{ik} обуславливает проявление двух процессов, связанных с микроразрушениями в структуре бетона. На начальных этапах девиаторного нагружения компонентами τ_{ik} преобладают процессы дополнительного уплотнения объема опытных образцов. Эти процессы характерны для всех исследуемых классов бетонов. Дальнейшее догружение компонентами τ_{ik} сопровождается интенсивным ростом составляющих деформаций, связанных с микроразрушениями в структуре бетона, и обуславливает увеличение объема образцов (рис. 4÷6).

Показатели прочности опытных образцов на этапах догружения по программам №2 и №3 зависели от значений начальной прочности бетона R_b , а также от соотношений напряжений $\sigma_1:\sigma_2:\sigma_3$. Для образцов, испытанных в условиях трехосного сжатия по программам (№1 + №2), прирост прочности для бетона класса В25 при $\sigma_{o,max} = 4.6 \cdot R_b = const$ составил 825% по сравнению с одноосным сжатием. Для этого же бетона аналогичный показатель прироста прочности по программам нагружения (№1 + №3) составил 1079%. Для опытных образцов из бетона класса В80 при $\sigma_{o,max} = 1.25 \cdot R_b = const$ прирост прочности для программ нагружения (№1 + №2) и (№1 + №3) составил 244% и 325%

соответственно. Результаты испытаний подтверждают, что дополнительное боковое обжатие в условиях трехосного сжатия в большей мере способствует повышению относительной прочности для бетонов более низких классов по прочности.

Анализ опытных данных показывает, что для образцов бетона в условиях неравномерного трехосного сжатия процессы, обусловленные разуплотнением структуры бетона (эффект дилатации), начинают проявляться при более низких относительных уровнях главных сжимающих напряжений σ_3 в сравнении с образцами, испытанными в условиях одноосного сжатия. Наибольшие по величине деформации относительного увеличения объема бетона при одинаковых значениях σ_3 характерны для образцов, испытанных в условиях трехосного сжатия по программам (№1 + №3), т.е. при более высоких значениях интенсивности касательных напряжений τ_i . Повышение класса прочности бетона приводит к снижению доли псевдопластических деформаций в величинах полных деформаций, что связано с особенностями проявления процессов микроразрушений в структуре бетона. Отмеченная тенденция характерна для обеих программ девиаторного догружения (программы 2 и 3).

На основе результатов выполненных и привлеченных для анализа экспериментальных исследований предложены модифицированные аппроксимирующие выражения, уточняющие соотношения ортотропной деформационной модели В.И. Корсуна и представленные в выражениях (3) ÷ (16).

При определении компонентов линейных относительных деформаций $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ в направлениях осей ортотропии в условиях кратковременного нагружения и при соблюдении неравенства $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ предложены выражения для определения модуля упругопластических деформаций E^{ep} , а также уточнения в части определения объемных деформация уплотнения θ_{pc} и разуплотнения θ_d :

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{E^{ep}} - \frac{\mu_0}{E^{ep}} \cdot (\sigma_j + \sigma_k) + b_i \cdot \theta_{pc} + a_i \cdot \theta_d; \quad (i, j, k = 1, 2, 3) \quad (1)$$

При этом относительное изменение объема определяется суммой составляющих:

$$\theta = \theta_{ep} + \theta_{pc} + \theta_d \quad (2)$$

где θ_{ep} – упругопластические деформации бетона, не связанные с разрушением его структуры, описываемые соотношениями механики твердого деформируемого тела; b_i, a_i ($i = 1, 2, 3$) – коэффициенты разложения объемных деформаций θ_{pc} и θ_d на составляющие вдоль главных осей, значения которых определяются из предложенной Корсуном В.И. сдвига-отрывной модели разрушения структуры бетона.

При преобразовании опытных данных авторов Яшина А.В., Кулманова А.К., Корсуна В.И., Kupfer H., Schröder S., Tasuji M.E. путем трансформации координат оси деформаций умножением на величину $\sigma_k / I_1(T_\sigma)$ ($k = 1, 3$), что позволяет различные кривые деформирования привести к некоторой единообразной кривой, изменяющейся по подобному закону до уровня нагружения порядка 0,8 от разрушающего значения $\bar{\sigma}_k$ (рис. 7).

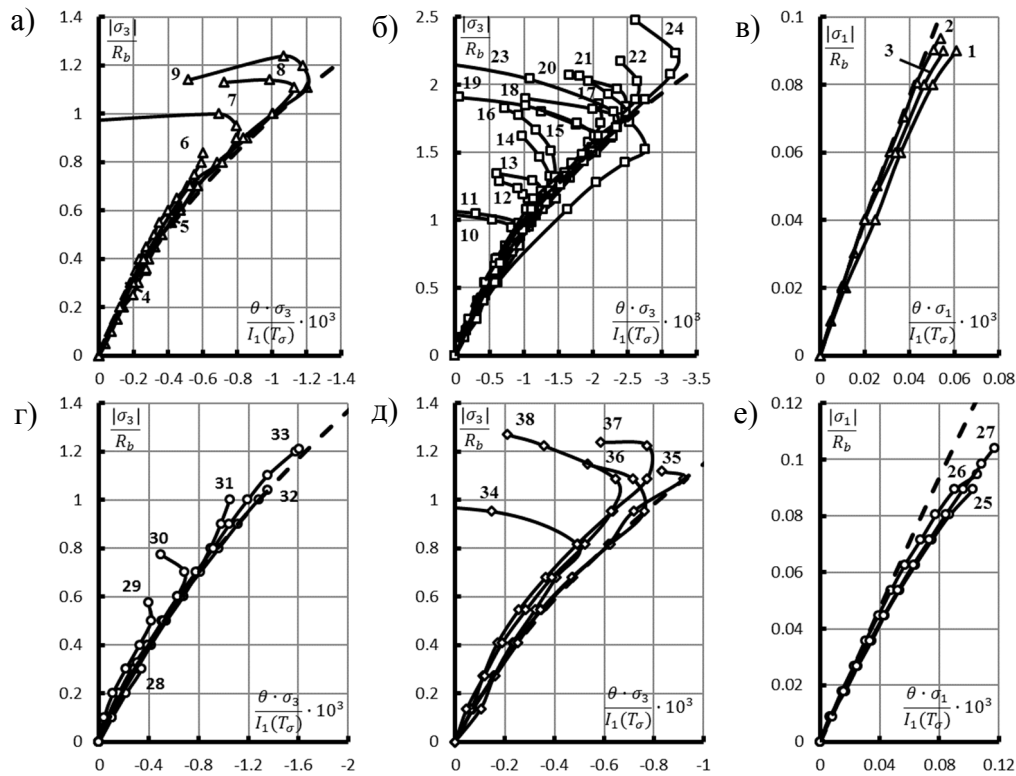


Рис. 7. Графики относительного изменения объема бетона при трансформировании шкалы деформаций: (а; б, г, д) – область сжатия; (в, е) – область растяжения.

