

## Тестирование производительности комплекса SIMULIA Abaqus на процессорах Intel Core i7

В отчете приводятся результаты тестирования производительности конечно-элементного программного комплекса для прочностных расчетов [SIMULIA Abaqus](#) на рабочей станции с процессором Intel Core i7 (ядро Nehalem). Рабочая станция для тестирования была предоставлена компанией [R-Style](#).

В [предыдущем отчете](#) были приведены результаты тестирования на этой же рабочей станции производительности программного [комплекса DEFORM](#) для моделирования процессов обработки металлов давлением.

Ранее уже [отмечалось](#), что программный комплекс [FlowVision](#) (решение гидродинамических задач) при расчетах на рабочих станциях с процессорами Intel на ядре Nehalem демонстрирует существенный (до 2 раз) прирост производительности.

Таким образом, эта работа завершает цикл тестирования основных инженерных программ, предлагаемых компанией ТЕСИС, на вычислительной технике, основанной на последнем поколении процессоров компании Intel.

Для тестирования использовался набор стандартных тестовых задач SIMULIA Abaqus. Этот набор охватывает наиболее часто используемые классы задач для основных решателей - **Abaqus/Explicit** и **Abaqus/Standard**. Краткое описание и основные параметры тестовых задач [1] приведены в приложении 1. Расчеты проводились на версии Abaqus 6.9.1.

Для сравнения были проведены расчеты на рабочей станции на процессоре Intel Core 2 Quad, кроме того использовались результаты приведенные в [2].

Критерием производительности являлось время с момента запуска до момента завершения расчёта. Во время проведения расчетов никакие другие задачи на ПК не запускались. Коэффициент производительности (ускорение) определялся как отношение времен счета на «эталонном» и тестируемом ПК с поправкой на частоты процессоров, т.е. по формуле:

$$K_{np} = (T_{et} / T_t) * (H_{et} / H_t)$$

где  $T_{et}, T_t$  - общее время расчета на «эталонном» и тестируемом ПК соответственно,

а  $H_{et}, H_t$  - частоты процессоров «эталонного» и тестируемого ПК.

Конфигурация тестируемой рабочей станции компании R-Style:

- материнская плата: Intel DX58SO, LGA1366
- процессор: Intel Core i7 965 Extreme, 3.2MHz, 4-х ядерный, с технологией Hyper Treading
- оперативная память: 6 ГБ DDR3 (3x2 ГБ)
- дисковая подсистема: WD 250 ГБ SATA, SATAII, 32 Mb
- видеоподсистема: Nvidia GeForce 9400GT 512МБ
- операционная система: Microsoft Windows Vista Ultimate x64 SP1.

Конфигурация рабочей станции с процессором Intel Core 2 Quad:

- материнская плата: ASUS P5Q-EM, s775
- процессор: Intel Core 2 Quad Q9400, 2.66 ГГц, 4-х ядерный
- оперативная память: 4 ГБ DDR2 800 (2x2 ГБ)
- дисковая подсистема: 160ГБ SATAII, Raid 0 из 2-х дисков Seagate 500ГБ SATAII, 32 Mb.
- видеоподсистема: встроенная, Intel G45
- операционная система: Red Hat 4.8 AS x64

## Результаты тестирования

Во всех таблицах ниже приведены полные времена решения в секундах (wall clock time) тестовых задач, обозначенных как E1...E6...S1...S6. Задачи E1...E6 используют решатель Abaqus/Explicit, задачи S1...S6 - решатель Abaqus/Standard.

В табл.1 даны времена решения тестовых задач на рабочей станции R-Style при счете с использованием различного числа ядер.

