

На правах рукописи

Поварницын Дмитрий Анатольевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ, НЕСУЩЕЙ
СПОСОБНОСТИ И ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность: 05.13.18 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2007

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Пермский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Кашеварова Галина Геннадьевна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор, лауреат государственной премии СССР, заслуженный деятель науки РФ
Победря Борис Ефимович

доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ
Масленников Александр Матвеевич

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

Защита диссертации состоится «31» мая 2007 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета К 212.223.01 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4. Ауд. 505-А.
Факс: (812) 316-58-72.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Автореферат разослан «27» апреля 2007 г.

Учённый секретарь диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент



Фролькис В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Методы математического моделирования с применением численных методов современных ЭВМ и вычислительных комплексов в настоящее время являются наиболее целесообразным, а во многих случаях – единственно возможным научным инструментом при проектировании новых и реконструкции уже существующих зданий и сооружений.

На современном этапе в строительном проектировании происходит переход от основополагающего критерия несущей способности конструкций к критерию *безопасности* строительных объектов для людей и окружающей среды на протяжении всего срока службы. Обеспечение безаварийной эксплуатации существующих зданий и сооружений предполагает умение прогнозировать их поведение при изменении условий эксплуатации и в аварийных ситуациях при частичной потере несущей способности, а для этого требуются высокопроизводительные вычислительные комплексы.

В проектных организациях строительного профиля, как правило, используются сертифицированные Госстроем РФ программные комплексы (ПК): LIRA, SCAD, MicroFe и др., которые, в основном, предназначены для проектирования новых зданий и сооружений, а не для анализа поведения существующих объектов с дефектами и трещинами при изменении условий их эксплуатации.

Сложность моделирования строительных объектов для выполнения качественного расчёта и анализа с целью определения резервов несущей способности при наличии дефектов, или для выявления участков конструкции, в которых возможно появление и развитие трещин, требует работы с так называемыми «тяжёлыми» расчётными системами, примером которых является программный комплекс ANSYS – один из самых мощных современных программных продуктов, позволяющих выполнять полноценный анализ проектных разработок новых и реконструируемых зданий. ANSYS позволяет проводить сложные нелинейные расчёты, учитывать все особенности строительных конструкций, в том числе, наличие и развитие системы трещин или ухудшение свойств материалов, взаимодействие здания с грунтовым массивом, влияние времени и поэтапное изменение внешних нагрузок. Это даёт возможность специалисту получать наиболее достоверные результаты расчёта при проведении вычислительных экспериментов, существенно сокращая сроки и финансовые потери на производство работ.

Процесс моделирования здания или сооружения в интерактивном режиме в расчётных системах, в том числе и в ANSYS является достаточно трудоёмким и сложным, ввиду отсутствия специализированных инструментов и ограниченного набора примитивов и операций, с помощью которых можно формировать модели зданий. Кроме того, требуются большие затраты времени и ресурсы для подготовки специалиста, умеющего работать в ПК ANSYS.

Поэтому для моделирования геометрии трёхмерных строительных объектов часто используют современные системы автоматизированного проектирования (САПР): AutoCAD, ArchiCAD, КОМПАС и др. Эти системы

позволяют быстро формировать несущие и ограждающие конструкции, проёмы в стенах, перекрытия, каркас и сложные формы отдельных частей здания, но не позволяют создавать расчётные схемы и корректно импортировать созданные модели в расчётные системы. В итоге, способ импорта готовой модели в расчётную систему не получил широкого распространения и на некоторых стадиях такой способ оказывается сложнее, чем создание расчётной модели средствами самой расчётной системы.

Проблема снижения трудоёмкости работ при проведении вычислительных экспериментов становится весьма актуальной при расчётах сложных строительных объектов. Это побуждает совершенствовать вычислительную технологию и искать новые алгоритмы расчёта зданий и сооружений. Определению путей решения этой проблемы посвящена данная диссертационная работа.

Целью диссертационной работы является создание новой вычислительной технологии для реализации численных методов и эффективных алгоритмов исследования несущей способности и процессов разрушения зданий, сооружений и строительных конструкций с учётом нелинейного поведения и разброса свойств материалов, в виде проблемно ориентированных программ для проведения вычислительных экспериментов.

Задачи исследования:

1. провести анализ существующих подходов к исследованию проблемы безопасности строительных объектов, к моделированию геометрии и свойств материалов для исследования несущей способности и процессов разрушения строительных конструкций и обосновать метод и средство для решения этих задач;
2. разработать эффективный алгоритм формирования геометрической и расчётной моделей пространственных строительных объектов в ПК ANSYS;
3. провести анализ формирования программных кодов на языке APDL, встроенном в ПК ANSYS для моделирования строительных объектов различного назначения, с применением разных видов строительных материалов и всевозможных подходов к формированию модели;
4. разработать новый вычислительный алгоритм от формирования геометрической и расчётной моделей строительных объектов, автоматизированного создания программного кода (программы) на языке APDL до передачи программы в ПК ANSYS, проведения расчёта и анализа результатов;
5. разработать алгоритм учёта разброса механических свойств строительных материалов и реализовать его в программном интерфейсе.
6. провести сравнительный анализ численных и натурных экспериментов для определения достоверности результатов, полученных с использованием новой вычислительной технологии в ПК ANSYS;
7. применить разработанную вычислительную технологию к расчётам реальных строительных объектов, в том числе, с трещинами и дефектами.

