

ПРИМЕНЕНИЕ SIMULIA/ ABAQUS ПРИ ИЗУЧЕНИИ КУРСА МЕХАНИКИ ТВЕРДОГО ДЕФОРМИРУЕМОГО ТЕЛА: РЕОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

О.Я. Извеков¹, Д.В. Корнев²

¹МФТИ (ГУ), г. Долгопрудный, Россия ²ЦНИИ МАШ, г. Королев, Россия

В последние годы появилась тенденция при освоении сложных наукоемких дисциплин, наряду с теоретическими основами, лабораторными работами и практическими занятиями, в образовательный процесс встраивать элементы, основанные на использовании информационных технологий [0]. При этом, прикладные пакеты становятся не целью, а неотъемлемой частью образовательного процесса, полезным инструментом, с помощью которого можно существенно повысить качество усвоения лекционного материала. Настоящая работа была начата в 2010 -2011 годах в духе указанных тенденций при поддержке Межвузовской комплексной работы «Инновационные технологии образования» (МКР ИТО).

Методы механики сплошной среды помимо традиционных приложений гидро- газодинамики и механики твердого деформируемого тела применяются в нефтяном инжиниринге, геомеханике, строительной механике и др. для описания движения природных жидкостей в нефте- газоносных пластах, деформирования и разрушения горных пород, усадки зданий и т.д. Постановка задачи в механике сплошной среды подразумевает формулировку законов сохранения массы, импульса и энергии, задание граничных и начальных условий. Система законов сохранения должна быть замкнута т.н. определяющими уравнениями (или по-другому, материальными уравнениями, уравнениями состояния), которые определяют конкретные свойства материала. Система законов сохранения представляет собой систему уравнений с частными производными, аналитическое решение которой существующими методами ограничено лишь узким кругом геометрически тривиальных границ.

Не удивительно, что в последние годы неуклонно возрастает значение программных пакетов, предназначенных для инженерных расчётов, анализа и симуляции физических процессов. Применение ЭВМ позволяет решать сложнейшие прикладные задачи, такие как расчет прочности ракетного двигателя или поведение нефтяного месторождения с большим числом скважин и сложной геологической структурой. С другой стороны, эффективное применение программных средств предполагает уверенное владение основами механики сплошных сред, т.к. надежность результата численных расчетов может зависеть от правильной постановки граничных условий и выбора адекватной модели материала в рассматриваемых условиях. К тому же, современные пакеты позволяют не только пользоваться уже встроенными моделями материалов, но и создавать свои программные модули, что делает их в руках грамотного специалиста действительно мощным инструментом для инженерных расчетов и научных изысканий.

Библиотека материалов в ABAQUS позволяет моделировать большинство конструкционных материалов, включая металлы, пластики, резины, пенопласты, композиты, сыпучие грунты, скальные породы, обычные и армированные бетоны (ABAQUS Analysis User's Manual, Part V, "Materials").

С 2012 года в магистратуре МФТИ читается курс, в некотором роде обобщающий материал курсов лекций и практических занятий по механике сплошной среды, входящих в общепрофессиональную подготовку в МФТИ по направлению «Прикладные математика и физика». В новом курсе делается акцент на едином термодинамическом подходе, который может помочь сориентироваться в пестром разнообразии используемых в механике моделей сплошных сред. Цель курса – дать представление об основных реологических моделях сплошных сред и применении метода конечных элементов в задачах из области механики твердого деформируемого тела, механики грунтов и нефтяного инжиниринга. Данный курс может служить первым знакомством с теорией определяющих соотношений, разработанной Дж. Трусделлом и его школой в середине прошлого века [0, 0].

Изложение материала основано на приближении малых деформаций. Авторы пошли на этот шаг исключительно для облегчения первоначального восприятия основных идей, хотя это и не всегда обосновано с точки зрения нужд инженерных расчетов. С одной стороны математические аспекты конечных деформаций в механике хорошо разработаны, а с другой стороны [ABAQUS](#) приспособлен для расчетов больших деформаций, которые необходимы в ряде случаев (краш-тесты автомобилей, большие деформации резиноподобных оболочек и т.д.)

Центральной частью курса является изложение теории определяющих соотношений, основанной на фундаментальных принципах – объективности (независимости определяющих соотношений от систем отсчета), локальности (запрет дальнего действия), термодинамической согласованности. Второе начало неравновесной термодинамики берется в форме неравенства Клаузиуса – Дюгема (неравенства энтропии), которое согласно К. Трусделлу трактуется как ограничение на вид определяющих соотношений, а не как ограничение на возможные процессы [0, 0].

Материалы классифицируются по типу памяти [0, 0]: упругие (отсутствует память о процессе нагружения), вязкие, упруго-вязкие, вязко-упругие (бесконечно короткая память, затухающая память), пластичные (незатухающая память). Для тел с памятью используется метод внутренних переменных [0, 0, 0]. Для каждого типа материалов проводится термодинамический анализ, выводятся термодинамически согласованные определяющие соотношения, включающие кинетические уравнения для внутренних параметров. В теории пластичности рассматривается ассоциированный и неассоциированный законы течения, изотропное и трансляционное упрочнение [0, 0].

В практической части курса на задачах из различных областей механики твердого деформируемого тела рассматриваются возможности использования ABAQUS для проведения вычислительного эксперимента, целью которого является максимально подробное воспроизведение, в том числе визуализация изучаемого явления, анализ и сопоставление получаемых численных данных с теоретическими результатами. Среди примеров – моделирование концентраторов напряжений в упругих и упругопластических телах, изгиб упруго-пластических балок, ползучесть нагретых металлических оболочек и лопаток турбины и т.д.

