

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ АРХИТЕКТУРЫ И СПРОИТЕЛЬНЫХ НАУК

Научный совет «Цифровые технологии в строительстве и архитектуре»

С В И Д Е Т Е Л Ь С Т В О

№07/SIMULIA Abaqus/2024

о верификации программного средства, применяемого для решения задач теплопроводности и фильтрации, определения статического, температурного и динамического напряженно-деформированного состояния конструкций, зданий и сооружений

Программное средство: SIMULIA Abaqus – универсальный программный комплекс для решения задач теплопроводности и фильтрации, определения статического, температурного и динамического напряженно-деформированного состояния пространственных конструкций, зданий и сооружений с учётом эффектов физической, геометрической, структурной и генетической нелинейностей на основе метода конечных элементов (в том числе, совместно с методом конечных объёмов Эйлера) и бессеточного метода сглаженных частиц.

Разработчик: Dassault Systèmes (Франция)

Заявитель: НИУ МГСУ (Россия), ООО «ГЕСИС» (Россия)

Авторы верификационного отчёта: НИУ МГСУ (Россия)

Дата включения в реестр верифицированных программных средств: 20 марта 2014 года

Срок действия свидетельства: до 20 марта 2034 года

Перечень верифицированных возможностей программного средства SIMULIA Abaqus изложен в Приложении (5 стр.), являющемся неотъемлемой частью Свидетельства, и в верификационном отчёте (4 тома на 610 стр.).

Вице-президент

В.И. Гравуш

Академик-секретарь

Н.И. Карпенко

Председатель Научного Совета

В.Н. Сидоров



ПРИЛОЖЕНИЕ К СВИДЕТЕЛЬСТВУ О ВЕРИФИКАЦИИ ПС №07/SIMULIA Abaqus/2024

Возможности комплекса, подтвержденные верификацией

SIMULIA Abaqus – универсальный программный комплекс для решения стационарных и нестационарных задач теории поля (теплопроводность и фильтрация), расчета статического, температурного и динамического напряженно-деформированного состояния пространственных комбинированных конструкций, зданий и сооружений с учетом эффектов физической, геометрической (большие деформации и(или) большие перемещения), структурной (контакты с трением) и генетической (история возведения и нагружения) нелинейностей на основе метода конечных элементов (в том числе, совместно с методом конечных объемов Эйлера (CEL)) и бессеточный метод сглаженных частиц (SPH).

Виды моделируемых строительных конструкций, зданий и сооружений:

Произвольные пространственные комбинированные (массивно-оболочечно-плитно-стержневые из различных материалов-сред), включая:

- наземные и подземные, высотные и большепролетные, монолитные и панельные, вантовые;
- металлические (сталь, чугун и другие сплавы), бетонные, железобетонные, сталежелезобетонные, резиновые, резинометаллические, грунтовые, каменные, керамические, композитные;
- сложные конструктивные узлы.

Граничные (краевые) условия:

- **Задачи теории поля:**
 - заданная температура (напор воды) в различные моменты времени;
- **Задачи расчета НДС:**
 - заданные перемещения, скорости, ускорения и кинематические связи групп узлов.

Нагрузки и воздействия:

- заданные тепловые потоки (теория поля);
- статические объемные, поверхностные, линейные и узловые силы и моменты, включая температурные, весовые, снеговые, средние ветровые и др.;
- пульсационная (динамическая) составляющая ветровой нагрузки;
- сейсмические, заданные трехкомпонентными спектрами ответа и акселерограммами;
- силовые динамические, заданные временной реализацией;
- вибрационные, заданные амплитудами и частотами воздействия;
- случайные динамические, заданные спектрально (PSD);
- воздушные и наземные (CONWEP) детонационные взрывы;

Типы решаемых задач (виды расчетов):

- стационарные задачи теории поля (теплопроводность, фильтрация и т.п.);
- нестационарные задачи теории поля (теплопроводность, фильтрация и т.п.);
- линейный статический расчёт НДС;