Табл.1

| рабочая станция R-Style: Intel Core i7 965, 3.2MHz |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Кол-во ядер  | E1          | E2          | E3          | E4          | E5          | E6          | S1          | S2a         | S3a         | S3b         | S4a         | S4b         | S6          |
| 2  | 9686        | 5138        | 4520        | 434         | 2613        | 4921        | 51          | 1752        | 242         | 8871        | 643         | 18273       | 2735        |
| 4  | 7453        | 2976        | 2 926       | 331         | 1426        | 3318        | 41          | 1223        | 256         | 8258        | 355         | 16183       | 1803        |
| 6  | 5636        | 3 136       | 2590        | 288         | 1459        | 3136        | 43          | 1138        | 252         | 9336        | 337         | 14367       | 1817        |
| <b>02/04*</b>                                      | <b>1,30</b> | <b>1,73</b> | <b>1,54</b> | <b>1,31</b> | <b>1,83</b> | <b>1,48</b> | <b>1,24</b> | <b>1,43</b> | <b>0,95</b> | <b>1,07</b> | <b>1,81</b> | <b>1,13</b> | <b>1,52</b> |

\* – отношение времен счета на 2-х и 4-х ядрах

Видно, что все задачи для решателя Abaqus/Explicit и многие задачи для Abaqus/Standard хорошо масштабируются при переходе от 2-х к 4-м ядрам. Особняком стоят задачи S3 и S4b. Как указано в [1], параллелизация для задач определения собственных частот (задача S3) не эффективна и, кроме того, результат сильно зависит от объема временных данных записываемых на жесткий диск, который особенно велик для задачи S3b. Низкая масштабируемость задачи S4b объясняется как большим объемом данных записываемых на жесткий диск, так и малым числом итераций (см. прил.1). Начинают проявляться недостатки конфигурации тестируемой станции...

Использование технологии Hyper Treading (расчеты с использованием 6-ти ядер) в зависимости от задачи может дать как положительный, так и отрицательный эффект.

В табл. 2 приведены времена решения тестовых задач на рабочей станции с процессором Intel Nehalem в сравнении с «эталонным» ПК на процессоре предыдущего поколения Intel Core 2 Quad при использовании 4-х ядер.

Табл.2

| рабочая станция R-Style: Intel Core i7 965, 3.2MHz |             |             |             |             |             |             |             |             |             |            |             |             |             |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Кол-во ядер  | E1          | E2          | E3          | E4          | E5          | E6          | S1          | S2a         | S3a         | S3b        | S4a         | S4b         | S6          |
| 4  | 7453        | 2976        | 2926        | 331         | 1426        | 3318        | 41          | 1223        | 256         | 8258       | 355         | 16183       | 1803        |
| «эталонный» ПК: Intel Core 2 Quad Q9400, 2.66 ГГц  |             |             |             |             |             |             |             |             |             |            |             |             |             |
| 4  | 10895       | 4727        | 4860        | 442         | 1701        | 5564        | 67          | 2137        | 326         | 8951       | 949         | 18733       | 2460        |
| <b>ускорение</b>                                   | <b>1.21</b> | <b>1.32</b> | <b>1.38</b> | <b>1.11</b> | <b>0.99</b> | <b>1.39</b> | <b>1.36</b> | <b>1.45</b> | <b>1.06</b> | <b>0.9</b> | <b>2.22</b> | <b>0.96</b> | <b>1.13</b> |

Видно, что выигрыш при использовании процессоров на ядре Nehalem может быть весьма значительным.

Стал более ясен основной недостаток конфигурации тестируемой станции - недостаточная производительность её дисковой подсистемы. На ПК на Intel Core 2 Quad жесткие диски, использовавшиеся для записи временных файлов Abaqus, работали в режиме Raid 0. На тестируемой рабочей станции установлен один жесткий диск, с которого загружается и операционная система и Abaqus и на него же идет запись/считывание временных файлов Abaqus. Именно этим вызвана её малая производительность на задачах S3 и S4b в сравнении с ПК на Intel Core 2 Quad и слабая масштабируемость на этих же задачах от числа ядер, которую мы отмечали выше.