Научная новизна работы состоит:

- в развитии методологии создания математического и программного обеспечения, а именно в создании новой вычислительной технологии для исследования процессов деформирования и разрушения зданий и сооружений, с целью определения резервов их несущей способности при накоплении структурных повреждений;

- в создании проблемно-ориентированной программы для проведения вычислительных экспериментов, способной в автоматизированном режиме формировать *программный код* (на языке APDL) создания геометрической и расчётной модели специализированными инструментами для исследования деформирования и разрушения пространственных сооружений в ПК ANSYS на заданные внешние воздействия;

- в разработке алгоритма учёта разброса механических свойств строительных материалов, реализации его в созданной программе AnSysBuildingBlock (ASBB) и определении области применения данного алгоритма.

Практическая значимость работы. Разработанная в диссертации проблемно-ориентированная программа автоматизации формирования программного кода (на языке APDL) позволяет существенно уменьшить трудозатраты и временные ресурсы на выполнение инженерных расчётов оценки несущей способности и исследование процессов разрушения строительных конструкций и сократить сроки подготовки специалистов к работе с ПК ANSYS.

Работа поддержана грантом РФФИ-Урал №04-01-96067, в котором проект «Принципы и методы экспертных оценок безопасности повреждённых строительных конструкций на основе прогнозирования аварийных ситуаций и анализа деформационных ресурсов структурно-неоднородных материалов» направлен на решение фундаментальной задачи «Развитие научных основ уточнённого прочностного анализа, включающего оценку безопасности, ответственных конструкций на основе комплексного анализа факторов, влияющих на характер процессов развития дефектов и определяющих живучесть систем; создание аналитической информационной системы экспертных оценок аварийности повреждённых строительных конструкций».

Методы исследования, достоверность полученных результатов. В работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследования. Решения задач базируются на известных теоретических положениях механики деформированного твёрдого тела и вытекающих из них формулировках математических моделей и подтверждаются сходимостью полученных теоретических результатов с данными экспериментов. Методика теоретического исследования несущей способности реального строительного объекта с использованием разработанной в диссертационной работе программы передана в строительную отрасль для практического использования, что подтверждено актом внедрения, приложенным к диссертации. Достоверность новизны разработанной проблемно-ориентированной программы подтверждена

свидетельством об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007610746 Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: XXX юбилейной научной конференции, (г. Пермь, 2003 г.), студенческой научно-технической конференции «Компьютерная механика материалов и конструкций» (ПГТУ, г. Пермь, 2003 г.), 6-й Всероссийской (с международным участием) конференции «Информация, инновации, инвестиции» (г. Пермь, 2005 г.), 14-ой и 15-ой международных зимних школах по механике сплошных сред (УрО РАН, г. Пермь, 2005, 2007 гг.), международной научно-технической конференции «Вычислительная механика деформируемого твёрдого тела» (МИИТ, г. Москва, 2006 г.), 7-й Всероссийской конференции «Информация, инновация, инвестиции» (г. Пермь, 2006 г.), научной сессии «Взаимосвязь проектирования пространственных конструкций с вопросами безопасности, эксплуатационной надёжности и долговечности» (г. Москва, 2007 г.). В 2006 году в конкурсе на лучший научный доклад аспиранта по техническим наукам автор занял I и III место в первом и во втором турах конкурса соответственно (г. Пермь, 2006 г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 12 печатных работах, в том числе 2 в журнале, рекомендованном ВАК.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, выводов по каждой главе, основных заключений, списка литературы (94 наименования), 2 приложений, 101 рисунка и 11 таблиц. Общий объём диссертации – 166 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, указана цель и основные задачи исследований, их научная и практическая значимость, приведено краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе обсуждаются: актуальность проблемы безопасности строительных объектов и существующих подходов к исследованию несущей способности и процессов разрушения строительных конструкций.

В настоящее время многие исследователи обращаются к *проблеме безопасности* зданий и сооружений и предлагают разные подходы к её решению: с помощью конструктивных решений здания, способов воздействия на основание сооружения, позволяющих осуществлять регулирование текущего состояния здания и основания и более гибко приспосабливать их к изменяющимся условиям внешних воздействий с учётом реального физического состояния конструкций. Однако в этих работах основное внимание уделяется *качественной* стороне проблемы, чаще всего – без детального количественного анализа, что подразумевает под собой более точное моделирование геометрии зданий и сооружений и свойств их материалов. Строительные нормы и правила при выборе расчётной схемы сооружения рекомендуют учитывать наиболее существенные факторы, определяющие напряжённое состояние и деформации основания и конструкций сооружения, пространственную работу конструкций,

геометрическую и физическую нелинейность, анизотропию, пластические и реологические свойства материалов и грунтов, но не содержат практических предложений по решению данной проблемы.

При разных воздействиях на строительные объекты, не предусмотренных первоначальным проектом, или в аварийных ситуациях при наличии в конструкциях трещин и дефектов, требуется наиболее точное моделирование геометрии и свойств материалов с учётом накопления повреждений и структурного разрушения, способности повреждённых материалов воспринимать внешнюю нагрузку. Проведение таких исследований становится возможным при использовании методов математического моделирования с использованием численных методов и высокопроизводительных программных комплексов, реализующих их на ЭВМ.

Анализ механических свойств строительных материалов (бетона/железобетона, кирпичной кладки, грунта) показал, что эти материалы могут обладать свойствами упругости, хрупкости, пластичности и ползучести, которые по-разному проявляются на разных этапах работы конструкций при разных внешних воздействиях. В работе рассмотрены предлагаемые разными авторами модели механического поведения и разрушения строительных материалов, которые не могут считаться законченными, и продолжают развиваться в новейших исследованиях.

