

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ В ОБЛАСТИ САЕ СИСТЕМ – «ЗЕНИТ-95»**С. В. Курков, С. К. Савельев, А. С. Курков, Е. П. Фомин, И. Е. Гутовский***Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова
АО «Бриг», Санкт-Петербург*

В данный момент одной из основных проблем отечественной оборонной промышленности является зависимость от использования иностранных средств проектирования и разработки. Значимость данной проблемы очевидна, ибо при текущем положении дел на наиболее значимой стадии создания новых изделий происходит вынужденная ориентация исследователей и проектантов на технологические платформы вероятного противника.

Использование САД\САЕ систем ведущих мировых разработчиков с одной стороны облегчает отечественным предприятиям участие в международном разделении труда. Однако, для предприятий ВПК такое участие не может считаться приоритетным, а во многих отношениях и чревато неприятными последствиями. Кроме того, ориентация на среды разработки иностранного происхождения подрывает возможности развития отечественных школ разработчиков высококлассных продуктов в данной области.

Кроме перечисленных выше проблем, существует и еще одна проблема, связанная с монополизацией рынков программного обеспечения. Как показывает анализ развития программных продуктов, начиная с определенного этапа развития, крупные компании в основном занимаются развитием сервисных возможностей своих продуктов и практически не развивают основное вычислительное ядро (если оно вообще имеется у них в собственной разработке). Это часто приводит к отставанию, как самой компании, так и пользователей ее продуктов, которые зачастую даже не осознают указанного застоя в развитии.

В настоящий момент существует некоторое количество отечественных САЕ систем, но их популярность не достаточно высока, что зачастую не соответствует их реальным возможностям. Данная работа посвящена конечно-элементному пакету «Зенит-95», начало разработки которого состоялось в стенах Балтийского государственного технического университета. Базовые положения данного пакета изложены в [1-4,6].

Программный конечно-элементный комплекс «Зенит-95» – универсальная система общего назначения, предназначенная как для проведения многоцелевого инженерного многодисциплинарного анализа, так и для научно-исследовательских и учебных целей в самых разных сферах деятельности, в числе которых:

- Расчет напряжений и деформаций в модели при действии статических нагрузок;
 - Расчет напряжений и деформаций в модели с учетом геометрической нелинейности при изменяющихся во времени статических нагрузках и кинематических граничных условиях;
 - Расчет параметров динамических переходных процессов с учетом геометрической нелинейности (механизмы) и изменения структуры модели (контакты, соударения звеньев);
 - Расчет частот и форм собственных колебаний;
 - Расчет параметров вынужденных колебаний и отклика конструкции на сейсмическое воздействие.
 - Расчет параметров стационарных процессов теплопередачи;
 - Расчет параметров нестационарных процессов теплопередачи;
- Совместное решение задач механики и теплофизики.

Кроме перечисленных в программе имеется целый ряд вспомогательных алгоритмов: определение характеристик сечений стержневых элементов, согласование начальных условий по скоростям и перемещениям, вычисление массы и моментов инерции модели и др.

Программа работает во всех операционных системах Windows, 32 и 64-разрядных. Вычислительный модуль для ОС Windows позволяет эффективно решать задачи анализа систем с числом степеней свободы до 20000000. В программе реализованы алгоритмы параллельных вычислений, в том числе с использованием ресурсов видеокарт.

Имеется модуль распределенных вычислений на базе использования кластеров для ОС Linux, предназначенный для использования на суперкомпьютерах (для вычислителей МП ЦЕТУС CETUS, г. Саров и др.). Этот модуль решает задачи практически неограниченного объема.

Основной идеей программы «Зенит-95», сформировавшейся в ходе ее развития, является идея непрерывности пространства охватываемой области применения:

- Все реализованные в программе алгоритмы реализованы на единой математической основе.
- Все реализованные в программе конечные элементы могут совершать большие перемещения и при этом испытывать деформации.
- Все реализованные в программе конечные элементы могут использоваться в любых сочетаниях (объемные, стержневые, элементы гидро- и пневмопривода, крепежные, виртуальные и др.).
- Все виды информации, используемой и обрабатываемой в программе, могут взаимно преобразовываться (графические элементы в конечные, стержневые элементы в пластины и объемные, криволинейные элементы в линейные и т.д.).