Попробуем сравнить тестируемую рабочую станцию с рабочими станциями и серверами на процессорах Xeon предыдущих поколений. На сайте [1], где приведены данные по производительности Abaqus на рабочих станциях и серверах различной конфигурации, были выбраны следующие конфигурации для такого сравнения:

Рабочая станция на Intel Xeon X3360, 2.83GHz:

- процессор: Intel Xeon X3360 Quad-core, 2.83GHz – 1 шт.
- оперативная память: 4 GB
- дисковая подсистема: single 300 GB SATA
- операционная система: Microsoft Windows XP Pro SP2 x64

Сервер на Intel Xeon E5450:

- процессор: Intel Xeon E5450 Quad-core, 3.0 GHz – 2 шт.
- оперативная память: 16 GB
- дисковая подсистема: single 120 GB SATA
- операционная система: Microsoft Windows HPC Server 2008 RC2 x64

Результаты (с поправкой на частоты процессоров) этих сравнений сведены в табл. 3 и 4.

Табл.3

| рабочая станция R-Style: Intel Core i7 965, 3.2MHz, 4-х ядерный                              |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Кол-во ядер  | E1          | E2          | E3          | E4          | E5          | E6          | S2a         | S3a         | S3b         | S4a         | S4b         | S6          |
| 4  | 7453        | 2976        | 2926        | 331         | 1426        | 3318        | 1223        | 256         | 8258        | 355         | 16183       | 1803        |
| сервер: Xeon Quad core E5450 x 2, 3.0 GHz, 16 GB RAM, Windows HPC Server 2008 RC2 x64 [2]    |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
| 4  | 11868       | 4551        | 5354        | 500         | 1948        | 5838        | 683         |             |             |             | 6040        | 2374        |
| <b>ускорение</b>   | <b>1,49</b> | <b>1,43</b> | <b>1,72</b> | <b>1,42</b> | <b>1,28</b> | <b>1,65</b> | <b>0,52</b> |             |             |             | <b>0,35</b> | <b>1,23</b> |
| рабочая станция Intel Xeon Quad-core X3360, 2.83GHz, 4 GB RAM, Windows XP Pro SP2 64-bit [2] |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
| 4  |             |             |             | 391         | 1818        |             | 1234        | 235         | 9534        | 528         |             |             |
| <b>ускорение</b>   |             |             |             | <b>1,04</b> | <b>1,13</b> |             | <b>0,89</b> | <b>0,81</b> | <b>1,02</b> | <b>1,32</b> |             |             |

Видно, что на задачах Abaqus/Explicit, рабочая станция на Intel Core i7, как правило, значительно опережает существенно более дорогие машины на процессорах Xeon предыдущего поколения. В задачах для Abaqus/Standard коэффициент производительности станции на Intel Core i7 колеблется примерно в диапазоне 0,8-1,2, существенный проигрыш наблюдается на задачах S2a и S4b - до 2-3 раз.

В табл. 4 результаты расчетов на тестируемой рабочей станции сопоставляются с результатами, полученными на 2-х узловом кластере, составленном из серверов на Intel Xeon E5450 с конфигурацией узлов описанной выше и интерконнектом между узлами DDR Infiniband Dual Port Mezzanine HCA.

Табл.4

| рабочая станция R-Style: Intel Core i7 965, 3.2MHz, 4-х ядерный                                     |             |             |             |             |             |             |             |             |             |  |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
| Кол-во ядер   | E1          | E2          | E3          | E4          | E5          | E6          | S2a         | S4b         | S6          |  |
| 4   | 7453        | 2976        | 2926        | 331         | 1426        | 3318        | 1223        | 16183       | 1803        |  |
| Кластер из 2-х узлов: Xeon Quad core E5450 x 2, 3.0 GHz, 16 GB RAM, Windows HPC Server 2008 RC2 x64 |             |             |             |             |             |             |             |             |             |  |
| 8   | 7680        | 2836        | 3272        | 360         | 1140        | 3857        | 418         | 6760        | 2175        |  |
| <b>ускорение</b>  | <b>0,97</b> | <b>0,89</b> | <b>1,05</b> | <b>1,02</b> | <b>0,75</b> | <b>1,09</b> | <b>0,32</b> | <b>0,39</b> | <b>1,13</b> |  |

И в этом сопоставлении станция на Core i7 выглядит весьма достойно, сильно проигрывая, как и ожидалось, на задачах S2a и S4b.

