

На правах рукописи

ПАВЛОВ АНДРЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ
КОНСТРУКЦИЙ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Специальность 05.13.18 –
математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2011

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Московском государственном строительном университете.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Белостоцкий Александр Михайлович

Официальные
оппоненты: доктор технических наук, профессор
Мкртычев Олег Варганович

кандидат технических наук, доцент
Кузнецов Сергей Федорович

Ведущая организация: **ОАО «НИЦ «Строительство» –
«Центральный научно-
исследовательский институт
строительных конструкций
им. В.А. Кучеренко»,
г. Москва**

Защита диссертации состоится «4» октября 2011 г. в 15.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.138.12 при ГОУ ВПО Московском государственном строительном университете по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, ауд. 420 УЛК.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО Московского государственного строительного университета.

Автореферат разослан «___» _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Анохин Н.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Задача адекватного численного моделирования процессов деформирования и разрушения тяжело нагруженных конструкций большепролетных сооружений с учетом значимых эффектов нелинейностей в статической и динамической постановках является актуальным вопросом в современной теории и практике расчетов. Недавние печально известные примеры обрушения конструкций покрытий СОК «Трансвааль-парк» и здания Басманного рынка, локального разрушения узла ККЦ «Крылатское» и др. – подтверждение этого положения.

Большинство используемых расчетных методик представляют собой квинтэссенцию инженерных подходов, ограничивающихся областями статических расчетов и учитывающих возникновение динамических эффектов через введение полуэмпирических коэффициентов.

Исходя из современных вычислительных возможностей, наиболее эффективным подходом к решению данной комплексной задачи становится метод конечных элементов с прямым интегрированием по времени нелинейных (включая эффекты физической, геометрической и конструктивной нелинейностей) уравнений динамики. При этом важным в методологическом и практическом смысле представляется разработка методики в рамках единого алгоритма, реализующей разномасштабную, с проявлением различных механизмов разрушения работу критических узлов и всей конструкции.

Разработка верифицированной методики и ее программной реализации, основанной на численном моделировании задач деформирования и разрушения конструкций большепролетных сооружений, позволит отечественным специалистам проводить полный анализ поведений конструкций, влияния деформативности и действительных схем работы узлов на работу всего сооружения в целом, оценить возможные сценарии процессов обрушения в результате локальных структурных изменений.

Цели и задачи работы. Целью работы являлась разработка, программная реализация и верификация методики комплексного расчета статических и динамических процессов деформирования и разрушения конструктивных узлов и обрушения большепролетных сооружений, основанной на едином алгоритме нелинейной динамики и позволяющей проводить решение результирующих сильно нелинейных задач в форме вычислительного эксперимента.

Исходя из поставленной цели работы, решались следующие задачи:

- Анализ результатов отечественных и зарубежных теоретических и экспериментальных исследований в данной области.
- Обоснованный выбор эффективного метода численного решения подобных задач.
- Разработка комплексной методики многоэтапного расчета задач деформирования и разрушения от локальных узлов к полной конструкции
- Разработка программного интерфейса к «базовому» программному комплексу с целью автоматизации проведения расчетов.

- Верификация разрабатываемой методики и реализующего программного обеспечения на основе сравнения результатов расчетов с результатами испытаний.
- Применение разработанной методики и реализующего программного обеспечения для моделирования реального процесса деформирования и обрушения большепролетного сооружения, с выявлением действительной работы и критической нагрузки разрушения узлов конструкций.

Методы и средства исследований. Методами и средствами исследований являются современные математические модели механики деформируемого твердого тела и численные методы решения задач нелинейной динамики конструкций во временной области.

Научная новизна:

- Разработана комплексная методика численного моделирования процессов деформирования и разрушения конструкций большепролетных сооружений в трехмерной динамической постановке с учетом значимых эффектов физической, геометрической и конструктивных нелинейностей.
- Разномасштабная и с проявлением различных механизмов разрушения работа «критических» узлов-элементов и всей конструкции реализована в рамках единого алгоритма нелинейной динамики на основе метода конечных элементов с явной схемой интегрирования по времени.
- Методика верифицирована на представительном наборе статических и динамических задач с развитыми эффектами физической, геометрической и конструктивной нелинейности.
- Методика использована для «ретроспективных» нелинейных динамических расчетов реальных конструктивных узлов и конструкции покрытия спортивно-оздоровительного комплекса «Трансвааль-парк». Подтвержден зафиксированный в 2004 г. сложный нелинейный характер деформирования и локального инициирующего разрушения конструктивных узлов и прогрессирующий характер обрушения всей системы.

Практическое значение.

- Разработанная методика численного моделирования позволяет решать практические задачи деформирования и разрушения тяжело нагруженных узлов-элементов и всей конструкции большепролетных сооружений на стадиях их проектирования, эксплуатации-мониторинга и экспертизы.
- Разработан проблемно-ориентированный для строительной области программный модуль Inter-DYN, автоматизирующий проведение вычислительных экспериментов с формированием полного программного кода для входного файла расчетного процессора ПК LS-DYNA и картин визуализации для постпроцессора.
- Решенные верификационные задачи можно использовать как основу для проведения верификации ПК LS-DYNA в системе Российской академии архитектуры и строительных наук.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

- использованием апробированного математического аппарата (математические модели механики деформируемого твердого тела) и численные методы решения задач нелинейной динамики конструкций во временной области;

- успешным решением представительного набора верификационных тестовых задач;
- согласованием получаемых результатов с результатами натурных замеров, сходными картинками разрушения конструкций.

Внедрение. Методика и программное обеспечение применяются в ГУП МНИИП Моспроект-4, Научно-образовательном центре компьютерного моделирования (НОЦ КМ) МГСУ и Научно-исследовательском центре «Ста-ДиО» для практических расчетов конструкций большепролетных сооружений.

Личный вклад соискателя. Все разработки и исследования, изложенные в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в диссертацию включен лишь тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю.

На защиту выносятся:

- Методология численного моделирования процессов деформирования и разрушения конструкций большепролетных сооружений с учетом значимых эффектов физической, геометрической и конструктивной нелинейностей во времени.

- Результаты представительной серии верификационных задач, решенных в обоснование достоверности и эффективности разработанной методики и базового программного обеспечения.

- Разработанный проблемно-ориентированный программный модуль для проведения вариантных вычислительных экспериментов, позволяющий в автоматизированном режиме формировать полный программный код для всех этапов расчета.

- Результаты исследования напряженно-деформированного состояния, устойчивости и механизмов разрушения наиболее нагруженных узлов и обрушения конструкций покрытия СОК «Трансвааль-парк» по разработанной методике.

Апробация научных положений, основных результатов выполненного исследования произведена в виде докладов на научно-технических конференциях и семинарах:

- Первая международная научно-практическая конференция «Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы», 2008 г.

- Третий Международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений». Новочеркасск, 21-24 июня 2010 г.

- IV Международная научно-практическая конференция «Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы». 2011 г.

