

УДК 004.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СРЕДАХ КОМПЬЮТЕРНОГО ИНЖИНИРИНГА

Граблин И.П.

Донецкий национальный технический университет
кафедра компьютерных систем мониторинга

E-mail: ggrablin@gmail.com

Аннотация

Граблин И.П. Моделирование упругих элементов в средах компьютерного инжиниринга. Рассмотрены основные программные пакеты инженерного анализа. Изучены основные моменты при работе в программной среде ABAQUS, в частности моделирование нелинейных элементов. Проведен расчет гиперупругого материала на примере резинового амортизатора.

.Общая постановка проблемы

Резинотехнические изделия имеют широкое распространение во многих сферах человеческой деятельности. Они играют весьма важную роль в структурных схемах машин, зачастую определяя их кинематические и динамические характеристики, а так же их работоспособность. В соответствии с особенностями их применения резинотехнические изделия работают в условиях различных нагрузок и вызываемых ими деформаций (сдвиге, сжатии, кручении, сдвиге со сжатием, при сложном напряженном состоянии). Учитывая степень влияния резиновых деталей на судьбу объекта, а также на те последствия, которые могут иметь место в случае гибели объекта или выхода его из эксплуатации, для обеспечения прочности и постоянства размеров конструкций резиновых деталей выполнению их должен предшествовать инженерный расчет. Так как резина обладает высокими эластичными свойствами, инженерный просчет для резинотехнических изделий может являться довольно трудоемким процессом. Для проведения таких инженерных вычислений удобно использовать программные комплексы для проведения компьютерного [инженерного анализа \(CAE\)](#), основывающиеся на методе конечных элементов. Задачей исследования является изучение особенностей работы и расчет гиперупругих элементов в инженерной программной системе конечно-элементного анализа.

Обзор существующих программ инженерного анализа

Практически все современные расчёты на прочность проводят, используя инженерные программные системы конечно-элементного анализа. К данным системам относятся такие программные комплексы: [ANSYS](#), [FEM Models](#), [Nastran](#), [ABAQUS](#), [DEFORM-2D/3D](#), [Impact](#), [LS-DYNA](#), [SAMCEF](#), [Temper-3D](#), [COMSOL Multiphysics](#), [Zebulon](#), [ПК Лири](#) и др.

Из перечисленных расчетных систем конечно-элементного анализа наибольшее распространение получили такие комплексы, как [ANSYS](#), [Nastran](#) и [ABAQUS](#). Для дальнейшего исследования проблемы из трех комплексов инженерного анализа был выбран пакет ABAQUS, так как эта система имеет более широкие возможности при решении задач нелинейности. ABAQUS имеет большой выбор элементов и моделей, описывающих нелинейное поведение материалов. Также ABAQUS имеет демо-версию ABAQUS Student Edition, свободно распространяемую компанией «ТЕСИС» вместе с методическим пособием на русском языке. Для проведения исследования использовалась именно эта версия пакета.

Возможности программного пакета ABAQUS

ABAQUS – программный комплекс конечно-элементных прочностных расчетов. Данный программный комплекс позволяет получать точные и достоверные решения для самых сложных линейных и нелинейных инженерных проблем.

Отличительной особенностью ABAQUS является возможность использования собственных подпрограмм, что позволяет создавать свои модели поведения различных материалов, конечные элементы и типы нагрузок. ABAQUS имеет встроенный язык программирования Python, который позволяет создавать собственные графические оболочки, адаптированные для решения конкретных типов задач.

Для проведения нелинейного анализа программный комплекс обладает большим количеством нелинейных моделей материалов, что позволяет эффективно и с большой точностью решать задачи, содержащие нелинейные виды материалов, с учетом их реологических свойств.

Для того, чтобы определить зависимость напряжения от деформации в гиперупругом материале, ABAQUS использует потенциальную энергию деформации (U), а не модуль Юнга и коэффициент Пуассона. В этом пакете имеется несколько различных моделей, описывающих потенциальную энергию деформации: полиномиальная модель Ривлина, модель Огдена, модель Арруда-Бойса, модель Марлоу и Ван-дер-Ваальсова модель. Также можно использовать частные виды полиномиальной модели Ривлина, такие как, модель Муни-Ривлина и нео-Гуковская модель.

