



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ АРХИТЕКТУРЫ И СТРОИТЕЛЬНЫХ НАУК  
Научный совет «Программные средства в строительстве и архитектуре»

## СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 02/ANSYS/2009

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

*Программное средство:* ANSYS Mechanical – универсальный программный комплекс для решения задач теплопроводности и фильтрации, определения статического, температурного и динамического напряженно-деформированного состояния пространственных конструкций, зданий и сооружений с учетом эффектов физической, геометрической, структурной и генетической нелинейностей на основе метода конечных элементов

*Разработчик:* ANSYS, Inc (США)

*Заявители:* ЗАО «ЕМТ Р», ЗАО НИЦ СтаДиО, ООО «ГК Техстрой», ГОУ ВПО МГСУ (Россия)

*Авторы верификационного отчета:* ЗАО НИЦ СтаДиО, ГОУ ВПО МГСУ (Россия)

*Дата включения в реестр верифицированных программных средств:* 10 июля 2009 года

*Срок действия свидетельства:* до 10 июля 2019 года

Перечень верифицированных возможностей программного средства ANSYS Mechanical изложен в Приложении (на 4 стр.), являющемся неотъемлемой частью настоящего Свидетельства, и в верификационном отчете (4 тома на 1200 стр.)

Вице-Президент

В.И. Травуш

Академик-Секретарь

Н.И. Карпенко

Председатель Научного Совета

В.Н. Сидоров



## ПРИЛОЖЕНИЕ К СВИДЕТЕЛЬСТВУ О ВЕРИФИКАЦИИ ПС № 02/ANSYS/2009

### Возможности комплекса, подтвержденные верификацией

**ANSYS Mechanical** - универсальный программный комплекс для решения стационарных и нестационарных задач теплопроводности и фильтрации, определения статического, температурного и динамического напряженно-деформированного состояния и оптимизации пространственных комбинированных конструкций, зданий и сооружений с учетом эффектов физической, геометрической, структурной (контакты с трением) и генетической (история возведения и нагружения) нелинейностей на основе метода конечных элементов.

#### **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 (стальные, чугунные, сплавы), бетонные, железобетонные, сталежелезобетонные, каменные и кирпичные, деревянные, резиновые и резинометаллические, грунтовые;
- сложные конструктивные узлы.

#### **Граничные (краевые) условия**

*Задачи теплопроводности и фильтрации (и другие задачи теории поля)*

Заданные температуры (фильтрационное давление) в заданные моменты времени;

*Задачи расчета НДС*

Заданные перемещения и кинематические связи групп узлов.

#### **Нагрузки и воздействия**

- заданные тепловые и фильтрационные потоки;
- статические объемные, поверхностные, линейные и узловые силы и моменты, включая температурные, весовые, снеговые, средние ветровые;
- 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).

#### **Типы решаемых задач (виды расчетов)**

- стационарные теплопроводность, фильтрация и т.п.;
- нестационарные задачи теплопроводности, фильтрации и т.п.;
- линейные статические;
- собственные частоты и формы колебаний в энергетически значимом частотном диапазоне (частичная проблема собственных значений);
- линейная устойчивость (критические нагрузки и формы потери устойчивости, частичная проблема собственных значений);
- гармонический анализ (установившиеся колебания-вибрации);
- линейно-спектральная теория сейсмостойкости (расчет на спектры ответа);
- спектральный динамический анализ (с разложением по собственным формам колебаний);

- переходные динамические процессы (прямое интегрирование уравнений движения);
- нелинейные статические и динамические (в том числе, “монтаж” и расчет на прогрессирующее обрушение);
- спектральный анализ случайных колебаний;
- оптимизация геометрической формы и структуры.

#### ***Нелинейные факторы***

- геометрические нелинейности;
- физическая нелинейность (пластичность, ползучесть, вязкопластичность, гиперупругость);
- структурная нелинейность (контакты с трением);
- генетическая нелинейность (история возведения-нагружения).

#### ***Геометрические нелинейности***

- большие деформации;
- большие перемещения;
- упрочнение при нагружении (stress-stiffening).

#### ***Модели поведения материалов (включая физическую нелинейность)***

- упругие изотропные, трансверсально-изотропные, ортотропные;
- пластичность металлов (теория течения с различными упрочнениями);
- ползучесть металлов;
- вязкопластичность металлов;
- образование трещин в бетоне и железобетоне;
- нелинейная модель кирпичной кладки;
- деревянные клееные;
- гиперупругие (несжимаемые) резиноподобные;
- нелинейная модель грунта (Друкера-Прагера).