Публикации. По тематике диссертации опубликовано семь работ, в том числе две работы в изданиях, включенных ВАК в перечень рекомендуемых.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав (с выводами по каждой главе), заключения, списка литературы. Общий объем диссертации – 178 страниц, 105 рисунков и 34 таблицы

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности работы, определены предметы, цели и задачи исследований, перечислены основные научные и практические результаты, приведено краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе приводится аналитический обзор современного состояния вопроса нелинейного деформирования и разрушения образцов и конструкций. В отечественной практике исследования проводили: И. И. Гольденблат, С. В. Ермаков, А. А. Ильюшин, Ю. И. Кадашевич, Д. А. Казаков, С. А. Капустин, И. Э. Келлер, В. А. Копнов, Е. Н. Морозов, В. В. Новожилов, Ю. Н. Работнов, А. Н. Сапрун, П. В. Трусков. Из иностранных ученых можно отметить Дж. Бишоп (J. F. W. Bishop), Б. М. Батчера (B. M. Butcher), Г. Р. Джонсона (G. R. Johnson), А. Л. Гурсона (A. L. Gurson), В. Х. Кука (W. H. Cook), Т. Линя (T. H. Lin), З. Мроза (Z. Mroz), Л. Прандтля (L. Prandtl), А. Рейсса (A. Reuss), Ф. Р. Тулера (F. R. Tuler), Р. Хилла (R. Hill)

Кратко описана история методов решения геометрически нелинейных задач на примере классических работ В. З. Власова, А. С. Вольмира, И. И. Гольденблата, А. Н. Крылова, С. Б. Косицына, А. И. Лурье, В. А. Постнова, А. В. Перельмутера, А. Р. Ржаницына, С. П. Тимошенко, С. И. Трушина, К. Бате (K. Bathe), Дж. Одена (J. T. Oden).

Приведен обзор алгоритмов численного решения контактных задач. Среди них можно выделить В. М. Александрова, М. В. Белого, Н. Г. Бураго, И. И. Ворovichа, В. Н. Кукуджанова, Л. А. Розина, Т. Бельчико (T. Belytschko), Р. Винтера (R. Winter), М. Нила (M. Neal), А. Пифко (A. Pifco), М. Уилкинса (M. Wilkins), Дж. Холлквиста (J. Hallquist).

Рассмотрены современные подходы и нормативные документы по численному моделированию напряженно-деформированного состояния конструкций с учетом физической, геометрической и конструктивной нелинейностей, в том числе, востребованные при расчетах на прогрессирующее обрушение. Выделяются работы А. М. Белостоцкого, С.И. Дубинского, А. С. Залесова, Н. И. Карпенко, В. С. Коровкина, Ю. И. Кудишина, О. В. Мкртычева, Ю. М. Стругацкого, В. И. Травуша, Г. И. Шапиро, Ю. А. Эйсман, труды Национального института стандартов и технологии, Г. Бланкерхорна (G.Blankenhorn), М. Бута (M. Booth), К. Бюкюр (C.Bucur), М. Люпэ (M. Lupoae), С. Маттерна (S. Mattern), Н. Рамана (N. A. Rahman), А. Элфоули (A. Elfouly).

Приведены описания современных «тяжелых» коммерческих конечноэлементных программных комплексов (ANSYS, ABAQUS, NASTRAN, AUTODYN, LS-DYNA и др.), применение которых позволяет эффективно решать весьма широкий класс задач механики деформирования и разрушения.

Во второй главе описана разработанная методика численного моделирования статических и динамических процессов нелинейного деформирования и разрушения узлов и обрушения конструкций большепролетных сооружений. Рассмотрены критерии отбора численных методов решения задачи, типов конечных элементов и моделей материалов, используемых в процессе анализа. Обоснован выбор основного программного комплекса для проведения расчетов.

Процесс деформирования и возможного разрушения конструкций большепролетных сооружений можно разделить на ряд этапов (см. рис. 1).

На первом этапе в результате внутреннего структурного изменения в конструкции (отказ элемента или изменение схемы работы узла) или внешнего воздействия начинается процесс перехода работы ряда элементов из упругой стадии в пластическую с накоплением повреждений. В дальнейшем реализуются два сценария: либо происходит накопление «критической массы» поврежденных и вышедших из строя элементов, при которой происходит обрушение сооружения, либо происходит локализация повреждений без дальнейшего затрагивания смежных зон конструкции.



Рис. 1. Схема развития аварийной ситуации

В рамках методики численного моделирования нелинейных процессов разрушения конструкций большепролетных сооружений проводятся следующие расчеты с учетом предполагаемой схемы развития аварийной ситуации для случаев внутренних структурных изменений:

- Оценка жесткостных характеристик, действительных схем работы и остаточных ресурсов несущей способности конструктивных узлов при мгновенном и длительном типах нагружения в условиях нормального режима эксплуатации.
- Оценка изменения схемы работы и жесткостных характеристик конструктивных узлов при воздействии повышенных нагрузок и развитии пластических деформаций вплоть до выхода из строя.
- Оценка влияния выявленных схем работы узлов на локальные зоны конструкции.
- Оценка отклика сооружения на введение возможных выявленных конструктивных изменений.

Результаты комплексного численного моделирования существенно зависят от применяемых подходов и схем решения поставленных задач-составляющих: качественное решение геометрически нелинейных задач, достаточно полное воспроиз-

ведение физических свойств материалов, возможность накопления повреждений материалом, реализация контактных взаимодействия не только между отдельными конструктивными элементами, но внутри них самих.

С этой целью, выполнен сравнительный анализ алгоритмов прямого интегрирования уравнений динамики по времени в рамках метода конечных элементов. По результатам проведенного сравнения произведен выбор оптимального.

В качестве определяющего соотношения напряжения-деформации принимается лагранжево-яуманова формулировка (updated Lagrangian Jaumann formulation), ориентированная на решение задач с большими деформациями и перемещениями:

$$\sigma_{ij}^{\nabla} = C_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{kl} \quad (1)$$

где σ_{ij}^{∇} – компоненты тензора скоростей нарастания напряжений Яуманна

C_{ijkl} – компоненты тензора состояния

$\dot{\varepsilon}_{kl}$ – компоненты тензора скоростей деформаций

$$\dot{\varepsilon}_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{dv_i}{dx_j} + \frac{dv_j}{dx_i} \right) \quad (2)$$

Напряжения вычисляются из отношения

$$\sigma_{ij}(t + dt) = \sigma_{ij}(t) + \dot{\sigma}_{ij} dt \quad (3)$$

$$\dot{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij}^{\nabla} + \sigma_{ik} \omega_{kj} + \sigma_{jk} \omega_{ki} \quad (4)$$

где ω_{kj} – спиновый тензор

$$\omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{dv_i}{dx_j} - \frac{dv_j}{dx_i} \right) \quad (5)$$

Обновление напряжений и деформаций производится следующим образом

$$\sigma_{ij}^{n+1} = \sigma_{ij}^n + \left(\sigma_{ip}^n \omega_{pj}^{n+1/2} + \sigma_{jp}^n \omega_{pi}^{n+1/2} \right) \Delta t^{n+1/2} + C_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{kl}^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{ij}^{n+1} = \varepsilon_{ij}^n + \left(\varepsilon_{ip}^n \omega_{pj}^{n+1/2} + \varepsilon_{jp}^n \omega_{pi}^{n+1/2} \right) \Delta t^{n+1/2} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \quad (7)$$

Разрешающее уравнение движения, которое используется при анализе динамических процессов, имеет следующий вид в матричной форме:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{R\} \quad (8)$$

где $[M], [C], [K]$ – матрицы масс, демпфирования, жесткости, $\{R\}$ – вектор внешней узловой нагрузки, $\{\ddot{u}\}, \{\dot{u}\}, \{u\}$ – вектора ускорений, скоростей и перемещений узлов элементов. Решение уравнения производится методами прямого интегрирования с использованием двух типов схем интегрирования: явной и неявной. Среди неявных схем интегрирования по времени получили широкое применение ряд алгоритмов: Ньюмарка, θ -Вилсона и Хаболта.

Систему уравнений, используемую при решении уравнений движения во времени по *явной схеме* интегрирования *методом конечных разностей*, можно представить в следующем виде

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} = \{R\} - \{F\} \quad (9)$$

где $\{R\}$ – вектор внешних сил, $\{F\}$ – вектор внутренних сил.