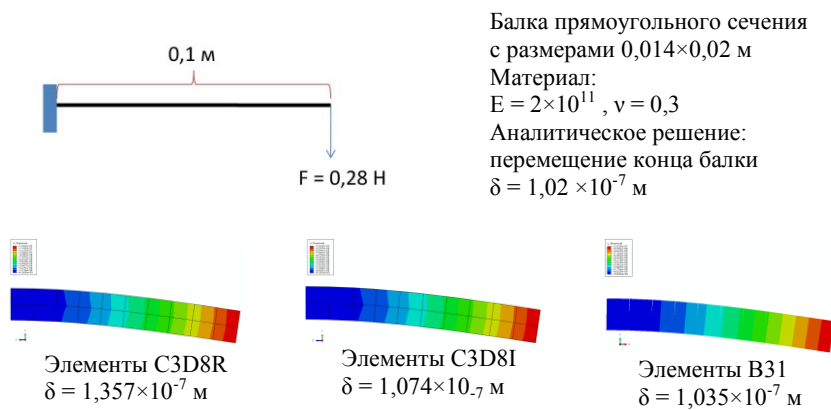


Рис. 1 - Расчет изгиба упругой балки с использованием различных типов конечных элементов

По мотивам курса подготовлено к печати учебное пособие. В пособии изложены основы построения определяющих соотношений и разобраны иллюстрирующие примеры с помощью конечно-элементного пакета SIMULIA/ ABAQUS. При этом не преследуется цель научить основам SIMULIA/ ABAQUS, для этого авторы рекомендуют пособия «[ABAQUS для начинающих](#)» и «[Применение SIMULIA/ABAQUS в инженерных задачах](#)», подготовленные сотрудниками компании ТЕСИС [8].

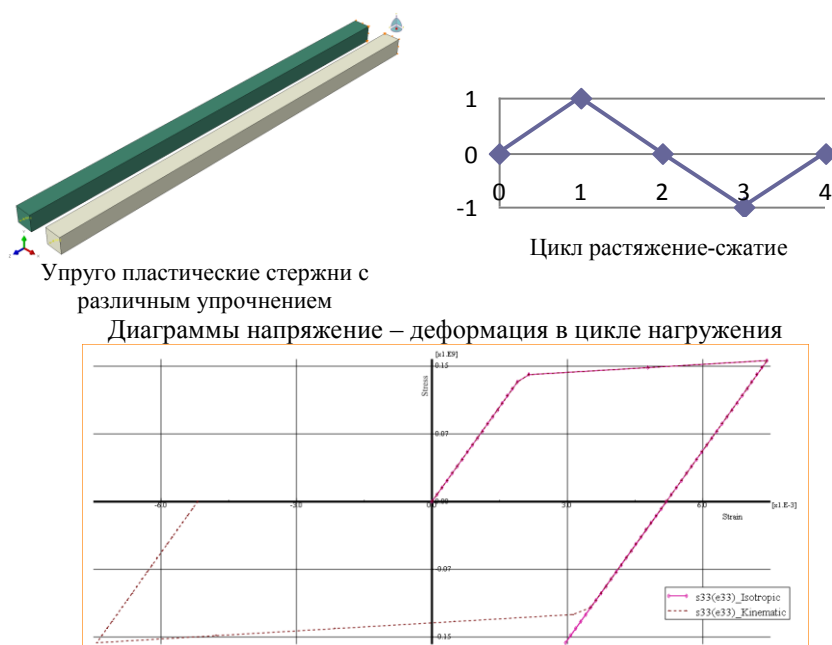


Рис. 2 - Сравнение трансляционного и изотропного упрочнения

[Студенческая версия SIMULIA/ABAQUS](#) распространяется свободно, таким образом, любой студент может проделать предложенные упражнения самостоятельно даже за пределами учебной аудитории. Входные файлы примеров планируется разместить в интернете в свободном доступе [0], что позволит самостоятельно модифицировать модели для решения более сложных задач того же класса.

Пособие может быть полезно для преподавателей и студентов университетов и других вузов, обучающихся по направлениям и специальностям, в которых заметное место уделяется изучению механики твердого деформируемого тела. Инновационность методики состоит в том, что она дополняет существующие лекционные и семинарские занятия, вызывает интерес студентов, повышает эффективность усвоения различных разделов механики твердого деформируемого тела.

Список литературы

1. Кондранин Т.В., Ткаченко Б.К., Березникова М.В., Евдокимов А.В. и др. Информатика, как инструментарий изучения наукоемких дисциплин (механика, математика и нефтяной инжиниринг) / Инновационные и наукоемкие технологии в высшем образовании России: Межвузовский сборник научно-методических трудов. – М., 2008.
2. Трусделл К. Первоначальный курс рациональной механики сплошных сред. – М.: Мир, 1975.
3. Кондауров В.И., Фортвов В.Е. Основы термомеханики конденсированной среды. – М.: Издательство МФТИ, 2002.
4. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1979.
5. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969.
6. Жермен П. Курс механики сплошных сред. – М.: Высшая школа, 1983.
7. Maugin G.A. The thermomechanics of plasticity and fracture. - Cambridge University Press, 1992
8. <http://tesis.com.ru/software/abaqus/applian.php>
9. http://applmech.fizteh.ru/library/books/a_4r9jp0.html