#### ***Методы решения (расчета)***

Метод конечных элементов в перемещениях (для задач определения НДС) с представительной библиотекой КЭ, включающий эффективные “решатели” большеразмерных статических, нестационарных и динамических линейных и нелинейных задач:

- 1) результирующих систем линейных алгебраических уравнений равновесия и теории поля (прямой с учетом разреженности матриц и итерационный, реализующий метод сопряженных градиентов с предобуславливанием);
- 2) частичной проблемы собственных значений (метод итераций подпространства и варианты блочного метода Ланцоша);
- 3) неявные схемы интегрирования по времени редуцированных и исходных уравнений динамики (Ньюмарка, ННТ);
- 4) схема интегрирования по времени уравнений нестационарной теории поля (Хьюджеса);
- 5) Ньютона-Рафсона с автоматическим выбором шага и уравнивающими итерациями для физически и геометрически нелинейных задач;
- 6) “arc-length” (окаймляющих дуг) для задач с большой геометрической нелинейностью, включая учет закритического поведения;
- 7) методы штрафных функций, множителей Лагранжа и их комбинации-расширения для решения контактных задач;
- 8) прямые методы оптимизации «нулевого» и «первого» порядка;
- 9) статус «жизнь» и «смерть» КЭ для решения, в том числе, генетически нелинейных задач;

10) суперэлементные схемы произвольной иерархии (статика, переходные процессы, линейная устойчивость, модальный синтез).

#### **Набор верифицированных конечных элементов**

Из обширной библиотеки комплекса верифицированы более 50-и типов (подробнее см. в матрицах верификации – составной части верификационного отчета), 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 (в т.ч., вантовые), работающие 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) плоско-напряженного, плоско-деформированного и осесимметричного состояния теории упругости;
- 6) объемного НДС теории упругости;
- 7) контактные (узловые, линейные и поверхностные) с открытием-закрытием и трением;
- 8) 2-х и 3-х мерные для задач теплопроводности и фильтрации;
- 9) матричные (в т.ч., суперэлементы).

#### **Ограничения на размерность**

“Подъемные” размерности КЭ-модели (узлов, элементов) и результирующих вычислительных задач (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).

На использовавшейся ПЭВМ (конфигурация WIN XP 64, ОП 8 Гб, задействовано два процессора) зафиксированы следующие показатели для задач «большой» размерности:

6 300 000 степеней свободы (уравнений) для статических задач – 3957с.;

2 099 400 степеней свободы для частичной проблемы собственных значений (определено 7 низших собственных частот/форм) – 5507с.

Возможно решение задач и существенно большей размерности (десятки миллионов неизвестных, тысячи собственных частот/форм), особенно при использовании доступной многопроцессорной и кластерной технологии. Так, при использовании 30-и ядер вычислительного кластера (CPU: 8 × Intel XEON 5345 (32 × 2,33Ghz cores); Ram total: 80GB; HDD total: 640GB; System Network: Gigabit Ethernet; Rpeak=298.17 GFLOPS) статическая задача с 15 200 181 степенями свободы (уравнениями) решение методом сопряженных градиентов с предобуславливанием (PCG) потребовало от 1328 с (точность  $10^{-4}$ ) до 2733 с (точность  $10^{-6}$ ).

#### **Результаты расчетов**

##### **Задачи теплопроводности и фильтрации**

- узловые температуры (фильтрационное давление) 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 узлах;
- компоненты деформаций, главные деформации и эквивалентные деформации (Мизеса, Треска) в точках интегрирования КЭ и узлах, с разделением на упругие, температурные, пластические и ползучие составляющие;
- компоненты напряжений, главные напряжения и эквивалентные напряжения (Мизеса, Треска) 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 вибороздействия (АЧХ);
- «статус» контакта, длина/площадь, нагрузки на контактных поверхностях, линиях и узлах;
- коэффициенты интенсивности напряжений и J-интегралы (механика разрушения);
- оптимизированные параметры конструкции (форма, сечения и др.);
- картины образования трещин в элементах бетона и железобетона;
- 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 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 прикомпилируемых пользовательских подпрограмм.

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

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

**Официальные эксперты**

Начальник отдела расчетов мостов  
ЗАО “Институт Гипростроймост Санкт-Петербург”  
д.т.н., проф.

 Сливкер В.И.

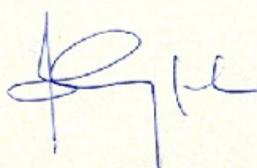
Зав. кафедрой строительной механики  
и вычислительных технологий  
Пермского государственного  
технического университета  
д.т.н., проф.

 Кашеварова Г.Г.

Зав. кафедрой «Инженерная и компьютерная графика»  
Южно-Российского государственного  
технического университета  
д.т.н., проф.

 Гайджуров П.П.

Председатель Научного Совета РААСН  
“Программные средства в строительстве  
и архитектуре”,  
д.т.н., проф.

 Сидоров В.Н.