Условные обозначения: —▲— - опыты Н. Kupfer; —□— - опыты А.В. Яшина;

—○— - опыты М. Tasuji; —◇— - опыты S. Schröder; - - - - теоретические значения по выражению (5)

№	$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3$	Автор	№	$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3$	Автор	№	$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3$	Автор
1	1: 0: 0	Н. Kupfer	14	-0,065: -0,065: -1	А.В. Яшин	27	1: 1: 0	М. Tasuji
2	1: 0,55: 0	Н. Kupfer	15	-0,08: -0,08: -1	А.В. Яшин	28	0,25: 0: -1	М. Tasuji
3	1: 1: 0	Н. Kupfer	16	-0,1: -0,1: -1	А.В. Яшин	29	0,1: 0: -1	М. Tasuji
4	0,204: 0: -1	Н. Kupfer	17	-0,065: -0,533: -1	А.В. Яшин	30	0,05: 0: -1	М. Tasuji
5	0,103: 0: -1	Н. Kupfer	18	-0,1: -0,1: -1	А.В. Яшин	31	0: 0: -1	М. Tasuji
6	0,052: 0: -1	Н. Kupfer	19	-0,09: -0,15: -1	А.В. Яшин	32	0: -1: -1	М. Tasuji
7	0: 0: -1	Н. Kupfer	20	-0,08: -0,3: -1	А.В. Яшин	33	0: -0,5: -1	М. Tasuji
8	0: -1: -1	Н. Kupfer	21	-0,08: -0,45: -1	А.В. Яшин	34	0: 0: -1	S. Schröder
9	0: -0,52: -1	Н. Kupfer	22	-0,07: -0,5: -1	А.В. Яшин	35	0: -1: -1	S. Schröder
10	0: -1: -1	А.В. Яшин	23	-0,12: -0,12: -1	А.В. Яшин	36	0: -0,7: -1	S. Schröder
11	-0,01: -0,01: -1	А.В. Яшин	24	-0,113: -0,58: -1	А.В. Яшин	37	0: -0,4: -1	S. Schröder
12	-0,016: -1: -1	А.В. Яшин	25	1: 0: 0	М. Tasuji	38	0: -0,2: -1	S. Schröder
13	-0,03: -0,03: -1	А.В. Яшин	26	1: 0,55: 0	М. Tasuji			

При более высоких уровнях нагружения опытные кривые относительного изменения объема получают дополнительное искривление в сторону оси напряжений вследствие дилатационных процессов. Такой вид представления кривых деформирования позволяет применить для их описания единообразную зависимость (5). Они дают наиболее близкие результаты к участкам опытных кривых до уровня $0,8 \cdot \bar{\sigma}_k$, т.е., до начала процессов макротрещинообразования в структуре бетона.

Зависимости для определения упругопластических деформаций θ_{ep} , разработаны в предположении упругопластического деформирования бетона, исходя из следующих основных предпосылок:

1. Полагается, что полные упругопластические деформации бетона θ_{ep} , как условно сплошного тела, не связаны с процессами разрушения структуры бетона и определяются как сумма упругих θ_{el} и пластических θ_{pl} деформаций.

$$\theta_{ep} = \theta_{el} + \theta_{pl} \quad (3)$$

2. При использовании соотношений в форме закона Гука и постоянной величине коэффициента поперечных деформаций μ_0 упругие составляющие объемных деформаций могут быть определены из выражений:

$$\theta_{el} = \frac{I_1(T_\sigma) \cdot (1 - 2 \cdot \mu_0)}{E_0}; \quad \theta_{ep} = \frac{I_1(T_\sigma) \cdot (1 - 2 \cdot \mu_0)}{E_{ep}}. \quad (4)$$

3. Аналитические выражения для определения упругопластических деформаций бетона θ_{ep} получены аппроксимацией выявленных закономерностей их изменения путем обработки экспериментальных данных, представленных на рис 7.

при $\sigma_3 < 0$

$$\theta_{ep} = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sigma_3} \cdot \left(c_1 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{R_b} \right)^2 + d_1 \cdot \frac{\sigma_3}{R_b} \right) = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sigma_3} \cdot F(\sigma_3); \quad (5)$$

при $\sigma_3 \geq 0$ (область растяжения)

$$\theta_{ep} = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sigma_1} \cdot \left(c_2 \cdot \left(\frac{\sigma_1}{R_b} \right)^2 + d_2 \cdot \frac{\sigma_1}{R_b} \right) = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sigma_1} \cdot F(\sigma_1);$$

$$\text{где } c_1 = -c_2; \quad d_1 = d_2; \quad F(\sigma_l) = \left(c_k \cdot \left(\frac{\sigma_l}{R_b} \right)^2 + d_k \cdot \frac{\sigma_l}{R_b} \right); \quad (k=1, 2; \quad l=3, 1). \quad (6)$$

Модуль упругопластических деформаций E_{ep} определяется в предположении равенства упругопластических деформаций θ_{ep} для случаев $\sigma_3 < 0$ и $\sigma_3 \geq 0$ согласно выражениям (4) и (5):

$$E_{ep} = \frac{(1 - 2 \cdot \mu_0) \cdot \sigma_l}{F(\sigma_l)} = E_0 \cdot (1 - \omega) \quad (7)$$

$$\omega = 1 - \frac{E_{ep}}{E_0} = \frac{E_0 - E_{ep}}{E_0} = 1 - \frac{(1 - 2 \cdot \mu_0) \cdot \sigma_l}{F(\sigma_l) \cdot E_0} = 1 - \frac{\sigma_l}{F(\sigma_l) \cdot K_\sigma}.$$

где ω – коэффициент пластичности условно сплошного тела; K_σ – модуль объемного сжатия.