Это позволяет практически снять множество допущений, накладываемых особенностями реализации вычислений в других программах.

При этом, изначально, целью разработки программы являлось моделирование конструкций, элементы которых совершают большие перемещения и испытывают упругие деформации. В ходе дальнейшего развития область использования программы значительно расширилась и охватила основания МКЭ.

Особенности начальных целей разработки обусловили повышенные требования к точности и эффективности решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), так как решать ее требуется на каждом шаге интегрирования по времени, а требования повышенной точности обусловлены используемым методом начальных напряжений для учета больших перемещений элементов. Последний предполагает наличие в правой части СЛАУ больших по величине элементов, обычно значительно превышающих действующие нагрузки. Очевидным способом повышения эффективности является распараллеливание вычислений. В программе реализованы параллельные вычисления с использованием многоядерных процессоров и ресурсов видеокарт.

Для больших задач модифицирован метод сопряженных градиентов. Модификация позволила обеспечить требуемую точность и устойчивость, особенно, что оказалось неожиданным, для решения уравнений задач теплопередачи. Поэтому этот метод, как наиболее эффективный, используется для этих задач по умолчанию.

Вторым направлением повышения эффективности решения задач является снижение порядка системы за счет повышения точности конечных элементов. В частности, наиболее часто используемых объемных (3D) КЭ. Здесь удалось добиться следующих результатов: За счет подбора аппроксимирующих функций и расположения точек интегрирования по элементу устранено сдвиговое закливание, т.е. элемент стал практически изопараметрическим. На рис. 1 представлен тест – изгиб консольной балки из элементов с различными соотношениями сторон.

Кроме аппроксимации упругих свойств, определенную проблему представляет определение напряжений в элементах на грубых сетках. Обычный способ определения деформаций и напряжений в точках интегрирования в этом случае дает значительные (до 50%) погрешности. Проблему удалось решить на основе идеи определения напряжений из рассмотрения равновесия элемента на его ребрах и гранях. Идея возникла из простого наблюдения, что модели из одного и десяти элементов дают одинаковые реакции в точках закрепления и приложения

нагрузок. Следовательно, напряжения в этих точках также должны быть одинаковы. Этот способ определения напряжений ориентирован на грубые сетки.

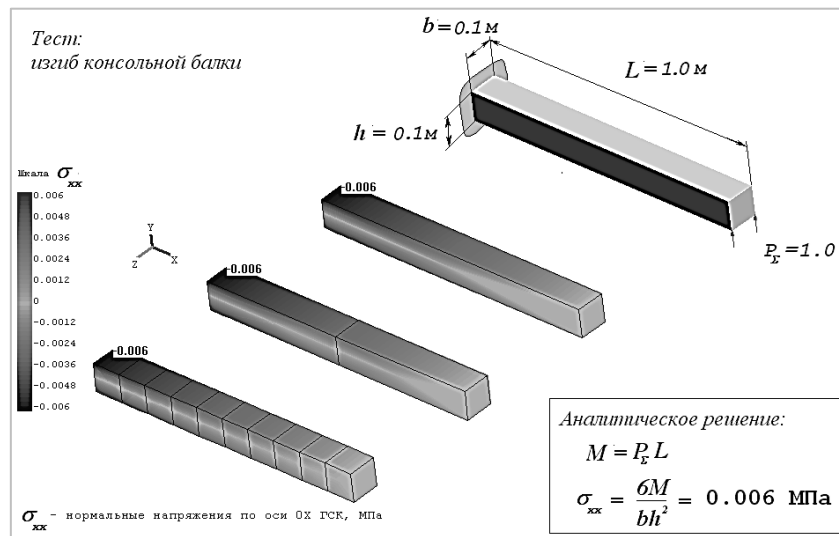


Рис. 1. Тестовая задача на изгиб консольной балки.