Для обоснованного ускорения решения системы на каждом шаге применяется диагональная матрица масс $[M]$ и α -Релеевская форма матрицы демпфирования $[C]$ – при небольших шагах по времени и соответствующем разбиении на конечные элементы первого порядка величины перемещений, скоростей и энергий имеют схожие невязки с результатами, полученными при использовании согласованных матриц. Учет различных типов нелинейностей производится через вектор внутренних сил $\{F\}$.

$$\{F\} = \sum \left(\int_{\Omega} [B^T] \{\sigma\} d\Omega + \{F^{cont}\} \right) \quad (10)$$

где $[B]$ – матрица связи деформаций и перемещений

$\{\sigma\}$ – вектор напряжений

$\{F^{cont}\}$ – вектор контактных сил

Решение системы уравнений производится *методом центральных разностей*, через использование рекуррентных соотношений: ускорения, скорости и перемещения на текущем шаге выражаются через значения предыдущих шагов.

$$\begin{aligned} \{\ddot{u}_n\} &= [M^{-1}] \left(\{R_n\} - \{F_n\} - [C]\{\dot{u}_{n-1/2}\} \right); \quad \{\dot{u}_{n+1/2}\} = \{\dot{u}_{n-1/2}\} + \{\ddot{u}_n\} \Delta t_n \\ \{u_{n+1}\} &= \{u_n\} + \{\dot{u}_{n+1/2}\} \Delta t_{n+1/2}; \quad \Delta t_{n+1/2} = \frac{1}{2} (\Delta t_n + \Delta t_{n+1}) \end{aligned} \quad (11)$$

Важным аспектом при решении задачи с использованием данной схемы является обеспечение устойчивости счета на основании выполнения условия минимального шага интегрирования по времени – критерия Куранта.

В общей формулировке величина критического шага для обеспечения устойчивости счета вычисляется следующим образом

$$\Delta t \leq \Delta t_{crit} = \frac{2}{\omega_{max}} \left(\sqrt{1 + \xi^2} - \xi \right) \quad (12)$$

где Δt_{crit} – критический шаг по времени, ω_{max} – максимальная собственная частота системы (рад/с), ξ – коэффициент демпфирования (в долях от критического).

По результатам проведенного анализа и сравнения наиболее эффективным подходом к решению поставленной задачи принят метод конечных элементов с использованием *явной схемы* интегрирования по времени в виде *метода конечных разностей*, имеющий следующие преимущества и особенности:

- используется диагональная матрица масс – не требуется обращения матрицы жесткости в отличие от неявной схемы;
- все нелинейности, включая конструктивную (контакт), учитываются в векторе внутренних сил – основное время счета затрачивается на вычисление данного вектора;

- не требуются проверки на сходимости – для устойчивости решения требуется обеспечение выполнения условия по размеру шага (по времени);
- меньшие затраты машинных ресурсов с ростом числа элементов, в которых возникает нелинейность, и типов нелинейностей в задаче;
- возможность накопления повреждений и разрушения материалов;
- реализация контакта не только между назначенными парами поверхностей, но внутри одной группы элементов.

Важным аспектом также является выбор адекватной формулировки применяемых конечных элементов по критерию экономичности потребляемых машинных ресурсов. В таблице 1 приведены наиболее популярные формулировки для конечных элементов при использовании одной точки интегрирования с указанием размера требуемых математических операций для решения одного элемента. Среди них выделяются объемные КЭ Hallquist и оболочечные КЭ Belytschko-Tsay, как менее требовательные к затрачиваемым ресурсам.

Таблица 1. Объемы затрачиваемых математических операций на расчет одного элемента. Наиболее популярные формулировки

Тип	Формулировка	Число мат. операций
Объемные КЭ	Hallquist (DYNA3D)	428
	Flanagan-Belytschko	1328
	Wilkins	1793
Оболочечные КЭ	Belytschko-Tsay	725
	Hughes-Liu	4050
	Hughes-Liu (модиф.)	35350
	C^0 (треуг. оболочка)	649

Численное моделирование задач деформирования и разрушения конструкций сопряжено с необходимостью адекватного учета значимых типов нелинейностей:

- Геометрическая нелинейность (большие перемещения и деформации)
- Физическая нелинейность:
 - для металлов: пластичность, упрочнение, разупрочнение
 - для бетона и железобетона: трещинообразование, крошение
 - для резиноподобных материалов
- Конструктивная нелинейность (контактные взаимодействия между элементами).

Отбор моделей материалов производится на основании стандартных схем, воспроизводящих реальные опыты, по критерию соответствия полученных численных результатов (величины разрушающих нагрузок, кривые

деформирования от приложенной нагрузки, картины разрушения) экспериментальным данным.

К настоящему времени разработаны и используются, по преимуществу в машиностроении, промышленные программные комплексы решения нелинейных динамических задач, использующие метод конечных элементов с явной схемой интегрирования по времени, среди которых можно выделить ABAQUS Explicit, AUTODYN и LS-DYNA. Полным сил «патриархом» в этой области является LS-DYNA, в последнее время получивший развитие и в сторону строительства (введение специальных граничных условий для моделирования сейсмических воздействий, возможность реализации этапности возведения). Также стоит отметить более широкую библиотеку материалов и конечных элементов, на основании чего в ПК LS-DYNA принят за базовый расчетный процессор в данной работе.

В третьей главе представлены отобранные и решенные верификационные квазистатические и динамические задачи с развитой физической, геометрической и конструктивной нелинейностью – таблица 3 содержит сформированную сводную «матрица верификации» разработанной методики.

Задачи с геометрической нелинейностью:

1. *Двухстержневая ферма Мизеса*. Сопоставляется критическая узловая нагрузка, при которой возникает прощелкивание, с теоретическим значением из работ П. Г. Бергана (P.G. Bergan).

2. *Устойчивость пространственного геодезического купола*. Оценивается первая критическая нагрузка прощелкивания, сопоставляется кривая деформирования с известными опытными и численными результатами Е. Хангая (E. Hangai), Д. С. Джаганнатана (D. S. Jagannathan), М. Пападракакиса (M. Papadarakakis).

3. *«Петля Уильямса»* – Λ -рама с жестким сопряжением двух стержней. Оцениваются и сопоставляются кривые деформирования и величин опорных реакций от величины прикладываемой узловой нагрузки с известными теоретическими и численными решениями Ф. В. Уильямса (F.W. Williams), О. С. Зенкевича (O. C. Zienkiewicz).

4. *Осевое сжатие цилиндрической оболочки*. Сопоставляются критические нагрузки потери устойчивости оболочки и картины деформирования с опытными и расчетными данными Р. С. Приядарсини (R.S. Priyadarsini).

Задачи с физической нелинейностью:

5. *Испытания на растяжение стальных образцов*. Сопоставление расчетных кривых деформирования образцов для различных моделей материала с опытными данными (испытание стальных образцов в рамках экспертизы причин обрушения СОК «Трансвааль-парк») проф. Г. А. Филиппова.

6. *Испытание стальных образцов на сдвиг* (рис.2). Сопоставление кривых деформирования и картин разрушения для различных моделей материалов с опытными данными М. Феучта (M. Feucht).