Деформационные параметры c_l и d_l определяются из соотношений (5) для двух характерных точек на кривых деформирования:

$$c_1 = - \frac{R_b^2 \cdot (I_1^{T.1} \cdot \theta^{T.2} - I_1^{T.2} \cdot \theta^{T.1})}{I_1^{T.1} \cdot I_1^{T.2} \cdot (\sigma_3^{T.1} - \sigma_3^{T.2})}; \quad (8)$$

$$d_1 = \frac{R_b \cdot (I_1^{T.1} \cdot \theta^{T.2} \cdot \sigma_3^{T.1} - I_1^{T.2} \cdot \theta^{T.1} \cdot \sigma_3^{T.2})}{I_1^{T.1} \cdot I_1^{T.2} \cdot (\sigma_3^{T.1} - \sigma_3^{T.2})}$$

В качестве исходных приняты следующие параметры для каждой из точек: напряжения $\sigma_3^{T.i}$, объемные деформации $\theta^{T.i}$ и первый инвариант тензора напряжений $I_1(T_\sigma)^{T.i}$. Для анализа опытных данных в качестве характерных выбраны точки на кривых деформирования, полученные из опытов на одноосное сжатие бетонов В25, В50, В80 при уровне напряжений $0,3 \cdot R_b$, а также из опытов

на трехосное равномерное сжатие при уровне $1,0 \cdot R_b$. Значения коэффициентов c_1 и d_1 , наиболее точно соответствующие опытным данным, составили:

$$\begin{aligned} c_1 &= -1,5 \cdot 10^{-4}, & d_1 &= 6,5 \cdot 10^{-4} & - \text{ для бетона В25} \\ c_1 &= -3,0 \cdot 10^{-4}, & d_1 &= 4,5 \cdot 10^{-4} & - \text{ для бетона В50} \\ c_1 &= -3,0 \cdot 10^{-4}, & d_1 &= 7,0 \cdot 10^{-4} & - \text{ для бетона В80} \end{aligned} \quad (9)$$

Величины объемной деформации уплотнения θ_{pc} и объемной деформации дилатации θ_d определяются из опытных данных при использовании конкретных теоретических предпосылок. Выполняется следующая последовательность действий:

- определяются расчетные величины упругопластических деформации ε_i^{ep} при значениях модуля упругопластических деформаций E_{ep} согласно уравнению (7):

$$\varepsilon_i^{ep} = \frac{\sigma_i}{E_{ep}} - \frac{\mu_0}{E_{ep}} \cdot (\sigma_j + \sigma_k); \quad (i, j, k = 1, 2, 3) \quad (10)$$

- определяются величины деформаций уплотнения ε_i^{pc} и дилатации ε_i^d вычитанием упругопластических деформаций ε_i^{ep} из опытных величин компонент полных главных деформаций ε_i .

$$\begin{aligned} \varepsilon_i^{pc(d)} &= \varepsilon_i - \varepsilon_i^{ep}; \quad (i, j, k = 1, 2, 3); \\ \varepsilon_1^d &= \varepsilon_1 - \varepsilon_1^{ep}; \quad \varepsilon_2^{pc(d)} = \varepsilon_2 - \varepsilon_2^{ep}; \quad \varepsilon_3^{pc} = \varepsilon_3 - \varepsilon_3^{ep}. \end{aligned} \quad (11)$$

Запись выражений в форме (11) отражает основные закономерности развития деформаций бетона вследствие разрушения его структуры по типу пространственно ориентированной «зигзаг-трещины»: деформации сдвигового уплотнения развиваются в направлениях больших сжимающих напряжений, а сдвигового разуплотнения - преимущественно в направлениях, меньших сжимающих (больших растягивающих) напряжений.

- определяются составляющие деформации относительного изменения объема - величины объемной деформации уплотнения θ_{pc} и дилатации θ_d делением величин $\varepsilon_i^{pc(d)}$ из уравнения (11) на соответствующие коэффициенты ортотропии b_i и a_i из модели В.И. Корсуна с их знаком:

$$\theta_d = \frac{\varepsilon_1^d}{a_1}; \quad \theta_{pc} = \frac{\varepsilon_3^{pc}}{b_3}. \quad (12)$$

Для определения объемной деформации дилатации θ_d в качестве исходного принято выражение Г.А. Гениева в сочетании с модифицированным выражением для модуля дилатации на базе предложенной Е.С. Лейтесом формулы:

$$\theta_d = q(\gamma_i) \cdot \gamma_i^2 = \gamma_i^2 \cdot \frac{1}{\bar{\gamma}_i} \cdot \frac{G}{K} \cdot \frac{1 - \exp(-\eta_\gamma^3)}{\eta_\gamma + \exp(-\eta_\gamma^3)} \cdot k_1, \quad (13)$$

Величины деформаций сдвигового уплотнения θ_{pc} с ростом уровня нагружения пропорциональны деформациям сдвигового разуплотнения θ_d . Это вытекает из единого механизма разрушения структуры бетона по типу пространственно ориентированной «зигзаг-трещин» в модели В.И. Корсуна. Поэтому для аналитического описания деформации θ_{pc} использовано выражение, аналогичное формуле (13).

$$\theta_{pc} = q(\gamma_i) \cdot \gamma_i^2 = \gamma_i^2 \cdot \frac{1}{\bar{\gamma}_i} \cdot \frac{G}{K} \cdot \frac{1 - \exp(-\eta_\gamma^3)}{\eta_\gamma + \exp(-\eta_\gamma^3)} \cdot k_2, \quad (14)$$

Модифицирование аналитического выражения для модуля дилатации, предложенного Е.С. Лейтесом, заключается в замене отношения $|\sigma_0|/\tau_i$ функцией $k_{1(2)}$.

Численные значения функций k_1 , k_2 определены делением значений θ_d и θ_{pc} в вершинах диаграмм деформирования, полученных из опытов по выражениям (12), на расчетные величины по выражениям (13) и (14). Расчетные значения функций k_1 , k_2 представлены на рис.8.