Даже при использовании одного элемента получается результат довольно близкий к аналитическому решению. Описание конструкции с использованием нескольких элементов обеспечивает отличное приближение к точному решению

Эффективность элементов с такими свойствами проиллюстрирована на примерах моделирования штанги робота-чистильщика полости атомного реактора (а) и рычагов люка защиты пусковой остановки (б). Здесь штангу можно разбивать только из условия точности моделирования изгиба без ограничения соотношения сторон элементов, а рычаги можно моделировать одним элементом по длине. При этом получаемые значения напряжений не хуже, чем при использовании гипотезы плоских сечений.

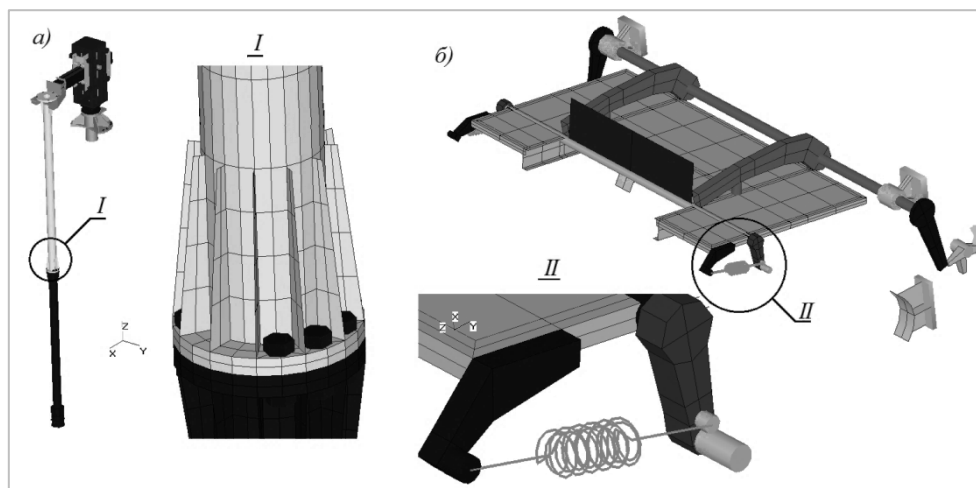


Рис. 2. Пример расчета штанги робота (а) чистильщика и рычагов люка защиты пусковой остановки (б)

Работа в разных отраслях постоянно приводит к эффективным решениям на основе использования типичных для одной области алгоритмов в другой области. Наиболее ярким примером этого может служить виртуальная топология, являющаяся важным отличием программы. Идея ее возникла при поиске эффективного решения для моделирования крепежных элементов. Это исключительно важно для атомной энергетики, так как при расчетах сборок сосудов высокого давления число болтов достаточно велико и их моделирование требовало либо специальных приемов, либо упрощения модели. Для решения проблемы разработана библиотека крепежных элементов, представляющих собой комбинацию контактных и стержневых элементов. Библиотека состоит из головок крепежных элементов, гаек, шпилек и резьбы. Комбинации элементов позволяют соединять части модели и создавать предварительный натяг.

При этом требуют незначительных ресурсов и имеют два важных отличия:

- Независимость от смежных элементов;
- Формирование связи с узлами, расположенными в контролируемой элементом области.

Для крепежных элементов это узлы, расположенные на контактных поверхностях. Число связываемых узлов может меняться.

Это свойство получило название виртуальная топология.

Данный подход был использован для элементов, моделирующих сварные швы, подшипники и пр. Кроме того, виртуальные свойства распространены и на традиционные 1D, 2D и 3D элементы. Здесь они используются, в основном, для согласования сеток с разным шагом.

Таким образом, отличительными особенностями «Зенит-95» являются:

- возможность решения задач как в рамках традиционного для МКЭ допущения о малых перемещениях, так и задач динамики сложных нелинейных механических систем с переменной структурой, элементы которых совершают большие кинематические перемещения и одновременно испытывают упругие деформации.

- Возможность решения задач динамики сложных систем, содержащих различные по физическим принципам действия элементы.

- Наличие развитой виртуальной топологии облегчающей формирование сложных моделей.