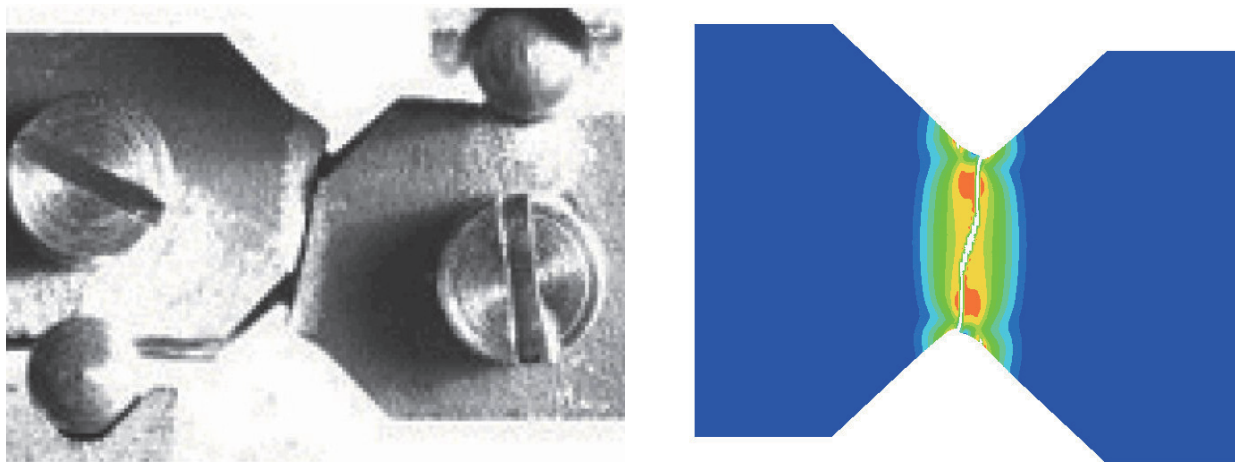


Рис.2. Испытание и численное моделирование испытания стального образца на сдвиг

7. Испытание бетонных цилиндров на осевое сжатие с различными граничными условиями. Сопоставляются картины разрушения и кривых деформирования образцов для различных моделей материалов и граничных условий с теоретическими З. П. Базанта (Z.P. Bazant) и опытными Л. Швера (L. Schwer)

8. Балка Озбольда-Базанта. Испытание бетонной балки на изгиб от сосредоточенной силы. Сопоставляются кривые деформирования для различных моделей материала от величины приложенной нагрузки с известными опытными данными Дж. Озбольд (J. Ozbolt) и З. П. Базанта (Z. P. Bazant).

9. Балка Бреслера и Скорделиса. Опыт идентичен примеру 8, но вместо бетонной балки применяется железобетонная. Сопоставляются кривые деформирования и картины трещинообразования для различных моделей материала с известными опытными данными Б. Бреслера (B. Bresler) и А. С. Скорделиса (A. C. Scordelis).

Динамические физически-, геометрически- и конструктивно нелинейные задачи:

10. Ударное воздействие на железобетонную балку прямоугольного сечения (см. рис. 3). Сопоставляются вычисленные и экспериментальные (В.В. Bielenberg) кривые деформирования и картины разрушения.

11. Потеря устойчивости стального стержня крестового сечения при динамическом изгибном воздействии. Полученные результаты сопоставляются с известными данными численного моделирования в ПК ABAQUS Explicit, полученными Б. Карлссоном (B. Karlsson) и П. Соренсеном (P. Sorensen).

12 и 13. Динамическое осевое сжатие и квазистатический изгиб алюминиевой трубы квадратного сечения. Сопоставляются полученные результаты с известными опытными данными Хупутра (Hooputra) и данными численного моделирования Б. Карлссона (B. Karlsson) и П. Соренсена (P. Sorensen).

По результатам всех верификационных расчетов получены картины деформирования, потери устойчивости и разрушения моделируемых образцов и конструкций, близко сопоставимые с «эталонными» экспериментальными и теоретическими данными. На физически нелинейных задачах проведен отбор сокращенной библиотеки материалов (металлы, бетон и железобетон, резиноподобные) для разрабатываемого программного модуля.

Таблица 4. Сводная «матрица верификации» численной методики

№ п.п.	Наименование	"Эталонные" данные для сопоставления	Класс задач				Размерность задачи (КЭ), тип КЭ	Время счета	Расхождение, %
			Геом. нелин.	Физич. нелин.	Констр. нелин	Динамика			
1	Устойчивость «фермы Мизеса»	Bergan	+	-	-	-	3 (2d ферм.эл.)	1 мин	0.9%
2	Устойчивость пространственного геодезического купола	Hangai, Jagannathan, Papadrakakis	+	-	-	-	24 (3d ферм.эл.)	5 мин	0.22–0.5%
3	«Петля Уильямса», устойчивость Λ-рамы	Williams, Zienkiewicz	+	-	-	-	10 (3d стержн.)	2 мин	6%
4	Осевое сжатие круговой цилиндрич. оболочки	Priyadarsini	+	-	-	-	4869 (3d оболоч.)	6 мин	0.3%
5	Испытание стального образца на растяжение	Г.А. Филиппов	-	+	-	-	26976 (3d объемн.)	2 мин	2-10%
6	Испытание стального образца на сдвиг	Feucht	-	+	-	-	23040(3d объемн.)	2 мин	2.5-12%
7	Испытание бетонного цилиндра на сжатие	Bazant, Schwer	-	+	+	-	3432(3d объемн.)	2 мин	1-5%
8	Бетонная балка Озбольда-Базанта	Ozbolt, Bazant	-	+	+	-	18589 (3d объемн.)	3 мин	6%
9	Железобетонная балка Бреслера и Скорделиса	Bresler, Scordelis	-	+	+	-	19865 (3d объемн.)	3.5 мин	3.4 %
10	Ударное воздействие на железобетонную балку прямоугольного сечения	Bielenberg	+	+	+	+	14224 (3d объемн.)	10 мин	5.2%
11	Потеря устойчивости стального стержня в результате динамического изгибного воздействия	Karlsson, Sorensen	+	+	+	+	900 (3d оболоч.)	1 мин	1%
12	Осевое динамическое сжатие квадратной трубы	Hooputra, Karlsson,	+	+	+	+	14600 (3d оболоч.)	9 мин	1.8-2.7%
13	Динамический изгиб квадратной трубы	Sorensen	+	+	+	+	14600 (3d оболоч.)	10 мин	4.7-15.7%

Характеристики использованного компьютера: Процессор – Intel Core i7 2600 (4 ядра), ОЗУ – 16 Гб

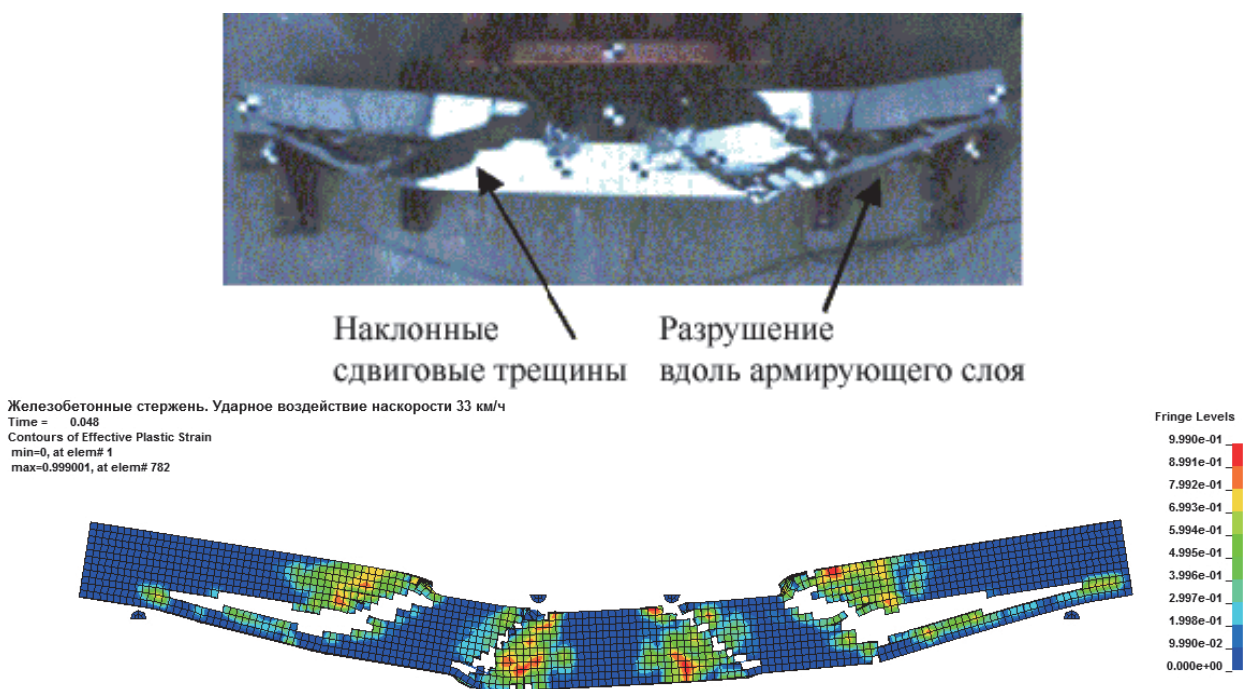


Рис. 3. Разрушение опытного образца при ударном воздействии 33.1 км/ч. Время – 48 мс.