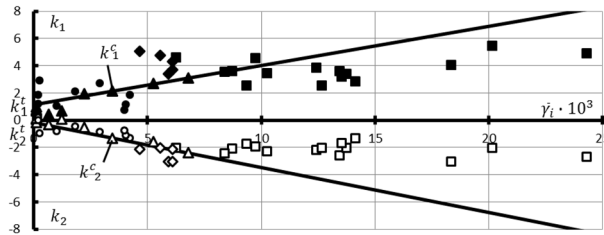


Рис.8. Расчетные по формулам (15), (16) значения функций k_1 и k_2 в вершинах диаграмм деформирования. Условные обозначения опытных точек смотреть рис.7.

Из анализа опытных данных выражения для корректирующих функций $k_{1(2)}$ рекомендованы в следующем виде:

$$k_1 = m_1 \cdot \bar{\gamma}_i + k_1^t; \quad k_2 = m_2 \cdot \bar{\gamma}_i + k_2^t. \quad (15)$$

Входящие в формулы (15) параметры определяются из выражений:

$$m_1 = \frac{k_1^c - k_1^t}{\bar{\gamma}_i^c}; \quad m_2 = \frac{k_2^c - k_2^t}{\bar{\gamma}_i^c}, \quad (16)$$

где $k_1^t = 1,134$; $k_2^t = -0,158$; $k_1^c = 2,133$; $k_2^c = -1,302$ - значения коэффициентов из опытов на одноосное растяжения и сжатие (рис.8); $\bar{\gamma}_i^c = 3,467 \cdot 10^{-3}$ - значение интенсивности деформаций сдвига, соответствующее вершине диаграммы в опытах на одноосное сжатие.

В четвертом разделе представлены результаты расчетного определения объемного напряженно-деформированного состояния в бетонных элементах со стесненным поперечным деформированием, в массивных бетонных элементах от неоднородных по объему конструкции деформаций усадки бетона, в крупноразмерных железобетонных элементах с поперечным сетчатым армированием при нагружении центральным сжатием, а также результаты натурного эксперимента и расчета характеристик НДС конструкций массивного рамного фундамента под турбоагрегат энергоблока Зуевской ТЭС при неравномерном нагреве.

Численное моделирование объемного напряженно-деформированного состояния бетонного образца-куба при испытаниях на одноосное сжатие с учетом сил контактного трения на границе контакта со стальными плитами нагружающих штампов осуществлено средствами программного комплекса ANSYS Workbench 14.5, выполнив 2 группы расчетов: с устранением (расчеты 1а и 2а) и без устранения контактного трения «нагружающий штамп – бетонный образец» (расчеты 1б и 2б). Результаты расчетов для случаев учета контактного

трения (расчеты 1б и 2б, рис.9) демонстрируют явное неоднородное трехосное напряженно-деформированное состояние по объему образцов-кубов с концентрацией сжимающих напряжений в центральной части контактной зоны.

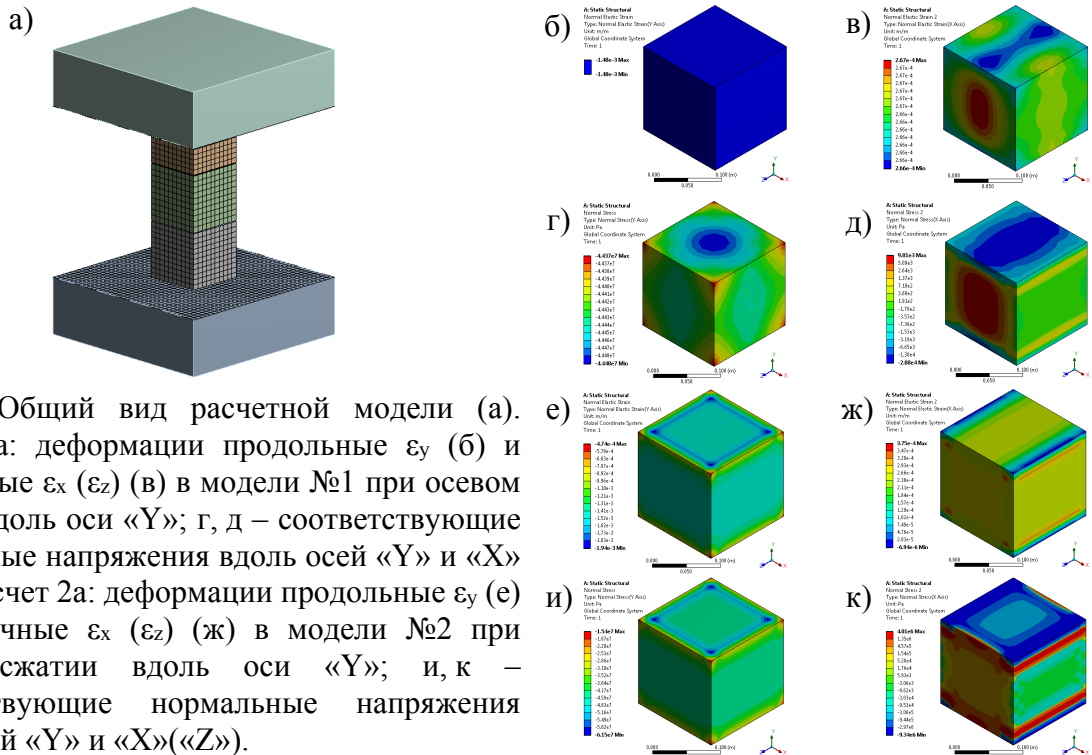


Рис.9. Общий вид расчетной модели (а). Расчет 1а: деформации продольные ε_y (б) и поперечные ε_x (ε_z) (в) в модели №1 при осевом сжатии вдоль оси «Y»; г, д – соответствующие нормальные напряжения вдоль осей «Y» и «X» («Z»). Расчет 2а: деформации продольные ε_y (е) и поперечные ε_x (ε_z) (ж) в модели №2 при осевом сжатии вдоль оси «Y»; и, к – соответствующие нормальные напряжения вдоль осей «Y» и «X» («Z»).

Деформации кручения ригеля массивного рамного фундамента под турбоагрегат энергоблока ТЭС вследствие локального неравномерного нагрева, измеренные в натурном эксперименте и определенные расчетом с помощью ANSYS Workbench 14.5 в сочетании с соотношениями (1) ÷ (16), оказались в 1,42 раза выше предельно допустимых значений для опорных конструкций турбины, равных 0,2 мм/м, что приводило к перекосам положения опорного стола и, как следствие, к возникновению проблемных ситуаций в работе турбины энергоблока.