Приведенные результаты говорят о том, что переход на процессоры Intel Nehalem, где производительность подсистемы процессор-память резко возрастает, позволяет существенно сократить требуемые времена расчетов.

Из результатов также следует, что важную роль, особенно при расчетах с использованием модуля **Abaqus/Standard**, имеет производительности дисковой подсистемы, которая в этом случае является звеном ограничивающим производительность всей системы. И эти ограничения становятся еще больше при переходе на процессоры Intel Nehalem.

Таким образом, роль правильного конфигурирования вычислительной техники, используемой для проведения расчетов по программе **SIMULIA Abaqus**, для получения максимальной производительности трудно переоценить.

Рассмотрим экономический аспект построения вычислительной системы для проведения инженерных расчетов.

Под вычислительной системой мы будем понимать комплекс, включающий в себя:

- прикладное инженерное программное обеспечение
- собственно вычислительную технику, на которой проводятся расчеты

Стоимость программного комплекса **SIMULIA Abaqus** даже в минимальной конфигурации составляет порядка нескольких десятков тысяч долларов.

Стоимость тестируемой рабочей станции составляет на ноябрь 2009 г., включая стоимость операционной системы, примерно 2600\$, что составляет не более нескольких процентов от общей стоимости вычислительной системы. Увеличение производительности дисковой подсистемы, конечно, приведет к росту стоимости станции, но не изменит этого соотношения.

Аналогичная рабочая станция на процессоре предыдущего поколения (например, Intel Core 2 Quad с частотой 3.0 ГГц) будет стоить примерно на 900\$ меньше.

Таким образом, “экономия” порядка 1-2% на одной из составляющих - вычислительной технике, может привести к резкому (на несколько десятков процентов) падению производительности вычислительной системы в целом.

## Выводы

1. Проведенное тестирование производительности комплекса **[SIMULIA Abaqus](#)** на процессорах Intel Core i7 (ядро Nehalem) показало, что применение этих процессоров может поднять производительность на десятки процентов.
2. Для оптимизации всех видов затрат – финансовых, временных, трудовых и пр. – необходимо рассматривать всю вычислительную систему для инженерных расчетов в комплексе, включая в него и вычислительную технику и прикладное инженерное программное обеспечение.
3. Дешевым способом такой оптимизации является качественное конфигурирование вычислительной техники с учетом решаемых задач. Стоимость “железа” составляет весьма малую долю от стоимости всей вычислительной системы, а ее влияние на производительность системы очень велико.

## Литература

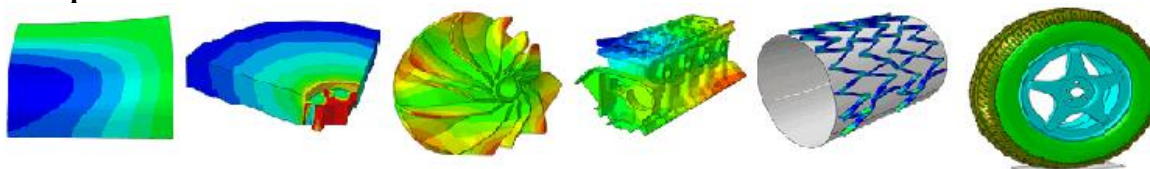
1. [www.simulia.com/support/v69/v69\\_performance.php](http://www.simulia.com/support/v69/v69_performance.php)

Компания ТЕСИС благодарит компанию **[R-Style](#)** за предоставленную для тестирования рабочую станцию.

## Приложение 1

**Описание тестовых задач**

Набор стандартных тестов производительности комплекса SIMULIA Abaqus включает 16 задач различных типов. Задачи разделены на две основные категории: задачи для решателя Abaqus/Standard и задачи для решателя Abaqus/Explicit.