В ходе верификационных исследований проведена селекция и оптимизация параметров численных схем для повышения их эффективности. Решение представленного набора верификационных примеров позволяет судить о возможности использования разработанной методики и программного комплекса LS-DYNA для решения разнообразных задач нелинейной статики и динамики строительных конструкций.

Четвертая глава содержит описание разработанного исследовательского программного модуля InterDYN, структура и возможности которого позволяют автоматизировать процесс применения разработанной методики и базового программного комплекса LS-DYNA на практике.

Вследствие того, что данный тип расчетов требует задания весьма большого числа опций, указания различных свойств материалов, граничных условий и параметров расчета, целесообразно для повышения эффективности подготовки моделей и сведения к минимуму ошибок в процессе ввода пользователем формировать входной текстовый файл в автоматизированном программном интерфейсе.

Программный модуль InterDYN работает под управлением систем класса Windows. В качестве среды разработки использовалась Microsoft Visual Studio, язык программирования – C#, разработанный пользовательский интерфейс – русскоязычный. На рисунке 4 показана структура работы программного модуля InterDYN.

В рамках существующих программных комплексов (Лира, SCAD, СТАДИО, ANSYS) создается КЭ-модель с присвоенными атрибутами материалов, жесткостей, созданными группами или компонентами и т. п. С помощью разработанных интерфейсов-конверторов генерируется нейтральный внутренний текстовый файл модуля. В дальнейшем файл импортируется в программный интерфейс InterDYN, в котором производится обработка модели:

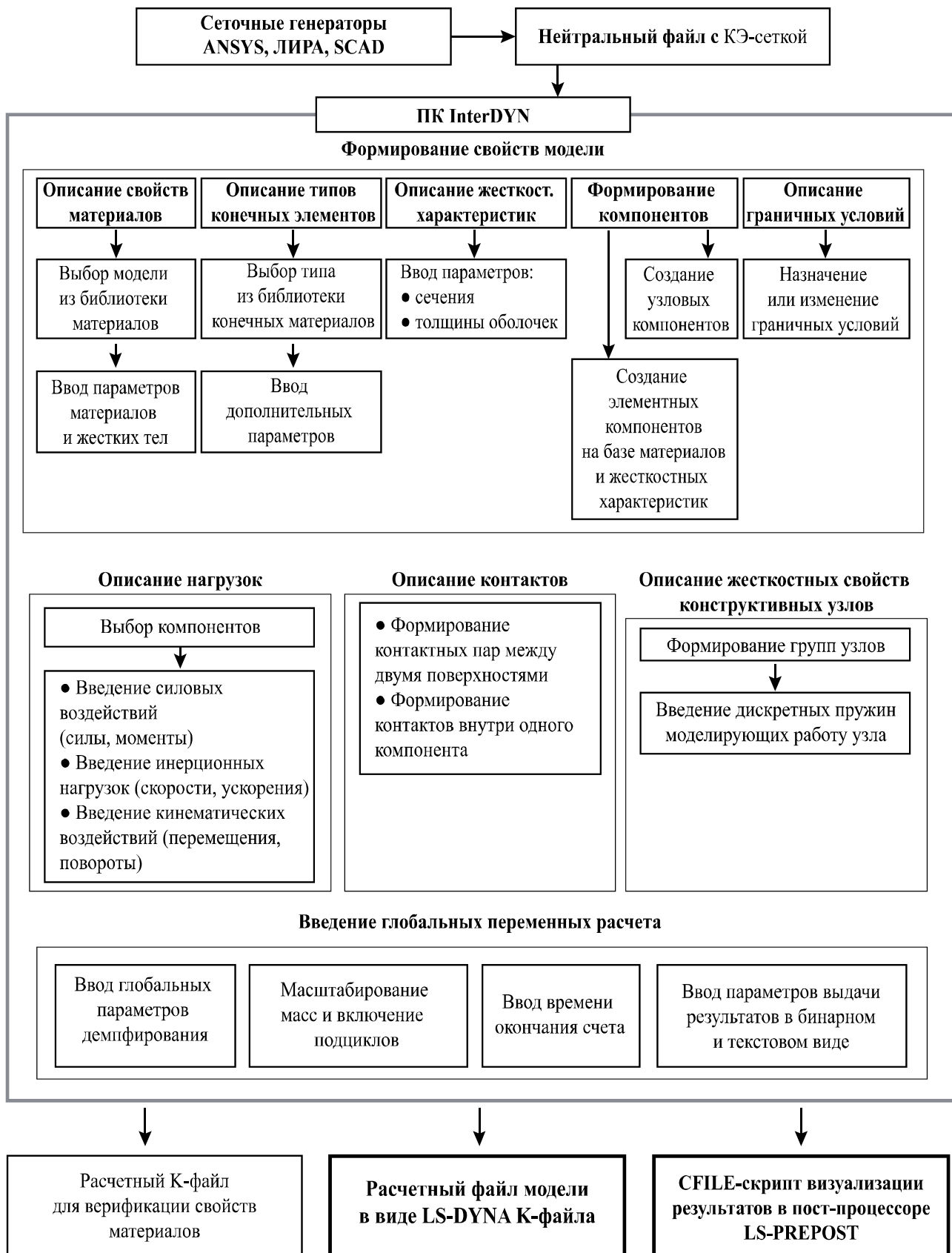


Рис. 4. Структура и принцип работы программного интерфейса InterDYN

- Выбор типов КЭ для проводимого расчета
- Формирование свойств материалов (используется отобранная и апробированная на опытных данных библиотека моделей материалов):

- Для металлов на базе моделей пластичности с кинематическим и изотропным упрочнением, ряд моделей учитывающих разупрочнение материала
- Для бетонных и железобетонных конструкций: бетон Winfrith, бетон CSCM, модель EC2 (для оболочек и стержней Hughes-Liu)
- Модель нелинейно упругих изотропных резиноподобных материалов Mooney-Rivlin
- На основании заложенных в КЭ модели атрибутов присваиваются требуемые модели материалов
 - Формирование групп жестких тел
 - Дополнение и модификация граничных условий
 - Создание и модификация дополнительных компонентов
 - Задание или модификация нагрузок
 - Введение параметров и номеров компонентов для генерации контактных пар, введение параметров для генерации контакта поверхности самой с собой
 - Создание или модификация узловых стыков в виде пружинных элементов с отражением реальных жесткостных характеристик конструктивного узла на основе имеющихся расчетов
 - Для групп узлов на стыке оболочечных элементов, при необходимости, вводятся сварные соединения
 - Выставляются параметры расчета (интервал требуемого для анализа времени, демпфирование, коэффициенты масштабирования масс, коэффициенты понижения максимально допустимого шага интегрирования во времени)
 - Отдельным пунктом введено автоматизированное составление тестовых примеров для испытания тестовых стальных образцов на растяжение, сдвиг, для бетонных образцов – испытание цилиндров на сжатие.

На выходе создаются два файла: входной K-файл для расчетного процессора LS-DYNA и CFILE-файл обработки и визуализации модели для LS-PREPOST с указанием ракурсов, срезов и генерацией данных для графиков.