Исследуемый объект – пространственная сборно-монолитная конструкция фундамента рамного типа под паровую турбину, состоящая из 16 колонн, продольных и поперечных ригелей, монолитных участков нижней фундаментной и верхней опорной плит. Максимальные расчетные сжимающие напряжения в нормальном сечении ригеля от стесненных температурных деформаций приведены на рис. 10 и составили по направлениям осей «Y», «Z» 0,37 МПа и 3,69 МПа соответственно.

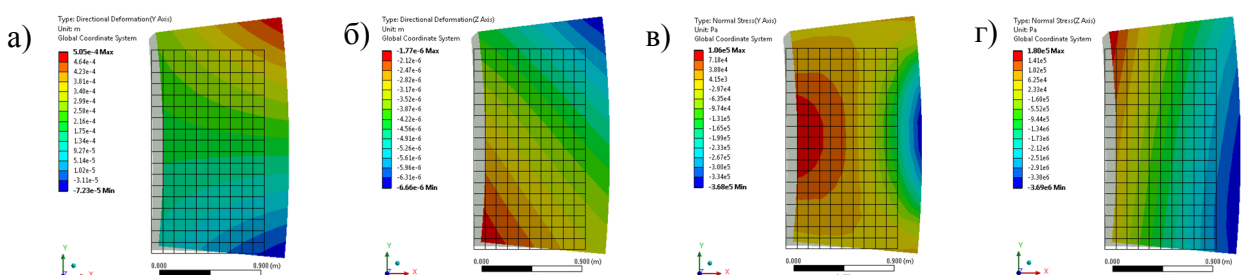


Рис.10. Деформации и напряжения на участках центрального сечения опорного ригеля фундаментной рамы от неравномерного нагрева в направлениях оси «Y» (а, в) и «Z» (б, г).

Оценка влияния расчетными методами стесненных поперечных деформаций на параметры объемного НДС центрально сжатых железобетонных элементов с косвенным армированием выполнена на основе данных экспериментальных исследований Корсуна А.В. Железобетонные образцы-призмы размерами 150x150x600 мм и 250x250x650 мм, армированные поперечными сетками в сочетании с продольной арматурой. Общий вид расчетных моделей представлен на рис. 11.

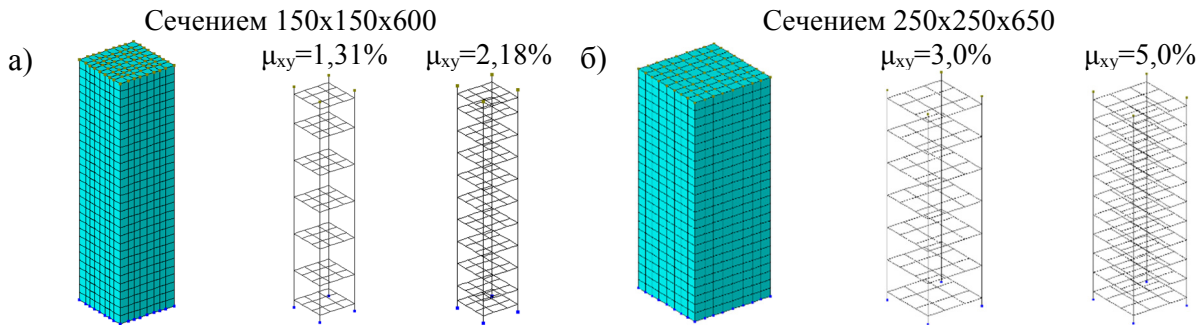


Рис. 11. Конечноэлементные модели образцов-призм размером 150x150x600 (а) и 250x250x650 (б) с коэффициентом косвенного армирования $\mu_{xy} = 1,3\%$, $\mu_{xy} = 2,2\%$ (а) и $\mu_{xy} = 3,0\%$, $\mu_{xy} = 5,0\%$ (б).

Результаты расчета деформаций объемно напряженных армированных образцов-призм с учетом встроенных в ПК Лири САПР нелинейных законов деформирования и программируемого приложения USERMAT в ANSYS Workbench 14.5 в сочетании с уточненными деформационными соотношениями представлены на рис. 12 и в табл. 3. Наилучшее соответствие расчетных величин деформаций опытным значениям достигнуто при использовании закона номер (14) ПК Лири САПР и модернизированного закона деформирования программируемого приложения USERMAT в ANSYS Workbench 14.5.

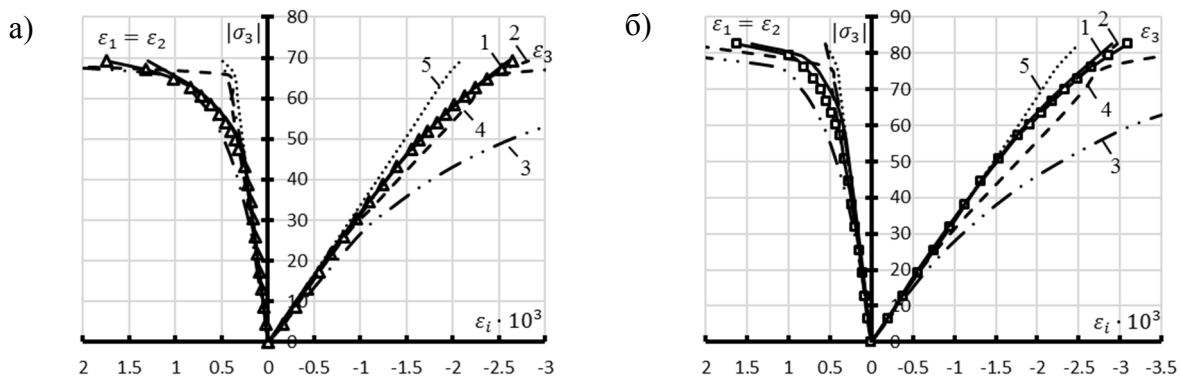


Рис.12. Изменение компонент линейных деформаций бетонных образцов-призм размерами 150x150x600 (а) и 250x250x650 (б) в условиях одноосного сжатия.