При обзоре методов расчёта несущей способности строительных конструкций и объектов в целом в качестве основного метода исследования в данной работе выбран метод конечных элементов (МКЭ), который снабжён всеми атрибутами «серьёзной теории», основанной на применении абстрактной математики и теории сплошных сред, а в качестве основного инструмента исследований – программный комплекс ANSYS, с помощью которого можно создавать компьютерные модели большой размерности и исследовать отклики воздействий различной физической природы.

Геометрию модели строительного объекта в ПК ANSYS можно создавать 3-мя различными способами, но ни один из них не является простым в своём решении. Это послужило толчком к совершенствованию вычислительной технологии и к разработке нового алгоритма формирования геометрической и расчётной модели, который был бы наиболее простым, эффективным по сравнению с существующими способами и подходами и созданию проблемно ориентированной программы прочностного анализа зданий и сооружений.

Во **второй главе** описываются разработанные алгоритм и проблемно-ориентированная программа **AnSysBuildingBlock (ASBB)** для эффективного проведения вычислительных экспериментов по исследованию несущей способности и процессов разрушения строительных конструкций. Дается описание и принцип работы программы, предназначенной для эффективной автоматизации процесса создания программного кода на языке параметрического моделирования APDL, встроенного в ПК ANSYS.

Процесс работы с программой ASBB состоит из 3 этапов:

1 этап. Формирование геометрической модели здания или сооружения. На данном этапе в поэтажном порядке создаётся геометрическая и расчётная модели строительного объекта.

Вначале пользователь должен ввести все необходимые данные для формирования модели: количество этажей и параметры каждого этажа, названия и физические свойства материалов, ввести общие настройки модели. Далее создаются вспомогательные объекты – координационные оси и характерные точки. К ним в дальнейшем привязывают вновь создаваемые строительные объекты (стены, проёмы, колонны, балки, перекрытия, произвольные блоки) (рис. 1). И в завершение к созданным объектам прикладываются внешние воздействия и условия закрепления.

2 этап. Автоматическая генерация программного кода по созданной модели. На этом этапе участие пользователя сведено к минимуму. Программа полностью автоматически создаёт программный код на языке APDL для ПК ANSYS. Созданный код можно сохранить или дополнительно отредактировать (рис. 2).

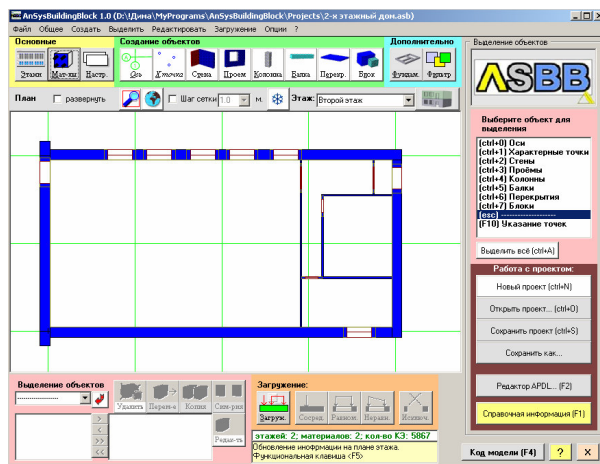


Рис. 1. Геометрическая модель здания

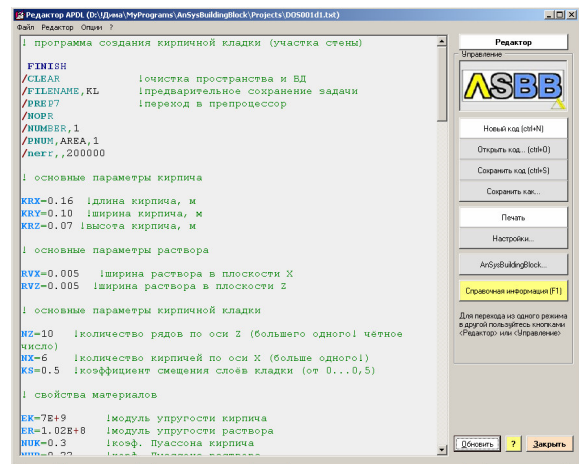


Рис. 2. Программный код геометрической и расчётной моделей строительного объекта

3 этап. Выполнение расчёта и анализ результатов. На этом этапе используется ПК ANSYS. В программный комплекс ANSYS импортируется полученный в ASBB программный код. После этого в ANSYS автоматически создаётся трёхмерная расчётная модель здания или сооружения, генерируется сетка конечных элементов, учитываются граничные условия и задаются нагрузки. Согласно командам программного кода, выполняется расчёт модели. По результатам расчёта можно проводить тщательный анализ.

Далее в главе описана область применения программы. Подробно описан алгоритм создания программного кода модели строительного объекта.

Разброс свойств материалов конструкций, реализующийся даже при абсолютно точном выполнении всех технических требований, является основным источником возможных отклонений расчётных параметров конструкций строительных объектов, и обычно учитывается в СНИПах системой нормируемых коэффициентов надёжности. В отличие от других программных комплексов и

прикладных систем для расчёта строительных конструкций, программа ASBB имеет встроенную функцию учёта разброса механических свойств материалов. Описан алгоритм учёта разброса свойств (модуля упругости, коэффициента Пуассона, плотности), который позволяет пользователю, используя генератор случайных чисел и коэффициент вариации, генерировать новые материалы по всему объёму строительной конструкции, имитируя разброс механических свойств материала.