В пятой главе рассматривается применение разработанной численной методики, реализованной в программной среде InterDYN – LS-DYNA, к решению сложной практической задачи – нелинейному деформированию и разрушению узлов-элементов и обрушению конструкций покрытия СОК «Трансвааль-парк» (г. Москва).

Вначале, на базе построенной пространственной оболочечно-стержневой конечноэлементной ANSYS-модели сооружения (см. рис. 5) производится оценочный расчет с определением значимых усилий в исследуемых конструктивных элементах с целью дальнейшего исследования реальных схем работы узлов.

На основании проектных данных и реальных экспертных замеров после обрушения сооружения производится построение КЭ-моделей узлов конструкций:

- Параметрическая модель верхнего узла колонны (сварные катеты 16 мм и 22 мм). Моделировался с использованием объемных элементов. Расчетная модель включала: блюмс (стержень прямоугольного сечения 100x100 мм), боковые ребра из стальных пластин толщиной 25 мм, сварные швы, пластины закладной детали железобетонной оболочки покрытия. За основные нагружа-

ющие факторы, определяющие НДС узла, принимались: вертикальное сжимающее усилие (80 т) и изгибающий момент (до 13 тм).

- Нижний опорный узел колонны – опорная плита. Моделировался с использованием объемных элементов. Расчетная модель включала: участок блюмса, опорную пластину толщиной 40 мм, упорные бруски размером 30x30x80 мм, сварные швы.

- Опорная цилиндрическая колонна – распорки Р1. Расчетная модель включала: трубчатый элемент. Моделировалась с использованием оболочечных элементов. Верхний и нижний опорные узлы выполнялись в виде жестких тел.

Программным модулем InterDYN, на базе конечноэлементных моделей производится создание входного К-файла для решателя LS-DYNA (ввод и назначение материалов, задание контактных пар и необходимых компонентов, приложение нагрузок). Для объемных элементов использовалась формулировка Халлквиста (J. O. Hallquist) с одной точкой интегрирования, для оболочечных КЭ – формулировка Belytschko-Tsay.

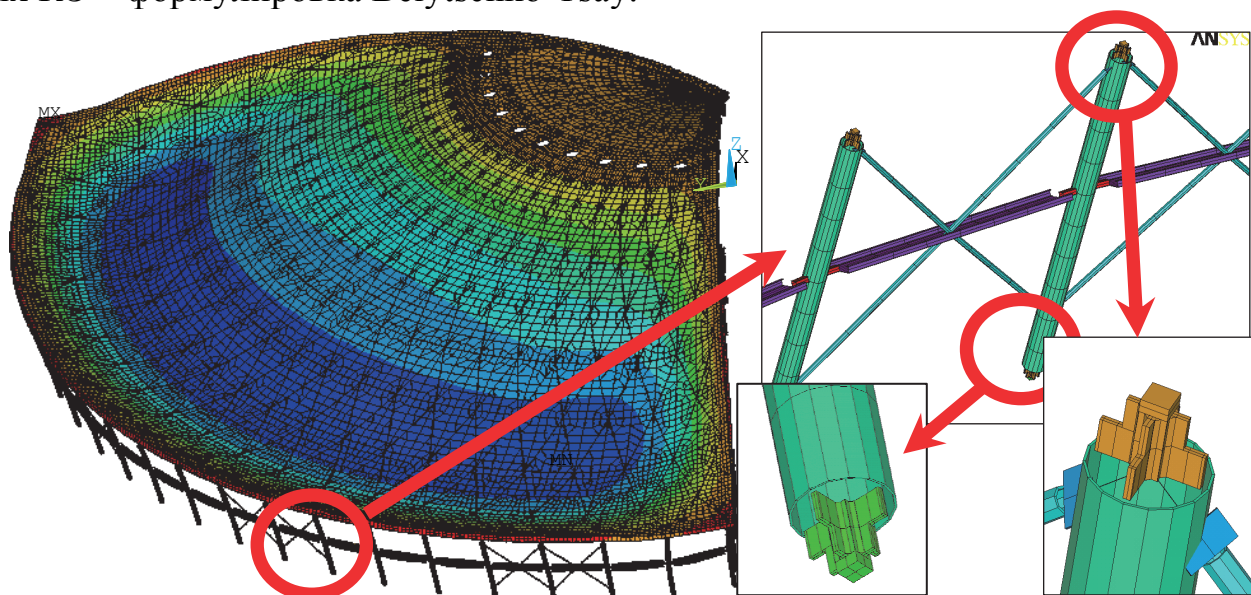


Рис. 5. СОК "Трансвааль-парк". Оболочечно-стержневая КЭ-модель и результаты расчетов НДС (перемещения) системы «ребристая оболочка покрытия–колонны со связями»

Для верификации задаваемых диаграмм конструкционных материалов (материалы колонны, блюмса и сварных соединений) производится сопоставление результатов экспериментов и численного моделирования на примере испытаний на растяжение. В качестве основной модели материала используется модель изотропного материала с экспоненциальным участком разупрочнения и разрушения.

По результатам проведенного анализа для моделей верхнего узла колонны с катетом сварного шва 22 мм установлены критические нагрузки разрушения, получены сходные с натурными замерами картины разрушения по материалу блюмса, определены величины угловых жесткостей и передаваемого момента на тело колонны с учетом развития пластических деформаций по сечению. Для модели с «проектным» катетом 16 мм отрыв пластины закладной детали происходит по границе сплавления сварных швов. Для обеих схем характерна

передача значительного момента на колонны до наступления критической нагрузки разрушения.

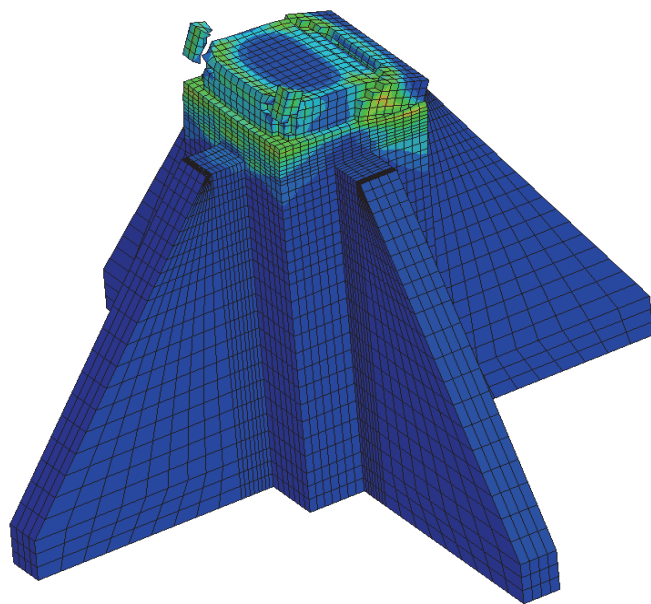
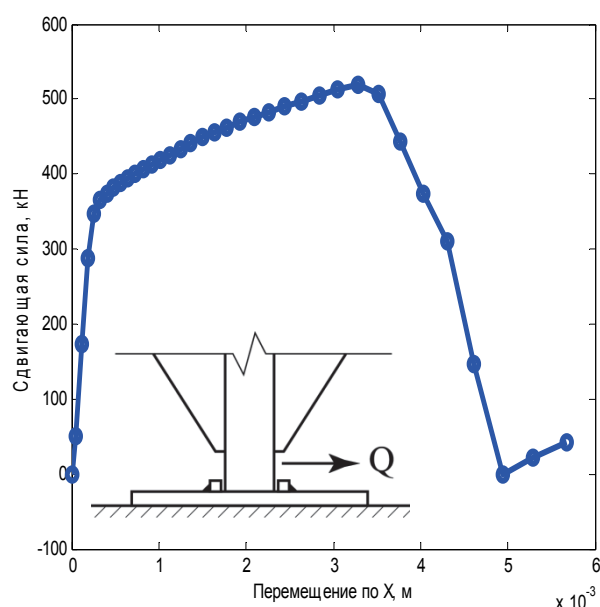
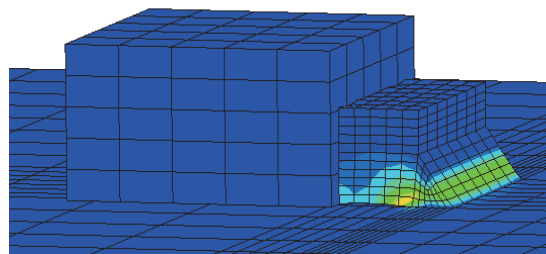


Рис. 6. СОК "Трансвааль-парк". Разрушение оголовка ряда колонн по результатам численного эксперимента (сварные швы условно не показаны) и натурных съемок

На основании численного моделирования поведения узла «нижний опорный узел колонны – опорная плита» получены критические значения сдвигающих усилий, вызывающих разрушение узла (упорных брусков) по сварному шву (см. рис. 7).