При решении нелинейных задач для гиперупругих материалов чаще всего используются полиномиальная модель Ривлина и модель Муни-Ривлина.

Полиномиальная модель имеет вид:

$$U = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{eq} - 1)^{2i},$$

где: U - потенциальная энергия деформации; J – коэффициент упругости тела; I_1 и I_2 - меры деформации материала; N , C_{ij} и D_i - являются параметрами материала, которые могут зависеть от температуры. C_{ij} – параметры, описывающие сдвиг материала, D_i – параметр, описывающий сжимаемость материала. Если материал полностью несжимаемой, все значения D_i устанавливаются в ноль, и вторая часть уравнения может не учитываться.

Модель Муни-Ривлина является полиномиальной моделью Ривлина первой степени и имеет такой вид:

$$U = C_{01}(I_2 - 3) + C_{10}(I_1 - 3) + D(J_{eq} - 1)^2$$

Чтобы описать гиперупругие свойства материала при помощи полиномиальной модели и модели Муни-Ривлина, пользователь должен задать параметры C_{ij} и D_i . Данные параметры могут быть определены путем проведения тестовых экспериментов для нахождения механических свойств материала.


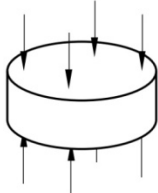
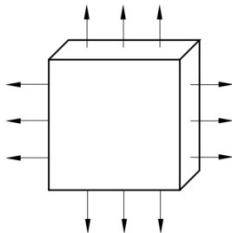
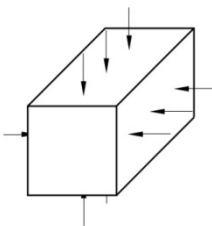
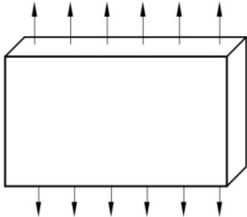
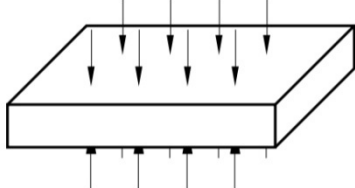
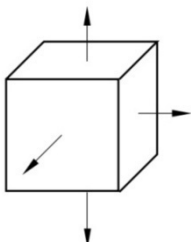
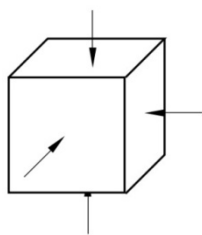
В случае, когда параметры, описывающие сдвиг и сжимаемость материала неизвестны, в ABAQUS существует возможность задавать свойства гиперупругому материалу при помощи экспериментальные тестовых данных. Данные представляют собой таблицу значений, описывающих зависимость напряжения от деформации. Используя метод наименьших квадратов, из полученных данных ABAQUS вычисляет параметры для модели потенциальной энергии деформации. В отличие от пластичных материалов, тестовые данные для гиперупругих материалов должны задаваться в виде номинального напряжения и номинальной деформации. В программе ABAQUS существует возможность использования данных, которые соответствуют следующим экспериментальным тестам над материалом:

- одноосные растяжения и сжатия,
- двуосные растяжения и сжатия,

- плоские растяжения и сжатия,
- объемные растяжения и сжатия.

Перечисленные виды деформаций показаны в таблице 1:

Таблица 1 – Виды деформаций

	Растяжение	Сжатие
Одноосные деформации		
Двуосные деформации		
Плоскостные деформации		
Объемные деформации		

Для того, чтобы получить более точную и стабильную модель материала, необходимо задавать тестовые данные для более чем одного деформированного состояния. Также в программе можно использовать функцию оценки материалов. Данная функция позволяет сымитировать один или несколько стандартных тестов для экспериментальных данных, а также для моделей гиперупругости, использующих параметры, рассчитанные из тестовых данных. По полученным результатам расчетов можно построить графики зависимости деформации-напряжения и сравнить тестовые данные с моделями энергии деформации. Для более эффективного моделирования необходимо выбрать ту модель, график которой точнее совпадает с графиком тестовых данных.