Проблема качественного экспорта геометрических моделей из расчётных комплексов в чертёжно-графические системы, побудила автора создать в программе ASBB дополнительную функцию качественного экспорта в универсальную чертёжно-графическую систему КОМПАС. А используя возможности САПР КОМПАС по интеграции с разными форматами данных (CDW, FRW, KSF, IGES, DWG, DXF, eDrawing, векторные и растровые рисунки многих форматов), экспортированные графические данные можно передавать и в другие наиболее удобные для работы САПР.

Применение программы ASBB при прочностных расчётах как нового способа или новой вычислительной технологии расчёта строительных объектов с помощью ПК ANSYS требует разработки алгоритма действий пользователя программы ASBB. Этот алгоритм подробно описан в данной главе, и своим принципом он напоминает процесс возведения здания на строительной площадке. На конкретном примере показана реализация алгоритма создания геометрической модели здания в программе ASBB.

В конце главы проведён анализ эффективности использования программы ASBB по сравнению с другими способами: 1, – интерактивным вводом данных непосредственно в ПК ANSYS; 2, – импортом геометрической модели из графических систем, поддерживающих твёрдотельное моделирование (AutoCAD, ArchiCAD, 3D Studio Max, КОМПАС-3D и др.) с последующим интерактивным вводом данных для расчётной модели: граничных условий, нагрузок и воздействий, физико-механических свойств материалов, формированием сетки конечных элементов; 3, – использованием языка параметрического проектирования APDL для написания программы пользователем, по результатам которых, можно отметить существенные преимущества новой вычислительной технологии по затратам времени: на выполнение расчёта (рис. 3) и на подготовку пользователя (рис. 4).

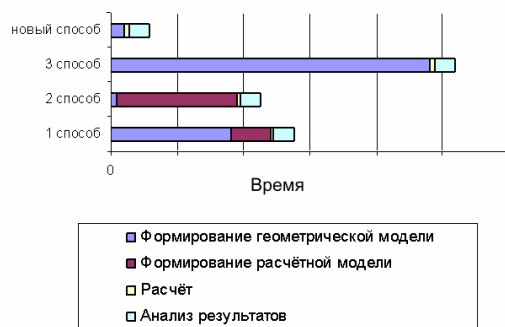


Рис. 3. Диаграмма относительных затрат времени пользователя при использовании разных способов расчёта

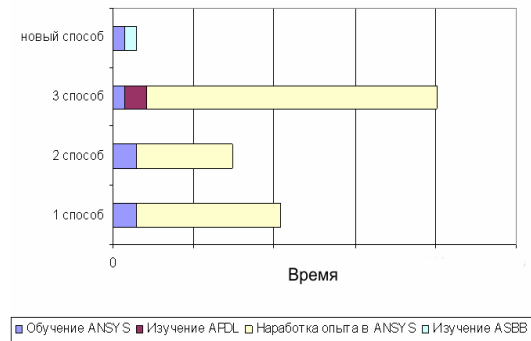


Рис. 4. Диаграмма относительных затрат времени на подготовку пользователя

Кроме того, преимущество использования программы ASBB имеет следующие положительные моменты:

- избавление пользователя от проблем стыковки конструкций и конечных элементов между собой, выбора типов КЭ, процесса создания конечно-элементной сетки, сложности задания граничных условий и приложения внешних нагрузок;
- реализация стандартного принципа формирования модели зданий или сооружений, как специализированное приложение для строительной области;
- возможность проведения нелинейного анализа, для разных моделей механического поведения строительных материалов;
- возможность моделирования трещин и изучение процесса их возникновения и развития в расчётной модели для оценки живучести (безопасности) строительных объектов;
- возможность учёта разброса физико-механических свойств материалов конструкций;
- исследование сложных математических моделей зданий совместно с фундаментом и грунтовым основанием за счёт прогрессивных функций, реализованных в ПК ANSYS.

Третья глава посвящена численному моделированию процессов деформирования и разрушения конструктивных элементов строительных объектов и проверке адекватности математических моделей объектов на основе данных натурных экспериментов.

В начале главы приводится анализ причин появления макроразрушений в строительных конструкциях зданий и сооружений, которыми чаще всего являются деформации грунтового основания сооружения и низкое качество монтажных работ.

Для конструкций, рассматриваемых в данной работе, определяющее значение при разрушении материалов имеет трещинообразование и поэтому при исследовании механического поведения бетона в данной работе используется математическая модель, ориентированная на описание упруго-хрупкого разрушения, разработанная *K.J. Willam* и *E.D. Warnke* и реализованная в конечно-элементном пакете ANSYS, а для кирпичной кладки - нелинейная математическая модель, разработанная в работе Г.Г. Кашеваровой, учитывающая процессы накопления упруго-хрупких повреждений и закритического деформирования в условиях сложного напряжённого состояния. Данная математическая модель встроена в разработанную программу ASBB.

Для того чтобы использовать эти математические модели в расчётах, нужны полные диаграммы деформирования материалов. Поэтому были проведены натурные эксперименты по разрушению образцов представительного объема кирпичной кладки. Одна из полученных диаграмм показана на рис. 5. Ниспадающая ветвь соответствует процессу, когда деформирование осуществляется преимущественно за счёт формирования и развития систем трещин и разрывов, которые начинают появляться при нагрузке, составляющей 60 – 70 %



Рис. 5. Полная диаграмма деформирования образца при сжатии

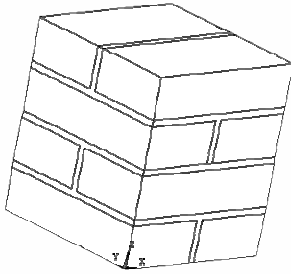


Рис. 6. Образец кирпичной кладки

от максимальной, но кладка сохраняет несущую способность ещё довольно длительное время.