- физически/геометрически/структурно/генетически нелинейный статический расчёт НДС;
- определение J -интеграла и коэффициентов интенсивности напряжений (линейная механика разрушения);
- линейная теория устойчивости (частичная проблема собственных значений);
- нелинейная теория устойчивости и закритическая работа конструкций;
- расчёт собственных частот и форм колебаний в энергетически значимом частотном диапазоне (частичная проблема собственных значений), том числе, с учётом НДС конструкций;
- линейно-спектральная теория сейсмостойкости (на спектры ответа);
- спектральный динамический анализ (с разложением по собственным формам колебаний);
- вынужденные установившиеся колебания;
- вынужденные неустановившиеся колебания (с помощью метода модальной суперпозиции);
- физически/геометрически/структурно/генетически нелинейный динамический (“волновой”) расчёт (явные схемы интегрирования уравнений движения);
- вынужденные случайные колебания;
- анализ чувствительности конструкций.

Модели материалов:

- линейно упругие изотропные, трансверсально-изотропные, ортотропные материалы;
- каучукообразные гиперупругие материалы;
- модель пластичности Мизеса;
- зависимость неупругих свойств от скорости деформирования;
- ползучесть металла;
- модель пластичности Джонсона-Кука;
- расширенные модели пластичности и ползучести Друкера-Прагера;
- модель пластичности Мора-Кулона;
- модели “размазанного” трещинообразования в хрупких материалах;
- модель неупругой работы и повреждаемости хрупких материалов;
- модели разрушения пластичных материалов;
- уравнение состояние Ми-Грюнайзена;
- линейно термоупругие материалы.

Методы решения (расчета):

1. решение результирующих систем линейных алгебраических уравнений равновесия и теории поля (“прямой” с учетом разреженности матриц и итерационный, реализующий метод Крылова с предобуславливанием, использующие метод Ньютона-Рафсона с автоматическим выбором шага приращения нагрузки и уравновешивающими итерациями или метод “квази-Ньютона”);
2. частичной проблемы собственных значений (метод итераций в подпространстве, блочный метод Ланцоша, метод проекций на подпространство, автоматический многоуровневый метод подконструкций (AMS));

3. метод Рикса для задач с большой геометрической нелинейностью, включая учет закритического поведения;
4. неявные схемы интегрирования по времени редуцированных и исходных уравнений динамики (Гильбера-Хьюза-Тейлора (ННТ), метод обратных разностей);
5. схема интегрирования по времени уравнений нестационарной теории поля (метод обратных разностей);
6. явные схемы интегрирования по времени редуцированных и исходных уравнений динамики (метод центральных разностей);
7. метод штрафа, расширенный метод множителей Лагранжа, кинематический метод, прямой метод, общий случай контакта (general contact) и их комбинации для решения контактных задач;
8. прямые методы оптимизации нулевого и первого порядков;
9. деактивация/реактивация КЭ для решения задач, в которых имеет место генетическая нелинейность;
10. суперэлементные схемы произвольной иерархии (статика, переходные процессы, линейная устойчивость, модальный синтез);
11. смешанный подход Эйлера-Лагранжа (CEL);
12. “гидродинамика сглаженных частиц” (SPH).

Набор верифицированных конечных элементов:

Из обширной библиотеки конечных элементов комплекса верифицированы 106 типов КЭ (подробнее см. в Томе 1 верификационного отчёта и матрицах верификации), включая одно-, двух- и трехмерные КЭ, а также их допустимые комбинации в одной КЭ-модели:

1. “элементарные” пружины, массы, демпферы и их комбинации;
2. стержневые, работающие только на растяжение и/или сжатие;
3. балочно-стержневые с различными гипотезами, учитывающие растяжение-сжатие, изгиб, сдвиг, кручение, включая возможную деформацию сечения и эксцентриситет;
4. оболочечные с различными гипотезами (тонко-, средне- и толстостенные пластины и оболочки);
5. элементы для моделирования плоского напряженного, плоского деформированного и осесимметричного состояний;
6. элементы для моделирования объемного напряженно-деформированного состояния;
7. 2-х и 3-х мерные элементы теории поля (теплопроводность, фильтрация и др.);
8. матричные (суперэлементы);
9. эйлеровы элементы (гидродинамика, интенсивные деформации и т.п.);
10. частица (“гидродинамика сглаженных частиц” (SPH)).