**Задачи Abaqus/Standard.**

**S1: Пластина, нагруженная силой тяжести**

В этой задаче рассматривается пластина, нагруженная силой тяжести. Конечноэлементная сетка пластины состоит из оболочечных элементов второго порядка S8R5. Материал задаётся как линейно упругий. Края пластины жестко закреплены. Контактные взаимодействия отсутствуют.

| <b>S1</b>                               |           |
|---|-----------|
| Имя файла:                              | s1.inp    |
| Число приращений:                       | 1         |
| Число итераций:                         | 1         |
| Число степеней свободы:                 | 1085406   |
| Число операций с плавающей точкой:      | 1.89E+011 |
| Минимальный объем оперативной памяти:   | 587 MB    |
| Требуемый объем дискового пространства: | 2 GB      |

**S2: Маховик нагруженный центробежной силой**

В этой задаче производится нелинейный статический анализ маховика, нагруженного центробежной силой. Конечно-элементная сетка маховика состоит из шестиузловых элементов первого порядка типа C3D8R. Материал задаётся как упругий с учетом пластичности по Мизесу и изотропного упрочнения. Контактные взаимодействия отсутствуют. Нелинейность в этой задаче возникает из-за пластических деформаций рядом с отверстиями под болты.

| <b>S2a: Direct solver version</b>       |           |
|---|-----------|
| Имя файла:                              | s2a.inp   |
| Число приращений:                       | 6         |
| Число итераций:                         | 12        |
| Число степеней свободы:                 | 474744    |
| Число операций с плавающей точкой:      | 1.86E+012 |
| Минимальный объем оперативной памяти:   | 733 MB    |
| Требуемый объем дискового пространства: | 4.55 GB   |

### **S3: Определение собственных частот крыльчатки**

В этой задаче определяются собственные частоты и формы мод крыльчатки турбины. Конечно-элементная сетка крыльчатки состоит из шестиузловых элементов типа C3D10. Материал задаётся как линейно упругий. Определяется диапазон частот от 100 Hz до 20000 Hz.

Для тестирования используются три версии задачи:

S3a с 360'000 степеней свободы с использованием решателя собственных частот Lanczos

S3b с 1'100'000 степеней свободы с использованием решателя собственных частот Lanczos

S3c с 1'000'000 степеней свободы с использованием решателя собственных частот AMS.

| <b>S3a: 360,000 DOF Lanczos eigensolver version</b>   |          |
|---|----------|
| Имя файла:  | s3a.inp  |
| Число степеней свободы:                               | 362178   |
| Число операций с плавающей точкой:                    | 3.42E+11 |
| Минимальный объем оперативной памяти:                 | 384 MB   |
| Требуемый объем дискового пространства:               | 4.0 GB   |
| <b>S3b: 1,100,000 DOF Lanczos eigensolver version</b> |          |
| Имя файла:  | s3b.inp  |
| Число степеней свободы:                               | 1112703  |
| Число операций с плавающей точкой:                    | 3.03E+12 |
| Минимальный объем оперативной памяти:                 | 1.33 GB  |
| Требуемый объем дискового пространства:               | 23.36 GB |
| <b>S3c: 1,100,000 DOF AMS eigensolver version</b>     |          |
| Имя файла:  | s3c.inp  |
| Число степеней свободы:                               | 1112703  |
| Число операций с плавающей точкой:                    | 3.03E+12 |
| Минимальный объем оперативной памяти:                 | 1.33 GB  |
| Требуемый объем дискового пространства:               | 19.3 GB  |

### **S4: Соединение болтами головки блока цилиндров с блоком цилиндров**

В этой задаче рассматривается умеренно нелинейный анализ соединения головки блока цилиндров с блоком цилиндров. Конечноэлементная сетка блока цилиндров и головки блока цилиндров состоит из шестиузловых элементов типов C3D4 и C3D10M, сетка болта состоит из восьмиузловых элементов типа C3D8I, сетка прокладки состоит из специализированных конечных элементов для моделирования прокладок типа GK3D8. Для головки блока цилиндров, блока цилиндров и болтов используется линейная упругая модель материала. Для прокладок – модель контакта с проникновением и пластичностью. Контактные взаимодействия заданы между головкой блока цилиндров и болтами, прокладкой и головкой блока цилиндров, прокладкой и блоком цилиндров. Нелинейность в этой задаче заключается в изменении условий контакта и возникновении пластичности в материале прокладки после затяжки болтов.