Для оценки адекватности используемой математической модели выполнены численные эксперименты по разрушению образца представительного объема кирпичной кладки такого же, как в натурном эксперименте (рис. 6).

Математическая модель пространственной краевой задачи представлена системой дифференциальных уравнений равновесия $\sigma_{ij,j}(\vec{x}) + \rho(\vec{x})F_i = 0$, $\vec{x} \in V$, (1)

$$\text{Коши} \quad \epsilon_{ij}(\vec{x}) = \frac{1}{2}(u_{i,j}(\vec{x}) + u_{j,i}(\vec{x})), \quad \vec{x} \in V, \quad (2)$$

$$\text{определяющих соотношений} \quad \sigma_{ij}(\vec{x}) = C_{ijkl}(\vec{x})\epsilon_{kl}, \quad \vec{x} \in V \quad (3)$$

и краевых условий: по направлению оси z прикладывалось кинематическое воздействие в виде перемещения u_0 , а противоположная плоскость элемента закреплялась по этой же координате.

Здесь: \vec{x} – радиус-вектор пространственного положения частицы; ρ – плотность материала; ρF_i – компоненты вектора внешних массовых сил; u_i – компоненты вектора перемещения; C_{ijkl} – компоненты тензора модулей упругости, которые зависят от уровня деформации, направления, характера и наличия трещины (трещина открыта или закрыта) и определяются в соответствии с полной диаграммой деформирования.

Здесь и далее по умолчанию запятая означает частную производную по соответствующей координате x_i ; индексы при компонентах тензоров, набранные малыми латинскими буквами, принимают значения от 1 до 3. По повторяющемуся индексу (называемому немим индексом) предполагается суммирование также от 1 до 3.

Задача решалась методом конечных элементов с использованием пошаговой процедуры. При проведении численного эксперимента на каждом шаге нагружения определялся процент разрушенных элементов в образце. Полученная расчётная диаграмма деформирования образца достаточно хорошо согласуется с диаграммой, полученной в натурном эксперименте (рис. 5). Некоторое отличие значений максимального напряжения и длины ниспадающей ветви в вычислительном эксперименте от значений, полученных в натурном эксперименте можно объяснить разбросом свойств кирпича и раствора и отсутствием трения на поверхностях в численном эксперименте.

Далее представлены результаты натурного и вычислительного экспериментов деформирования и разрушения фрагмента кирпичной стены,

подвергнутой изгибу, т.е. такому воздействию, которое испытывают стены зданий при осадке части грунта. Расчёты выполнялись для трёх сеток конечных элементов с числом степеней свободы 240, 684 и 2442 соответственно. В процессе кинематического нагружения (осадки части стены) при достижении определенного уровня напряженно-деформированного состояния (НДС) в стене появлялась трещина, в результате чего картина НДС существенно изменялась, максимальные напряжения уменьшались примерно в 2 раза, и за счёт локальной диссипации упругой энергии в зоне трещины происходила разгрузка и перераспределение напряжений. При дальнейшем повышении нагрузки напряжения увеличивались, и росла длина трещины (рис. 7).

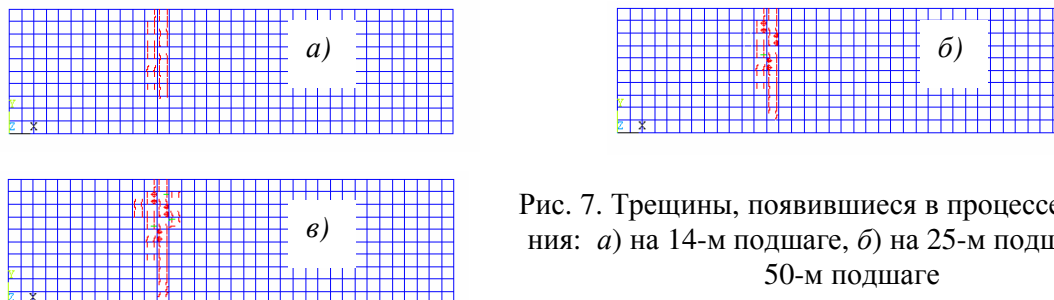


Рис. 7. Трещины, появившиеся в процессе нагружения: а) на 14-м подшаге, б) на 25-м подшаге, в) на 50-м подшаге

Результаты численного эксперимента, моделирующего изгиб фрагмента кирпичной стены и учитывающего накопление структурных повреждений и закритической стадии, соответствующей ниспадающей ветви полной диаграммы деформирования, подтверждены результатами натурного эксперимента.

Кроме того, исследовалось влияние *разного вида кладки и разных свойств материалов* на НДС и процесс разрушения того же фрагмента стены.

Оценка безопасности несущей конструкции предполагает определение резерва несущей способности в условиях развития системы магистральных трещин. Полученные новые численные решения краевых задач для тел с зонами разупрочнения наглядно иллюстрируют, что учёт стадии закритического деформирования в уточнённых расчётах позволяет обнаружить резерв несущей способности за счёт локальной диссипации упругой энергии, оценить живучесть при частичной потере несущей способности. Использование резервов несущей способности структурно-неоднородных материалов и обеспечение безопасной эксплуатации элементов строительных конструкций может осуществляться путём создания специальных условий равновесного накопления повреждений и разупрочнения материала в наиболее опасных зонах, что обеспечивает устойчивое, контролируемое протекание процесса трещинообразования даже в аварийных ситуациях. В этом случае есть время для проведения защитных и спасательных мероприятий.