Теоретические кривые по законам нелинейного деформирования:

- | | |
|--------------------------------------|----------------------------------|
| 1 ————— ANSYS Workbench | 2 — · — закон №14 ПК «Лири САПР» |
| 3 — · · — закон №11 ПК «Лири САПР» | 4 — — — закон №13 ПК «Лири САПР» |
| 5 ········· закон №18 ПК «Лири САПР» | |

Расчетами установлено, что наличие косвенного армирования может приводить за счет стеснения поперечных деформаций к повышению несущей способности железобетонных образцов-призм в 1,33÷1,48 раза.

Результаты расчета образцов-призм

Таблица 3.

№2	Наименование параметров	Значения параметров							
1	Размеры образцов, мм	150x150x600				250x250x650			
2	Косвенное армирование, μ_{xy} %	1,31		2,18		3,0		5,0	
3	Значение коэф. попер. деформаций, учитываемое в расчете, μ	0,18	0,5	0,18	0,5	0,18	0,5	0,18	0,5
4	Призменная прочность R_b , МПа	69,2				82,5			
5	Опытная величина разрушающих напряжений, МПа, под чертой – $R_b / \sigma_z^{\text{разр}}$	<u>91,7</u> (1,33)		<u>100,1</u> (1,45)		<u>108,0</u> (1,31)		<u>122,1</u> (1,48)	
6	Приведенное сопротивление бетона сжатию с учетом косвенного армирования $R_{b,\text{red}}$, ф.104 СНиП 2.03.01-84*, МПа, под чертой - $R_b / R_{b,\text{red}}$	<u>87,54</u> (1,27)		<u>95,68</u> (1,38)		<u>110,71</u> (1,34)		<u>121,57</u> (1,47)	
7	Приведенное сопротивление бетона сжатию с учетом косвенного армирования $R_{bs,\text{loc}}$, ф.8.84 СП 63.13330.2012, МПа, под чертой - $R_b / R_{bs,\text{loc}}$	<u>80,18</u> (1,16)		<u>87,49</u> (1,26)		<u>97,24</u> (1,18)		<u>109,69</u> (1,33)	
8	Предел текучести арматуры σ_t , МПа	492				390			
9	Напряжения в арм. стержнях сеток косвенного армирования, МПа	92,2	251,1	102,4	278,6	116,3	327,2	127,7	362,2
10	Поперечные напряжения в бетоне между сетками косвенного арм., МПа	-0,36	-1,1	-1,0	-4,4	-1,3	-3,9	-2,7	-5,9
11	Прирост прочности в бетоне, между сетками, по критерию прочности С.Ф. Клованич - Д.И. Безушко (σ_i / R_b)	1,04	1,14	1,12	1,7	1,14	1,51	1,29	1,79
12	Поперечные напряжения в бетоне в уровне сетки косвенного арм., МПа	-0,85	-2,12	-0,98	-3,01	-1,48	-4,57	-2,58	-8,15
13	Прирост прочности в бетоне, в уров- не сетки, по критерию прочности С.Ф. Клованич - Д.И. Безушко (σ_i / R_b)	1,1	1,31	1,12	1,42	1,16	1,65	1,28	2,31

Оценка влияния неравномерной усадки бетона по объему крупноразмерного элемента конструкции выполнена с помощью программного комплекса Лира-САПР. В качестве исходных данных для анализа исследуемого фактора приняты результаты экспериментальных исследований влияния масштабного фактора на механические характеристики и деформации усадки высокопрочного бетона, приведенные в работе Корсуна А.В. Рассматриваемый элемент конструкции – бетонная призма размерами 250×250×650 мм. Исследуемый элемент в расчетной модели представлен системой призматических конечных элементов (КЭ), соответствующих объемам бетона размерами 50х50х130 (мм), с заданными неоднородными по объему конструкции деформациями усадки бетона (рис. 13а). Расчеты характеристик НДС неоднородной конструкций выполнены для значений возраста бетона после снятия опалубки 4, 15, 28, 60, 90 и 180 суток. Результаты расчетов представлены в табл. 4 и на рис. 13.

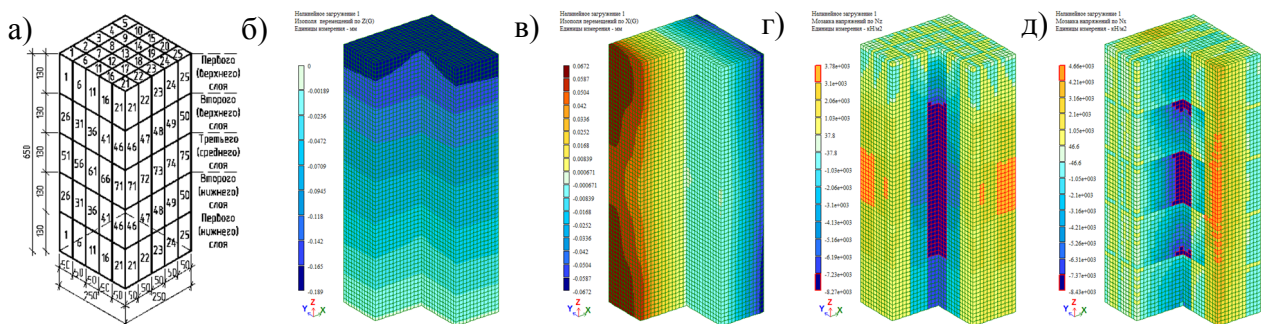


Рис.13. Схема дискретизации образца по группам свойств по высоте элемента (а). Изменение деформаций (б, в) и напряжений (г, д) по объему образца в возрасте 28 суток по направлению осей «Z» (б, г) и «X» (в, д).