Ограничения на размерность:

Размерности КЭ-модели (количество узлов и элементов) и результирующих вычислительных задач (количество степеней свободы, собственных значений, шагов по времени и т.п.) ограничены доступной оперативной и дисковой памятью ЭВМ, разрядностью процессора и операционной системы, располагаемым временем счета (последнее ограничение может быть снято предоставляемыми возможностями рестартов).

Возможно решение задач размерностью в сотни миллионов неизвестных, десятки тысяч собственных частот и форм, особенно при использовании доступной многопроцессорной и кластерной технологии.

Результаты расчетов:

— *Задачи теории поля:*

- узловые температуры (напор жидкости) в заданные моменты времени;
- тепловые потоки и градиенты в КЭ в заданные моменты времени.

— *Задачи расчета НДС:*

- значимые компоненты узловых перемещений (статика), скоростей и ускорений (динамика);
- реакции в граничных узлах (опорах) и давление на винклеровское основание;
- внутренние усилия (силы и моменты) в точках интегрирования КЭ и узлов;
- компоненты деформаций (фактических, номинальных, логарифмических), главные деформации (фактические, номинальные, логарифмические) и эквивалентные деформации (Мизеса и др.) в точках интегрирования КЭ и узлах, с разделением на упругие, неупругие (пластические деформации и деформации ползучести) и температурные;
- компоненты напряжений, главные напряжения, эквивалентные напряжения (Мизеса, Треска, гидростатические) и инварианты напряженного состояния в точках интегрирования КЭ и узлах;
- собственные частоты и формы колебаний (требуемое количество или в заданном частотном диапазоне);
- критические нагрузки и формы потери устойчивости;
- амплитуды перемещений, усилий и напряжений для заданных частот вибрационных нагрузок (АЧХ);
- “статус” контакта, длина/площадь зоны контакта, нагрузки на контактных поверхностях, линиях и узлах (контактная сила, контактное давление, ...);
- коэффициенты интенсивности напряжений и J -интегралы (линейная механика разрушения);
- картины образования трещин в бетонных и железобетонных элементах;
- невязки по силам и перемещениям (нелинейные задачи).

Точность численных результатов:

Зависит от класса (типа) задач, “качества” построенной КЭ-модели (сетки) и, в особенности для нелинейных задач, от выбранного метода (схемы) решения. Подробно – в матрицах верификации для решенных задач.

Для линейных задач при соблюдении известных и документированных требований к моделированию точность определения основных параметров поля, статического и динамического НДС не превышает 1%. Для задач с “глубокой” нелинейностью и (или) при сложных моделях физической нелинейности расхождение с “эталонными” результатами может достигать 15–20%.

Возможность включения собственных конечных элементов, моделей поведения материалов, решателей и т.п.:

Реализована с помощью подключаемых пользовательских подпрограмм.

Сведения о базах данных (библиотеках констант), используемых в ПК

SIMULIA Abaqus:

Встроенных в текст программы физических констант нет. Все физико-механические, геометрические, жесткостные, инерционные и диссипативные характеристики задаются явно в исходных данных.

Официальные эксперты

Главный научный сотрудник
Института проблем механики
им. А.Ю. Ишлинского РАН,
д.ф.-м.н., профессор



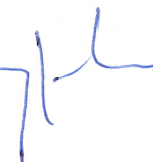
Кузнецов С.В.

Профессор кафедры “Строительная механика
и теория сооружений” Донского
государственного технического университета,
Советник РААСН, д.т.н., профессор



Гайджуров П.П.

Председатель Научного Совета РААСН
“Цифровые технологии в строительстве и
архитектуре”,
Академик РААСН, д.т.н., профессор



Сидоров В.Н.