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 «При проектировании строительных сооружений и конструкций в явной или неявной форме должен учитываться *статистический разброс механических свойств материалов*, элементов и соединений, а также изменчивость (во времени и в пространстве) параметров, характеризующих внешние нагрузки и воздействия». Для исследования влияния разброса механических свойств материала на процесс разрушения

кирпичной диафрагмы был проведён вычислительный эксперимент, в котором рассматривался фрагмент кирпичной стены (диафрагма), испытывающий двухосное напряжённое состояние (рис. 8). При этом использовался разработанный алгоритм учёта разброса механических свойств материала в конструкциях, встроенный в программу ASBB.

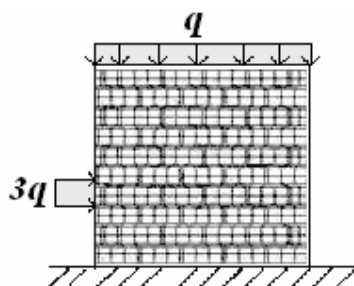


Рис. 8. Фрагмент кирпичной стены, испытывающий двухосное напряжённое состояние

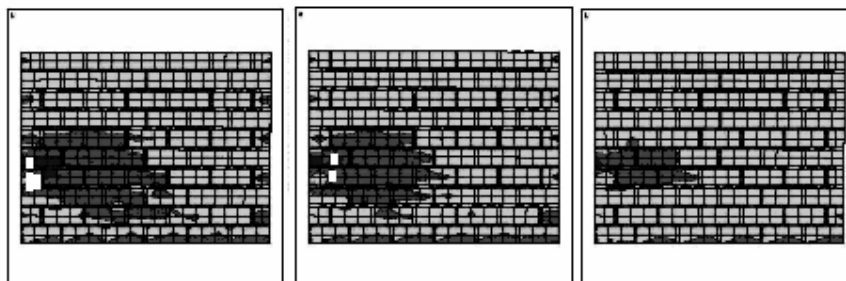


Рис. 9. Картина распределения напряжений по оси X и развития системы трещин: с применением функции разброса свойств – три варианта результатов

Как показали результаты расчёта при учёте разброса механических свойств раствора кирпичной кладки (в частности, модуля упругости) в пределах $V_{\max} = 30\%$ картина напряжений (рис. 9) и значения напряжений и деформаций заметно изменяются, что в свою очередь влияет на развитие системы трещин в конструкции при одних и тех же критических напряжениях: трещины могут более активно распространяться по конструкции, либо вообще могут не появляться.

Расчётная модель (рис. 8) и результаты расчёта соответствуют и адекватны одной из моделей натурного эксперимента, проведённого австралийскими исследованиями.

В конце главы приведён сравнительный анализ результатов расчёта, полученных в разных программных комплексах SCAD, Lira и ANSYS. Сравнение проводилось на нескольких задачах, как плоских, так и пространственных и показало, что результаты, полученные в ПК SCAD и Лира, практически совпадают – разница по перемещениям в ПК SCAD/Lira и ANSYS не превышает 10%, а по напряжениям в некоторых случаях может достигать до 20-25%.

В **четвертой главе** рассматривается численная реализация разработанной программы для исследования НДС, повреждённости и резервов несущей способности реальных строительных объектов.

На примере типового пятиэтажного кирпичного здания проведено множество численных экспериментов по исследованию влияния разных видов кинематических воздействий (осадок) на НДС кирпичного здания и определён наиболее опасный вид таких воздействий, когда проседает только торцевая часть здания по линейному или нелинейному закону.

С помощью программы ASBB была смоделирована пространственная система «здание-фундамент-основание» (рис. 10), исследовалась практическая сходимость численного решения на трёх вариантах сетки конечных элементов и данная модель использовалась для ретроспективного анализа разрушения

реального кирпичного здания, которое получило серьёзные повреждения в виде системы трещин на несущих и торцевых стенах здания в результате неправильной эксплуатации – протечке воды в локальной зоне и соответствующем изменении свойств грунта.

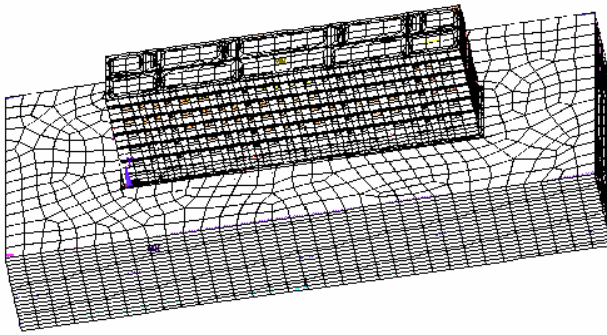


Рис. 10. Конечно-элементная модель системы "здание-фундамент-основание"

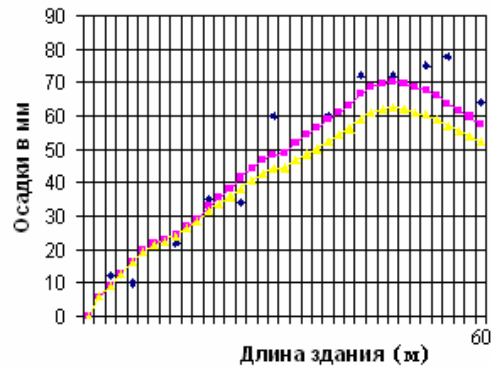


Рис. 11. Сравнение расчётных и фактических осадок здания
 × - фактические осадки; ■ – теоретические осадки (гр. усл. 1); ▲ - теоретические осадки (гр. усл. 2)

При описании свойств грунта с учётом локального замачивания сделано предположение, что каждая зона по глубине имеет форму *гиперболического параболоида* $z = x^2/a^2 - y^2/b^2$, и основание было смоделировано с учётом этой закономерности. При этом рассматривались 2 варианта граничных условий: 1) жёстко закреплена только нижняя поверхность грунта; 2) закреплены нижняя поверхность грунта и боковые поверхности массива от возможных перемещений по ортогональным направлениям.