К настоящему моменту «Зенит-95» внедрен и является одним из основных продуктов для проектирования на многих отечественных предприятиях атомной, аэрокосмической, авиационной, судостроительной, машиностроительной, строительной отраслях, а также в области атомного энергомашиностроения, среди которых НИЦ «Курчатовский институт», АО «НИКИЭТ» им. Доллежаля, АО «Атомпроект», филиал ОКБ им. Хруничева (г. Ковров), АО «Калужский турбинный завод», завод им. В. Я. Климова (СПб), ЦКБ МТ «Рубин» (СПб), ВНИИАМ (г. Москва), ЦКБ «Титан» (г. Волгоград), ОАО «ГИПРОСПЕЦГАЗ» (СПб), Научно-исследовательский центр 26 ЦНИИ МО РФ (СПб), филиал ВНИИАМ в г. Волгодонске, ОАО «Ижорские заводы» (СПб), АО «Бриг» (СПб) и многие другие предприятия

«Зенит-95» использовался при реализации многих известных проектов, среди которых можно отметить только следующие:

КБ «Арматура» (филиал ОКБ им. М.В. Хруничева, г. Ковров). *Выполняемые работы:* расчеты динамики и прочности систем стыковки и отвода коммуникаций при старте космических ракет. *Проекты:* «Морской старт» Российско-Индийский проект для запуска индийской ракеты GSLV, «Ангара» и др.

ОАО «Гипроспецгаз». *Выполняемые работы:* расчеты на самокомпенсацию трубопроводных обвязок компрессорных станций, расчеты прочности обвязок газоперекачивающих агрегатов (ГПА), расчет прочности металлоконструкций, расчеты прочности опор трубопроводов, расчет прочности трубопроводов узлов замера расхода газа. *Проекты:* «Голубой поток», «Ямал-Европа», «Южный поток», «Северный поток» и др. [5]

Завод им. В. Я. Климова. *Выполняемые работы:* расчеты прочности элементов конструкций, расчеты пробиваемости стенок корпусов авиационных двигателей деталями роторов при разрушении, моделирование кинематики и прочностной расчет регулятора вектора тяги новейшего реактивного двигателя.

ЦКБ МТ «Рубин». *Выполняемые работы:* расчет прочности элементов конструкций и динамики сложных систем с гидро- и пневмоприводами. Расчет динамических процессов в нелинейных механических системах. Кинематический и силовой анализ механизмов. Расчет гидравлических систем. Расчет параметров теплофизических процессов. Расчет динамики нефтяных платформ. *Проекты:* «Булава-30», «Лада» и др.

АО «Бриг» Моделирование и расчеты узлов и элементов подводного добычного комплекса для Южно-Кириного газоконденсатного месторождения.

В качестве одного из примеров применения «Зенит-95» на рис.3 представлен пример расчета раскрытия антенны космического аппарата, в котором задействовано несколько тысяч конструктивных элементов.