Расчет гиперупругого элемента

Выявление нелинейности гиперупругих элементов может осложняться из-за ряда некоторых причин. Гиперупругие элементы могут иметь самые разнообразные формы (цилиндрические, конические, цилиндрические с отверстиями, конические с отверстиями, параллелепипедные, составные и др.) а также могут состоять из нескольких типов материалов, обладающими различными свойствами гиперупругости.

Рассмотрим один из методов расчета нелинейного поведения гиперупругого элемента

на примере цилиндрического амортизатора. Данный амортизатор состоит из двух стальных пластин-оснований и основной резиновой части. Диаметр амортизатора – 0,1м, высота металлических частей – 0,005м, высота резиновой части 0,09м. На рисунке 1 изображено половинное осевое сечение амортизатора.



Рисунок 1 – Половинное осевое сечение амортизатора

Свойства резине заданы при помощи тестовых данных, описывающих поведение материала при одноосном сжатии.

Таблица 2 – Тестовые данные для резины

Напряжение σ (Па)	Отн. деформация ε
145415	0.05
290830	0.1
436245	0.15
581660	0.2
727075	0.25
872490	0.3
1017905	0.35
1163320	0.4
1308735	0.45
1454150	0.5

К нижнему основанию построенной модели поочередно прикладывается нагрузка от 100000Па до 600000Па с шагом в 100000Па. После каждого нагружения амортизатор некоторым образом деформируется (рис. 2).

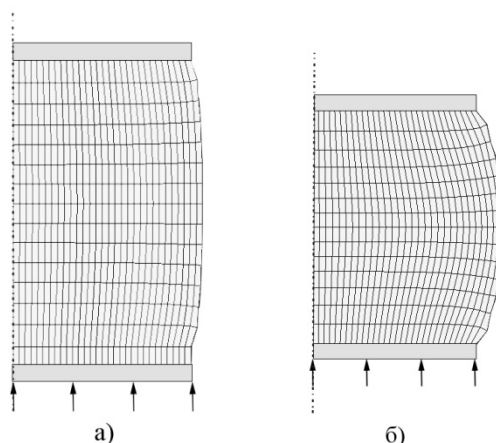


Рисунок 2 – Деформации модели амортизатора при нагрузке 300000Па (а) и при нагрузке 600000Па (б)

Далее измеряется перемещение нижнего основания относительно его первоначального положения. После проведения всех расчетов необходимо сформировать таблицу данных: в первый столбец вписываются значения силы нагрузки, во второй столбец – величина нагрузки, в третий – соответствующие нагрузкам перемещения основания.

Таблица 3 – Таблица результатов

Сила нагрузки F (Н)	Нагрузка P (Па)	Деформация x (м)
785.4	100000	0.00264151
1570.8	200000	0.00540192
2356.2	300000	0.00836786
3141.6	400000	0.0117408
3927	500000	0.0164396
4712.4	600000	0.0187516

Используя полученную таблицу можно построить график зависимости деформации от приложенной нагрузки, из которого можно выявить нелинейность поведения гиперупругого материала, выражающуюся в нелинейном изменении коэффициента жесткости резины.

Выводы

В ходе проведения исследования были изучены основные принципы работы в программном комплексе инженерного анализа ABAQUS. Данная инженерная система позволяет получать наиболее точные результаты расчета (варьируя размерность и вид конечно-элементной сетки, изменяя количество итераций в одном шаге расчета и др.). ABAQUS является удобным инструментом при решении задач нелинейности и расчете гиперупругих элементов.

Список литературы

1. Крылов, Я. В. Курс лекций по основам численного расчета на прочность в программном комплексе ABAQUS 6.4 / CAE [Текст] / Я. В. Крылов // ФАЛТ МФТИ, ТЕСИС – Жуковский, 2003. – С. 4-31.
2. Getting Started with Abaqus, Interactive Edition, Version 6.8 [Текст]/ Dassault Systèmes, 2008. – С. 10.48-10.71.
3. Нуштаев, Д.В. Abaqus. Пособие для начинающих. Пошаговая инструкция.[Текст] / Д.В. Нуштаев, С.Н. Тропкин // ООО "ТЕСИС". – Москва, 2010