Анализ показал достаточно близкие результаты расчётных и фактических осадок (рис. 11) и схем распространения трещин в несущих стенах здания, качественно повторяющих фактические, что свидетельствует о достоверности результатов численных исследований при использовании программы ASBB и ПК ANSYS.

Далее проводились *исследования влияния уже существующих трещин*, способов их моделирования, размеров и расположения на напряжённо-деформированное состояние отдельного кирпича и здания в целом.

Рассмотрены разные способы моделирования трещин в строительных конструкциях. В этом исследовании было определено, что поперечная трещина в кирпиче является наиболее опасной и приводит к снижению несущей способности на 25-40% в зависимости от длины трещины.

Следующий объект – реальное 2-х этажное административное кирпичное здание (здание школы РОСТО), которое планировалось реконструировать, надстроив ещё один этаж. Результаты обследования показали наличие трещин на одном из фасадов здания (рис. 12). С помощью программы ASBB было смоделировано здание и проведены вычислительные эксперименты: а) по выявлению причин возникновения трещин; б) возможности надстройки одного этажа.

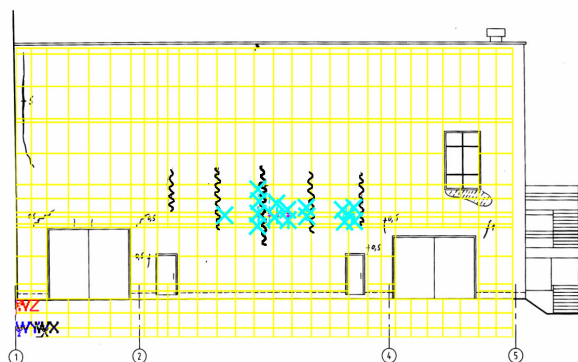


Рис. 12. Фасад здания. Дефекты и повреждения: } - трещины выявленные при обследовании, X - трещины определённые при расчёте модели.

Причинами появления трещин могли быть ошибки при проектировании (заниженные значения действующих нагрузок) или при эксплуатации (превышение эксплуатационных нагрузок над расчётными), в результате чего произошёл изгиб перегруженных колонн (рис. 13) с соответствующей концентрацией напряжений в месте стыка плит перекрытий с несущей стеной (рис. 14), вызвавшее появление системы трещин на фасаде здания (рис. 12).



Рис. 13. Деформация колонн (масштаб деформации увеличен в 50 раз)

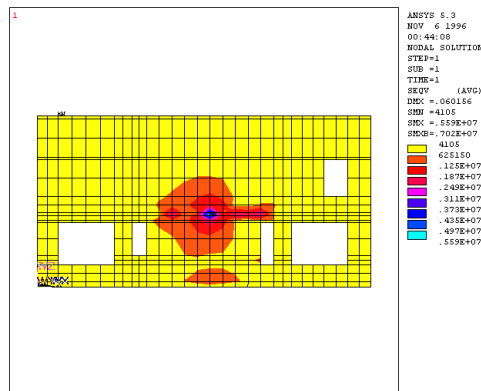


Рис. 14. Концентрация напряжений на фасаде здания (напряжения по Мизесу)

Исследуя возможности реконструирования здания, выполнены численные эксперименты для здания без трещины и с трещиной с учётом дополнительной нагрузки, которые показали, что в здании с трещиной максимальные напряжения примерно в 2 раза меньше чем в здании без трещины, за счёт перераспределения напряжений. Но для удовлетворения эксплуатационных требований эти трещины должны быть ликвидированы, а несущие колонны усилены с учётом действующих нагрузок.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Для исследования несущей способности, деформирования и разрушения пространственных сооружений на заданные внешние воздействия с помощью программного комплекса ANSYS, автором создана проблемно-

ориентированная программа **AnSysBuildingBlock** (сокращённо **ASBB**), которая автоматизирует процесс создания программного кода на языке APDL, встроенном в ANSYS. Эта программа представляет собой *новую вычислительную технологию* автоматизации расчёта объектов строительства, алгоритм которой включает в себя три основных этапа: формирование геометрической модели здания или сооружения, автоматическую генерацию программного кода на языке параметрического проектирования APDL и выполнение расчёта непосредственно в ПК ANSYS

2. Разработан алгоритм учёта разброса механических свойств материалов строительных конструкций, встроенный в программу ASBB, как дополнительная опция данной программы.

3. Решена проблема интеграции расчётных и чертёжно-графических систем, а именно, корректная передача графической части из расчётной системы в любую САПР с помощью встроенной в ASBB функции экспорта в САПР КОМПАС.