Для тестирования используются три версии задачи:

S4a: 700,000 степеней свободы, 5 итераций

S4b: 5,000,000 степеней свободы, 5 итераций

S4d: 700,000 степеней свободы, 27 итераций

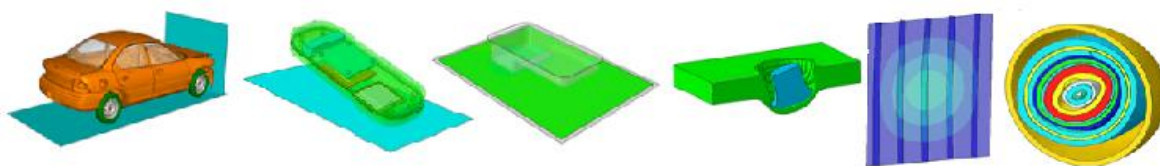
| <b>S4a: 700,000 DOF, 5 iteration version</b>  |          |
|---|----------|
| Имя файла:                                    | s4a.inp  |
| Число приращений:                             | 1        |
| Число итераций:                               | 5        |
| Число степеней свободы:                       | 720059   |
| Число операций с плавающей точкой:            | 5.77E+11 |
| Минимальный объем оперативной памяти:         | 895 MB   |
| Требуемый объем дискового пространства:       | 3 GB     |
| <b>S4b: 5,000,000 DOF 5 iteration version</b> |          |
| Имя файла:                                    | s4b.inp  |
| Число приращений:                             | 1        |
| Число итераций:                               | 5        |
| Число степеней свободы:                       | 5236958  |
| Число операций с плавающей точкой:            | 1.14E+13 |
| Минимальный объем оперативной памяти:         | 4 GB     |
| Требуемый объем дискового пространства:       | 23 GB    |
| <b>S4d: 700,000 DOF, 27 iteration version</b> |          |
| Имя файла:                                    | s4c.inp  |
| Число приращений:                             | 20       |
| Число итераций:                               | 27       |
| Число степеней свободы:                       | 720059   |
| Число операций с плавающей точкой:            | 5.77E+11 |
| Минимальный объем оперативной памяти:         | 895 MB   |
| Требуемый объем дискового пространства:       | 3.3 GB   |

### **S6: Пятно контакта шины**

В этой задаче рассматривается сильно нелинейный анализ по определению пятна контакта автомобильной шины. Конечноэлементная сетка шины состоит из восьмиузловых элементов типов C3D8, C3D6H и C3D8H. Материал задается как линейно упругий и гиперэластичный в зависимости от составной части шины. Каркас в конструкции шины моделируется с помощью армированных слоёв и встроенных элементов. Обод колёсного диска и поверхность дороги моделируются как жесткие тела. Контактные взаимодействия заданы между шиной и диском, а так же между шиной и поверхностью дороги. Анализ состоит из трех шагов. На первом шаге шина устанавливается на диск, на втором шаге в шине создается давление, на третьем шаге к колесу прикладывается вертикальная нагрузка. Нелинейность в этой задаче возникает от больших перемещений, проскальзывания контакта, и гиперэластического поведения материала.

| <b>S6</b>                               |        |
|---|--------|
| Имя файла:                              | s6.inp |
| Число приращений:                       | 41     |
| Число итераций:                         | 177    |
| Число степеней свободы:                 | 729264 |
| Число операций с плавающей точкой:      | NA     |
| Минимальный объем оперативной памяти:   | 397 MB |
| Требуемый объем дискового пространства: | NA     |