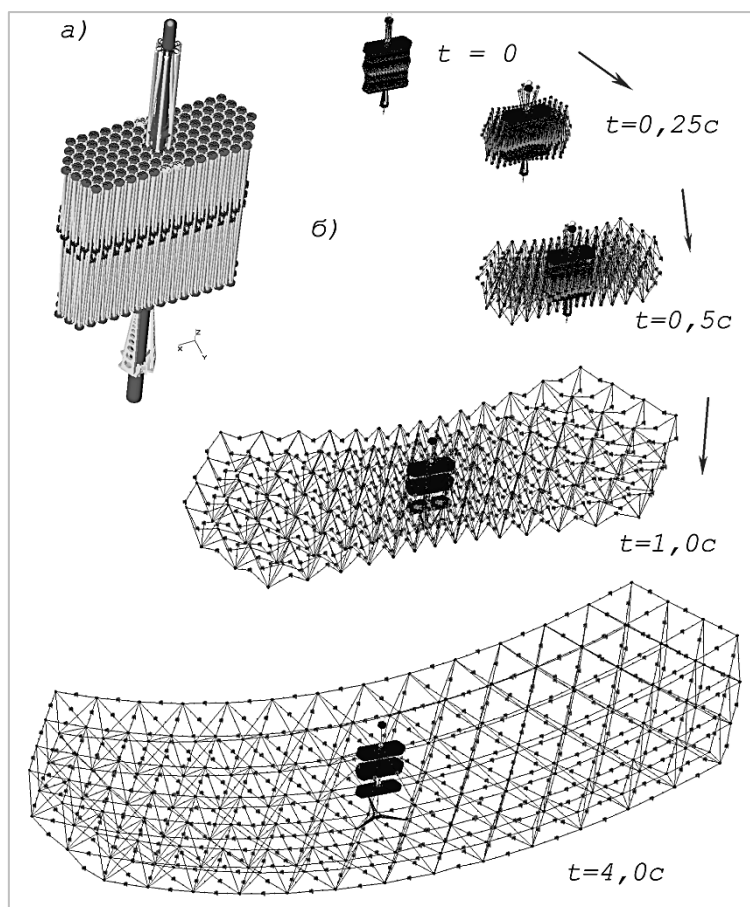


Рис. 3. Моделирование процесса раскрытия антенны космического летательного аппарата [7]. Используются стержневые, объемные, пластинчатые элементы, твердые тела, шарниры, пружины, фиксаторы: а – исходное положение элементов, б – положения модели в различные моменты времени

По результатам расчетов определяется как положение конструкции в пространстве в целом, так и параметры движения отдельных элементов и их напряженно-деформированное состояние.

Представленный конечно-элементный пакет «Зенит-95» является мощным, высокоэффективным и во многом уникальным средством решения широкого круга инженерных задач и составляет реальную альтернативу любому из известных аналогичных иностранных продуктов.

Библиографический список

1. Курков С. В. Метод конечных элементов в задачах динамики механизмов и приводов. СПб: Политехника, 1991.
2. Курков С. В. Применение метода конечных элементов для динамического анализа геометрически нелинейных систем // Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов: доклады XVII международной конференции. Доклады. СПб: НИИХ СПбГУ, 1999.
3. Курков С. В. Программный комплекс расчета динамики и прочности сложных нелинейных физически неоднородных механических систем «Зенит-95» // Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов: доклады XVIII международной конференции. Доклады. СПб: НИИХ СПбГУ, 2000.
4. Курков С. В. Особенности решения контактных задач методом конечных элементов при больших перемещениях // Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов: доклады XVIII международной конференции. Доклады. СПб: НИИХ СПбГУ, 2000.
5. Курков С. В. Моделирование динамических процессов в гидро- и пневмоприводах в программном комплексе «Зенит-95» // Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов: доклады XIV международной конференции. Доклады. СПб: НИИХ СПбГУ, 2001.
6. Курков С. В., Катилина Н. Н. Универсальная программа расчетов конструкций методом конечных элементов «Зенит-95» // Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов: Труды XX международной конференции. СПб: 24 – 26 сентября, 2003 г.
7. Курков С. В., Готовский И. Е. Моделирование динамики процесса раскрытия космического аппарата методом конечных элементов // Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов: Труды XX международной конференции. СПб: 24 – 26 сентября, 2003 г.

УДК 620.18

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ПЕЧАТИ НА ПОРИСТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А. А. Киршина, А. Ю. Киршин, А. В. Побелянский

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

На сегодняшний день, аддитивные технологии занимают значительное место в области промышленности. По данным международной исследовательской компании IDC в 2018 г. аддитивные технологии увеличили темпы своего роста на 20% по сравнению с прошлым годом [1]. В основном, это связано с тем, что аддитивное производство нашло применение в различных сферах профессиональной деятельности, в частности, в области авиа- и двигателестроения. Россия находится на начальной стадии формирования компетенций в области аддитивной промышленности, при этом основные проблемы связаны с высокой стоимостью печати, связанной с отсутствием налаженного производства 3D-принтеров и расходных материалов.

Двигателестроение ставит перед аддитивной промышленностью повышенные требования, которые касаются и качества печати изделий, и возможностей материалов. Высокие тем-