Развитие пластических деформаций



Разрушение опорного бруска

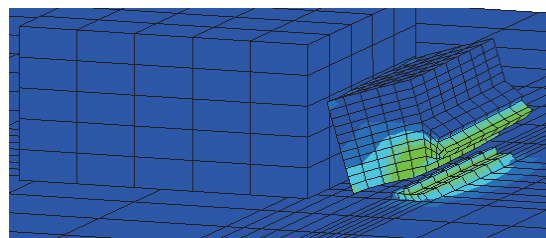


Рис. 7. СОК "Трансвааль-парк". Нижний узел. График сдвигающего усилия в зависимости от смещения бруса и картина разрушения (пластические деформации) от сдвигающих усилий

Для расчетной модели «колонны–распорки» установлены критические коэффициенты по нагрузке в момент потери устойчивости для различных групп передаваемых усилий. Потеря устойчивости происходит по оболочечной форме в уровне стыковок распорок, при этом величина критической нагрузки напрямую

зависит от величины передаваемого момента с покрытия на колонну. Форма потери устойчивости и характер закритического деформирования имеют схожую картину с натурными замерами (рис.7). Для шарнирной схемы сопряжения величина коэффициента перегрузки является минимальной и составила 1,03.

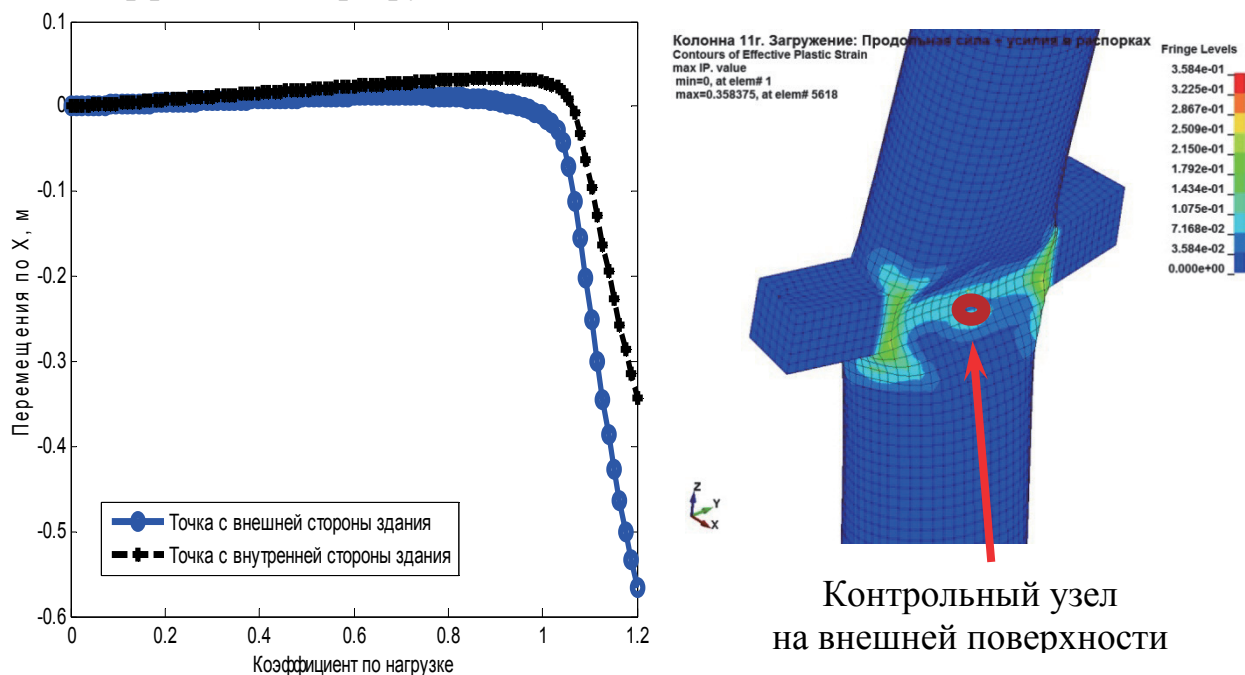


Рис. 8. График перемещений (м) средних узлов между распорками с внешней и внутренней стороны здания в зависимости от коэффициента по нагрузке и картина разрушающих пластических деформаций (макс. 30%)

По результатам проведенных расчетных исследований конструктивных узлов составлена сводная таблица величин разрушающих усилий и коэффициентов по нагрузке (см. табл. 5)

Таблица 5. Расчетные величины коэффициентов по нагрузке соответствующих разрушению узла и потери устойчивости колонны

Модель «верхний узел колонны», сварные катеты 16 мм и 22 мм, вертикальная нагрузка 80 т	Разрушающий момент 10,3 тм – 13,0 тм
Модель «нижний узел колонны»	Макс. сдвиг. усилие 50 т
Модель «колонна – распорки». Вертикальное продольное сжимающее усилие – 80 т, горизонтальное смещение верхнего узла 65 мм	Коэф. по нагрузке в момент потери устойчивости 1,035
Модель «колонны – распорки». Момент – 10 тм, вертикальное сжимающее усилие – 80 т, горизонтальное смещение верхнего узла 65 мм	Коэф. по нагрузке в момент потери устойчивости 1,14

На следующем этапе по имеющимся проектным и натурным данным была разработана уточненная КЭ-модель «ребристая оболочка покрытия–колонны со связями» с оболочечным представлением колонн по внешней окружности здания.

Программным модулем InterDYN в зонах стыковки колонн с основанием и покрытием введены дискретные (пружинные) конечные элементы, с помощью которых воспроизводятся установленные ранее жесткостные характеристики конструктивных узлов.

Для нижнего узла вводятся односторонние КЭ-демпферы, моделирующие работу брусков, ограничивающих горизонтальные возможные перемещения, чья жесткость получена ранее при детальном анализе узла, и выключающиеся из работы по достижению предельной деформации. Сопряжение верхнего узла производится через дискретный элемент, передающий жесткостные характеристики блюмса и элемент угловой жесткости, выключение которого происходит по достижению предельного угла поворота.

На основании разработанной модели созданы и проанализированы пять вариаций-сценариев для различных схем работы узлов колонн:

- с дискретным (пружинным) сопряжением колонн с покрытием и основанием (сценарий 1);
- «проектная» с шарнирным сопряжением колонн с покрытием (сценарий 2);
- динамическое моментное воздействие в уровне стыковки покрытия с колонной 11г при изменении схемы работы узла с упругого на шарнирный (сценарий 3, рис.9);
- разрушение сварного шва, связывающего распорку Р1 с колонной 11г (сценарий 4).
- разрушение опорных брусков колонн кольцевого ряда (сценарий 5).