Результаты численных исследований влияния неоднородных по
объему деформаций усадки бетона

Таблица 4

Возраст бетона, сут	Деформации, $\varepsilon_i \cdot 10^{-3}$						Напряжения, МПа	
	Продольные, ε_z			Поперечные, $\varepsilon_x = \varepsilon_y$			σ_z	$\sigma_x = \sigma_y$
	$\varepsilon_{расч}$	$\varepsilon_{эксп}$	$\varepsilon_{расч}/\varepsilon_{эксп}$	$\varepsilon_{расч}$	$\varepsilon_{эксп}$	$\varepsilon_{расч}/\varepsilon_{эксп}$		
4	0,138	0,15	0,921	0,253	0,243	1,04	-3,32 (1,07)	-2,65 (1,56)
15	0,250	0,277	0,903	0,455	0,463	0,982	-6,12 (2,67)	-6,64 (2,90)
28	0,291	0,32	0,909	0,538	0,538	1,0	-8,27 (3,78)	-8,97 (4,48)
60	0,355	0,39	0,910	0,645	0,66	0,978	-9,45 (4,05)	-10,4 (4,45)
90	0,385	0,425	0,906	0,701	0,713	0,983	-9,52 (4,47)	-10,5 (4,91)
180	0,398	0,44	0,906	0,738	0,738	1,0	-10,1 (4,66)	-11,1 (5,12)

Учет неоднородного распределения деформаций усадки и механических свойств бетона по объему конструкции для рассматриваемых периодов времени приводит к возникновению дополнительных сжимающих напряжений величиной до 11.1 МПа в центральных КЭ и растягивающих напряжений величиной до 5.12 МПа в отдельных наружных КЭ, которые превышают прочность бетона на растяжение и обуславливают появление трещин.

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе установлены закономерности деформирования и разрушения бетонов классов В25, В50, В80 при простом и сложных режимах одно- и трехосного сжатия, уточнены определяющие соотношения модифицированного варианта ортотропной дилатационной модели деформирования бетона для общего случая объемного напряженного состояния. Полученные результаты имеют научную и практическую ценность:

1. Выполнен сопоставительный анализ современных моделей деформирования бетона для общего случая объемного напряженного состояния. Установлено, что наиболее отражающей основные закономерности деформирования бетона является деформационная теория пластичности бетона Г.А. Гениева. Развивающие ее варианты теории, предложенные в работах Е.С. Лейтеса и В.И. Корсуна, нуждаются в дальнейшем развитии на основе экспериментальных исследований по специальным программам нагружения.

2. Разработана методика и выполнены экспериментально-теоретические исследования упругопластических и псевдопластических деформаций бетонов классов В25÷В80 при простых и сложных режимах одно- и трехосного сжатия. Предложены уточненные аналитические выражения для описания упругопластических и псевдопластических деформаций бетона, обусловленных процессами микро- и макротрещинообразования в его структуре.

3. Получены результаты экспериментальных исследований закономерностей деформирования и разрушения бетонов классов В25÷В80 в условиях трехосного равномерного и неравномерного сжатия при простых и сложных режимах нагружения.

При нагружениях гидростатическим сжатием величины дополнительных пластических деформаций относительного уплотнения объема θ_{pl} , установленные для наибольших достигнутых в опытах уровнях среднего

напряжения $\eta_0 = \sigma_0 / R_b = 4,6; 2,03; 1,25$ соответственно бетонам классов В25, В50, В80, составили 127%, 62% и 22% от соответствующих расчетных величин θ_{el} в предположении упругого деформирования бетона.

Прирост прочности для бетона класса В25 при $\eta_0 = \sigma_0 / R_b = 4,6$ для программ сложного нагружения 1+2 и 1+3 составил 824% и 1079% соответственно, для бетона класса В80 при $\eta_0 = \sigma_0 / R_b = 1,25$ при тех же программах нагружения прирост составил 244% и 325% соответственно, что подтверждает большее влияние дополнительного бокового обжатия на прирост прочности у бетонов более низких классов прочности в сравнении с более прочными бетонами.

4. Выполнено развитие варианта модифицированной ортотропной дилатационной модели деформирования бетона в части разработки уточненных аналитических выражений для модуля упругопластических деформаций E^{ep} , для объемных деформаций уплотнения θ_{pc} и разуплотнения θ_d применительно к общему случаю объемного напряженно-деформированного состояния, а также в части учета влияния исходных характеристик механических свойств бетонов разных классов в диапазоне от В25 до В80 и сложных режимов нагружения.

5. Результаты теоретических исследований характеристик объемного НДС железобетонных элементов при сложных режимах силовых и температурных воздействий с применением разработанных для ПЭВМ алгоритмов и методик свидетельствуют о том, что учет работы бетона в условиях объемного напряженного состояния и физической нелинейности его деформирования с использованием разработанных в настоящем исследовании аналитических выражений для ортотропной дилатационной модели деформирования бетона позволяет достоверно оценить характеристики объемного напряженно-деформированного состояния конструкций зданий и сооружений.

6. Результаты исследований внедрены:

- при оценке напряженно-деформированного состояния опорных фундаментных балок-стенок под внутреннюю оболочку башенного копра клетьевого ствола №4 шахты им. В.И. Ленина ГП «Макеевуголь»;

- при разработке лекционных курсов дисциплин «Физические модели бетона и железобетона. Основы построения диаграммных методов расчета строительных конструкций», «Методы решения научно-исследовательских задач в строительстве».

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

– публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. Корсун, В. И. Применение соотношений деформационной теории пластичности для описания деформаций бетона при сложных режимах многоосного нагружения [Текст] / В. И. Корсун, **А. В. Недорезов** // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – Київ: ДОННАБА. – 2013. – Т. 9, № 3 – С. 175-185. *(Выполнено теоретическое исследование деформационной теории пластичности при сложных режимах многоосного нагружения).*

2. Корсун, В. И. Совершенствование методики испытаний бетона при неосновном сжатии [Текст] / В. И. Корсун, **А. В. Недорезов** // Вісник

Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Сучасні будівельні матеріали: зб. наук. пр. – Макіївка: ДонНАБА. – 2014. – Вип. 2014 – 1 (105). – С. 163-171. *(Выполнен анализ методик экспериментальных исследований)*.

3. Корсун, В. И. Сопоставительный анализ критериев прочности для бетонов [Текст] / В. И. Корсун, **А. В. Недорезов**, С. Ю. Макаренко // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – Макіївка: ДонНАБА. – 2014. – Т. 10, № 1 – С. 65-78. *(Представлены результаты сопоставления опытных и расчетных величин прочности бетонов по наиболее разработанным критериям)*.

4. Корсун, В. И. Вариант описания закономерностей упругопластического и псевдопластического деформирования бетона в условиях объемного напряженного состояния [Текст] / В. И. Корсун, **А. В. Недорезов** // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – Макіївка: ДонНАБА. – 2014. – Т. 10, № 2 – С. 147-168. *(Представлены предложения по усовершенствованию варианта модифицированной деформационной теории пластичности бетона)*.