4. В программу ASBB встроена математическая модель механического поведения материала, учитывающая накопление повреждений и структурное разрушение кирпичной кладки, которая в дальнейшем использовалась для исследования несущей способности конструкций, а именно: процесса деформирования и разрушения кирпичной стены при изгибе, процесса разрушения кирпичной диафрагмы, испытывающей двухосное напряжённое состояние с учётом разброса механических свойств материала. Для оценки адекватности используемой математической модели выполнены численные и натурные эксперименты по разрушению образца представительного объема кирпичной кладки.

5. На основе разработанной программы и ПК ANSYS проведены вычислительные эксперименты с использованием нового способа формирования модели и соответствующие им натурные эксперименты, выполнена верификация разработанных алгоритмов и программ.

6. Проведён сравнительный анализ результатов расчёта, полученных в разных программных комплексах SCAD, Lira и ANSYS для плоских и пространственных задач, показавший несущественную разницу результатов по перемещениям и значительную разницу (до 25%) по напряжениям.

7. На примерах моделирования реальных строительных объектов установлена возможность решения пространственных задач, позволяя выявить причины появления трещин и дефектов в несущих конструкциях зданий и сооружений при различных внешних воздействиях.

8. Разработанная автором новая вычислительная технология была использована при реализации реального проекта реконструкции здания школы РОСТО в организации ЗАО «ЭРОН», что подтверждено имеющимся в диссертации актом внедрения. Применение разработанной программы позволило существенно сократить временные и финансовые затраты на производство работ.

9. На программу AnSysBuildingBlock получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2007610746 из Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.

ПУБЛИКАЦИИ

1. *Кашеварова Г.Г., Маковецкий О.А., Поварницын Д.А.* Математическое и компьютерное моделирование поведения системы «здание-фундамент-основание» на деформирующемся грунтовом основании [статья] // Сборник трудов «Основания и фундаменты в инженерно-геологических условиях Урала» – Пермь: ПГТУ, 2003 – с. 103-106.
2. *Кашеварова Г.Г., Поварницын Д.А.* Исследование напряжённо-деформированного состояния несущих стен кирпичного здания с использованием программного комплекса ANSYS» [тезис] // «Проектирование, строительство, реконструкция» XXX юбилейная научно-техническая конференция. Тезисы докладов. – Пермь: ПГТУ, 2003 – с. 58-59.
3. *Поварницын Д.А., Кашеварова Г.Г.* Исследование НДС несущих стен кирпичного здания с помощью программного комплекса ANSYS» [тезис] // Тезисы доклада студенческой научно-технической конференции «Компьютерная механика материалов и конструкций». – Пермь: ПГТУ, 2003 – с. 48-49.
4. *Труфанов Н.А. Кашеварова Г.Г., Поварницын Д.А.* Исследование влияния размеров упругого слоя грунтового основания на НДС здания в системе «здание-фундамент-основание» [статья] // Сборник научных трудов «строительство и образование» №11(41), Вып.7. - Вестник УГТУ-УПИ, - Екатеринбург, 2004 – с. 89-91.
5. *Кашеварова Г.Г., Поварницын Д.А. Зубов Д.А., Петров. А.А.* Исследование напряжённо-деформированного состояния кирпича с дефектами [статья] // Сборник научных трудов «Проектирование строительство реконструкция», – Пермь: ПГТУ, 2004 – с. 105-108.
6. *Вильдеман В.Э., Кашеварова Г.Г., Поварницын Д.А.* Вопросы оценки безопасности повреждённых строительных конструкций и анализ влияния нагружающих систем [статья] // Материалы 6-й Всероссийской (с международным участием) конференции «Информация, инновации, инвестиции», Том 1. – Пермь, 2005 – с. 103-109.
7. *Кашеварова Г.Г., Поварницын Д.А.* Анализ процесса разрушения и деформационных ресурсов структурно-неоднородных строительных материалов [тезис] // Тезисы доклада на Международной зимней школе по механике сплошных сред, – Пермь, 2005 – с. 123-125.
8. *Вильдеман В.Э., Кашеварова Г.Г., Поварницын Д.А.* Вопросы оценки безопасности строительных конструкций на основе моделирования процессов неупругого деформирования и разрушения материалов в системе «здание фундамент-основание» [тезис] // Сборник научных трудов международной научно-технической конференции «Вычислительная механика деформируемого твердого тела», – Москва: МИИТ, 2006 – с. 102-105.
9. *Кашеварова. Г.Г, Поварницын Д.А.* Сравнительный анализ применения разных программных комплексов для расчёта строительных конструкций [статья] // Сборник трудов Вестник УГТУ-УПИ. Строительство и образование. №12(83), – Екатеринбург, 2006 – с. 112-114.
10. *Поварницын Д.А.* Реализация вычислительной технологии создания программного кода для расчёта несущей способности пространственных

сооружений в программном комплексе ANSYS [статья] // Зимняя школа по механике сплошных сред (пятнадцатая). Сборник статей. Часть 3, – Пермь, 2007 – с. 93-96.

11. *Поварницын Д.А., Кашеварова Г.Г.* Совершенствование вычислительной технологии исследования деформирования и разрушения пространственных строительных объектов [статья] // Материалы 7-ой всероссийской конференции, –Пермь, 2006 – с. 91-97.

12. *Поварницын Д.А., Кашеварова Г.Г.* Новая вычислительная технология создания программного кода для расчёта несущей способности пространственных сооружений в программном комплексе ANSYS [тезис] // Тезисы докладов научной сессии. Взаимосвязь проектирования пространственных конструкций с вопросами безопасности, эксплуатационной надёжности и долговечности, – Москва, 2007 – с. 37-38.