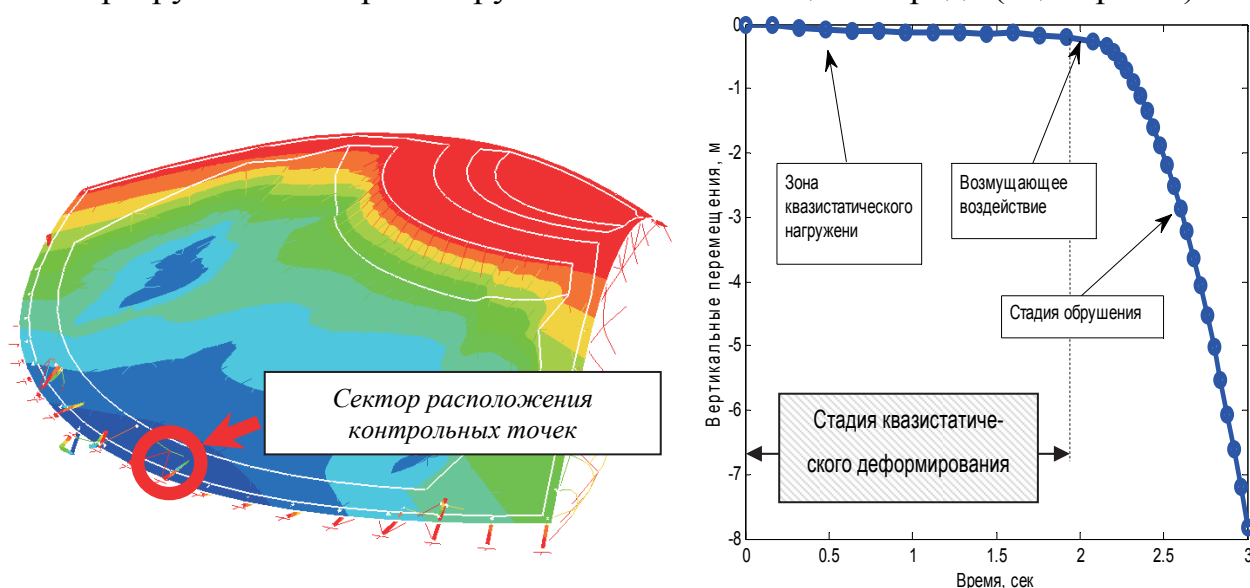


Рис. 9. Картина обрушения модели сооружения для сценария 3.
График вертикальных перемещений узлов (м) покрытия в районе колонны 11г

По результатам проведенных расчетов установлен сложный характер развитого нелинейного деформирования и разрушения узлов-элементов и обрушения системы. На первом этапе в зависимости от исследуемого сценария с развитием пластических деформаций в уровне стыковки колонны с распорками Р1 (с внешней стороны здания) происходит локальная потеря устойчивости с возникновением перегиба колонны. Расположение теряющей устойчивость

колонны (колонн) в схеме зависит напрямую от выбранного сценария и актуального распределения нагрузок в системе (прежде всего, снеговых).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Из обзора современных отечественных и зарубежных разработок и исследований следует, что существующие методики расчета деформирования, локальных разрушений и прогрессирующего обрушения большепролетных конструкций нуждаются в дополнении и уточнении, особенно в части учета развитого нелинейного и быстропротекающего характера процессов.

2. Предложен подход и разработана реализующая его численная методика моделирования нелинейного деформирования и разрушения большепролетных сооружений с учетом иницирующего разрушения и(или) закритической работы тяжело нагруженных конструктивных узлов и элементов.

3. Основываясь на проведенном многопараметрическом сравнительном анализе численных методов решения трехмерных задач статики и динамики с развитыми нелинейностями (физической, геометрической и конструктивной), в качестве основного выбран метод конечных элементов с явной схемой интегрирования по времени, реализованный в программном комплексе LS-DYNA.

4. По результатам решения верификационных статических и динамических задач с развитой физической, геометрической и конструктивной нелинейностями по разработанной методике получены картины деформирования, потери устойчивости и разрушения моделируемых образцов и конструкций, близкие к «эталонным» экспериментальным и теоретическим данным. На физически нелинейных задачах проведен отбор библиотеки материалов (металлы, бетон и железобетон, резиноподобные) для разрабатываемого программного модуля.

5. Разработан программный модуль InterDYN, позволяющий автоматизировать процесс применения разработанной методики и подготовки расчетных моделей и скриптов визуализации для базового ПК LS-DYNA.

6. Разработанная численная методика использована для «ретроспективных» нелинейных статических и динамических расчетов реальных конструктивных узлов («покрытие – колонна» и «колонна – основание») и элементов («колонна – распорки») и системы «железобетонная оболочка покрытия – колонны со связями» спортивно-оздоровительного комплекса «Трансвааль-парк». Подтвержден зафиксированный в 2004 г. сложный нелинейный характер деформирования и локального иницирующего разрушения конструктивных узлов и прогрессирующий характер обрушения всей системы.

7. Разработанная методика успешно используется для численного моделирования напряженно-деформированного состояния и прочности конструкций большепролетных сооружений в ГУП МНИИП Моспроект-4, Научно-образовательном центре компьютерного моделирования МГСУ и Научно-исследовательском центре «СтаДиО».

8. Разработанную методику можно рекомендовать для широкого спектра экспертных расчетных исследований нелинейного деформирования и разру-

шения конструкций большепролетных сооружений, а решенные верификационные задачи – как основу для планируемого проведения верификации ПК LS-DYNA в системе Российской академии архитектуры и строительных наук.

Основные положения и результаты диссертации отражены в следующих публикациях:

В периодических изданиях, включенных в перечень рекомендованных ВАК:

1*. А. М. Белостоцкий, А. С. Павлов. Расчет конструкций большепролетных зданий с учетом физической, геометрической и конструктивной нелинейностей. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2010 г., стр. 80-86.

2*. А. С. Павлов. Численное моделирование деформирования и разрушения узлов строительных конструкций. Научно-технический журнал Вестник МГСУ. 2011 г., № 4, стр. 525-529

Публикации в иных изданиях

3. А.М. Белостоцкий, А.А. Аул, О.А. Козырев, А.С. Павлов. Расчеты зданий на устойчивость против прогрессирующего обрушения с учетом физической и геометрической нелинейностей. Сборник трудов первой международной научно-практической конференции «Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы», МГСУ, Москва, 2008 г., стр. 183-194

4. А.М. Белостоцкий, А.С. Павлов. Расчет конструкций большепролетных зданий с учетом физической, геометрической и конструктивной нелинейностей. Третий международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений». Новочеркасск, 2010 г., стр. 79.

5. А.М. Белостоцкий, А.С. Павлов. Методология моделирования высоко нелинейных быстро протекающих процессов деформирования и гипотетического обрушения большепролетных зданий. Сборник трудов III Международной научно-практической конференции «Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы». 2010 г. Стр. 64-68.

6. А.М. Белостоцкий, С.И. Дубинский, А.С. Павлов. Анализ причин обрушения конструкций покрытия СОК «Трансвааль-парк». Часть 4. Численное моделирование нелинейного поведения критических конструктивных узлов и элементов. Вопросы прикладной математики и вычислительной механики. Сборник трудов № 13. МГСУ, Москва, 2010 г., стр. 136-145.

7. А.М. Белостоцкий, А.С. Павлов. Численное моделирование закритического поведения конструкций методами нелинейной динамики. Сборник трудов IV Международной научно-практической конференции «Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы». 2011 г., стр. 89-96.

Формат 60x90/16. Бумага офсетная.

Печать – Херох DocuColor 12. Усл. печ.л. 1,5.

Тираж 100 экз. Заказ № 2108.

Отпечатано в соответствии с предоставленными материалами
в ОАО «Авиаиздат», 121351, г. Москва, ул. Ивана Франко, д. 48