5. Korsun, V. The Influence of the Initial Concrete Strength on its Deformation under Triaxial Compression [Текст] / V. Korsun, Y. Kalmykov, **A. Niedoriezov**, A. Korsun // Procedia Engineering (включено в SCOPUS). – 117 (2015) – pp. 959-969. *(Представлены результаты экспериментальных исследований влияния исходной прочности тяжелого бетона на закономерности развития линейных объемных и сдвиговых деформаций в условиях трехосного сжатия)*.

– **публикации по материалам конференций:**

6. Корсун, А. В. Влияние высоких температур на прочность и деформацию высокопрочных модифицированных бетонов [Текст] / А. В. Корсун, **А. В. Недорезов**, А. В. Мельник // Сборник докладов международной научно-технической конференции студентов (апрель 2008 г., Москва). – М.: МГСУ, 2008. – С. 142-146. *(Исследовано влияние повышенных температур на физико-механические свойства высокопрочного бетона)*.

7. Корсун, В. И. О возможности применения соотношений деформационной теории пластичности для описания деформаций бетона при сложных режимах нагружения [Текст] / В. И. Корсун, **А. В. Недорезов** // I Международная научно-практическая конференция «Научно-техническое творчество молодежи - путь к обществу, основанному на знаниях»: сб. науч. докл. (24-27 июня 2009 г., Москва). – М: МГСУ, 2009. – С. 52-54. *(Выполнено теоретическое исследование деформационной теории пластичности при сложных режимах нагружения)*.

8. Корсун, В. И. Закономерности ортотропного деформирования бетона при неодноосном сжатии [Текст] / В. И. Корсун, Ю. Ю. Калмыков, **А. В. Недорезов** // Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов: сб. ст. по матер. 7-й междунар. науч. конф. – Воронеж: РААСН, Воронежский ГАСУ, 2013. – Т.1 – С. 178-187. *(Представлены результаты экспериментальных исследований закономерностей ортотропного деформирования бетонов средней и высокой прочности при одно- и трехосном сжатии)*.

– публикации в других изданиях:

9. Недорезов А. В. Исследование напряженно-деформированного состояния ригеля рамного фундамента под турбоагрегат энергоблока ТЭС [Текст] / А. В. Недорезов // Будівельне виробництво. – 2013. – №55 – С. 69-78. *(Выполнен анализ полученных результатов экспериментальных и теоретических исследований деформаций ригеля рамного фундамента)*

АННОТАЦИЯ

Недорезов Андрей Владимирович. **Деформации и прочность железобетонных элементов при сложных режимах объемного напряженного состояния.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения. – ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». – Макеевка, 2018 г.

Диссертация посвящена экспериментальным и теоретическим исследованиям закономерностей деформирования и разрушения тяжелых цементных бетонов, в том числе высокопрочных, при сложных режимах неоднородного (трехосного) сжатия и оценке напряженно-деформированного состояния элементов железобетонных конструкций зданий и инженерных сооружений при силовых и температурно-влажностных воздействиях.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель, задачи исследований, научная новизна, практическая значимость результатов работы, ее связь с государственными программами.

В первом разделе анализируется состояние вопроса. Сопоставлены методики экспериментальных исследований деформаций и прочности тяжелых бетонов в условиях одно-, двух- и трехосного нагружения, а также расчетные критерии прочности и деформационные модели для бетонов при неоднородных напряженных состояниях.

Во втором разделе представлены составы исследованных бетонов, характеристика опытных образцов, изложены методики проведения экспериментальных и теоретических исследований, методы обработки полученных результатов.

В третьем разделе представлены результаты экспериментальных исследований деформаций и прочности тяжелых бетонов, в том числе высокопрочного, при сложных режимах одно- и трехосного сжатия, предложения по уточнению расчетной модели деформирования бетона в части определения упругопластических и псевдопластических деформаций.

В четвертом разделе представлены результаты теоретических исследований объемного напряженно-деформированного состояния (НДС) крупноразмерных сжатых железобетонных элементов с косвенным армированием, в том числе вследствие неоднородной по объему массивной конструкции усадки бетона, а также деформаций ригеля крупноразмерного рамного фундамента под турбоагрегат энергоблока ТЭС при неравномерном нагреве.

Ключевые слова: бетон тяжелый, трехосное сжатие, сложные режимы нагружения, прочность, деформации, критерии прочности, модель деформирования, конструкции, напряженно-деформированное состояние.

ABSTRACT

Nedorezov Andrey. **Deformation and strength of reinforced concrete elements in complex modes of bulk stress state.** – Manuscript.

Thesis submitted for the scientific degree of Candidate of Technical Science in specialty 05.23.01 – Building constructions, buildings and structures. – Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka, 2018.

The thesis is devoted to experimental and theoretical studies of the regularities of deformation and fracture of heavy cement concretes, including high-strength ones, under complex modes of uniaxial (triaxial) compression and evaluation of the stress-strain state of elements of reinforced concrete structures of buildings and engineering structures under power and temperature-humidity influences.

In the introduction, the relevance of the research topic is substantiated, the purpose, objectives of research, scientific novelty, practical significance of the results of the work, its connection with government programs are formulated.

The first section analyzes the state of the question. The methods of experimental studies of deformations and strength of heavy concrete under conditions of single-, double- and triaxial loading are compared, as well as strength criteria and deformation models for concretes under non-uniform stressed states.

The second section presents the compositions of the studied concretes, the characteristics of prototypes, outlines the methods of conducting experimental and theoretical studies, methods for processing the results obtained.

The third section presents the results of experimental studies of the deformation and determination of the density of concrete, including high-strength, under various compression modes, suggestions for refining the calculated models of concrete deformation in terms of the determination of elastic-plastic and pseudoplastic deformations.

The fourth section presents the results of theoretical studies of the volumetric stress-strain state (VSS) of large-sized compressed reinforced concrete elements with indirect reinforcement, including due to the massive shrinkage of concrete heterogeneous in volume, as well as deformations of the large-size frame foundation for the TES power unit with uneven heating.

Keywords: heavy concrete, triaxial compression, complex loading modes, strength, deformation, strength criteria, model of deformation, construction, stress-strain state.