## Задачи Abaqus/Explicit.



### **E1: Краш-тест автомобиля**

В этой задаче рассматривается столкновение пассажирского автомобиля и жесткой стенки. Конечноэлементная сетка в основном состоит из оболочечных элементов типов S3RS и S4RS с учетом пластичности по Мизесу и изотропным упрочнением. Различные компоненты автомобиля соединены с помощью многоточечных закреплений и коннекторов. Значительное число деталей подвески и трансмиссии заданы как абсолютно жесткие тела. Для описания контактных взаимодействий между автомобилем, дорогой и стеной используется алгоритм General Contact. Начальная скорость автомобиля – 40 км/ч.

| <b>E1</b>                             |           |
|---------------------------------------|-----------|
| Имя файла:                            | e1.inp    |
| Число приращений времени:             | 62934     |
| Число элементов модели:               | 274632    |
| Начальное установившееся приращение:  | 9.535E-07 |
| Конечная кинетическая энергия:        | 2.100E+06 |
| Минимальный объем оперативной памяти: | 1200 MB   |

### **E2: Падение сотового телефона**

В этой задаче рассматривает упрощенная модель сотового телефона, падающего на жесткий пол. Конечноэлементная сетка состоит из набора различных элементов типов C3D8R, C3D10M, и S4R. Материалы задаются как линейно упругие, либо же с учетом пластичности по Мизесу, или как гиперэластическое. Компоненты телефона собраны с помощью закреплений сеток. Контактные взаимодействия задаются с помощью алгоритма General Contact.

| <b>E2</b>                             |           |
|---------------------------------------|-----------|
| Имя файла:                            | e2.inp    |
| Число приращений времени:             | 87369     |
| Число элементов модели:               | 45785     |
| Начальное установившееся приращение   | 3.431E-08 |
| Конечная кинетическая энергия:        | 6.043E+02 |
| Минимальный объем оперативной памяти: | 300 MB    |

### **E3: Листовая формовка**

В этой задаче рассматривается формование изделия из листового металла в процессе выдавливания. Конечноэлементная сетка формуемого листа состоит из оболочечных конечных элементов типа S4R. Поведение материала задано как упругое с учетом пластичности по Мизесу. Конечно-элементная сетка для штампа состоит из поверхностных элементов типа SFM3D4R. Материал задан как абсолютно жесткий. Контактные взаимодействия заданы между заготовкой и штампом. Анализ состоит из двух шагов. На первом шаге заготовка зажимается между оправкой и штампом. На втором шаге штамп перемещается и формирует деталь. Поскольку процесс, по сути представляется квазистатическим, вычисления выполняются для значительного временного интервала с целью компенсации эффектов от инерции. Скорость решения этой задачи напрямую зависит от скорости расчёта алгоритма General Contact.



| <b>E3</b>                             |                       |
|---------------------------------------|-----------------------|
| Имя файла:                            | e3.inp                |
| Число приращений времени:             | 31177                 |
| Число элементов модели:               | 34540 (деформируемых) |
| Начальное установившееся приращение   | 7.151E-07             |
| Конечная кинетическая энергия:        | 1.391E+03             |
| Минимальный объем оперативной памяти: | 550 MB                |

#### **E4: Пробивание пулей стальной плиты**

В этой задаче рассматривается проникновение пули сквозь стальную плиту под углом. Конечно-элементные сетки пули и листа состоят из восьмиузловых элементов типа C3D8R. Материал задаётся как упругий, с учетом пластичности по Мизесу, изотропного упрочнения и разрушения. Контактные взаимодействия задаются с помощью алгоритма General Contact с учетом эрозии поверхности. Грани плиты жестко закреплены. Вектор начальной скорости пули направлен через поверхность плиты.

| <b>E4</b>                             |           |
|---------------------------------------|-----------|
| Имя файла:                            | e4.inp    |
| Число приращений времени:             | 12433     |
| Число элементов модели:               | 237100    |
| Начальное установившееся приращение   | 4.957E-09 |
| Конечная кинетическая энергия:        | 1.469E+04 |
| Минимальный объем оперативной памяти: | 1400 MB   |

#### **E5: Панель нагруженная взрывной волной**

В этой задаче рассматривается жестко закреплённая панель, нагруженная взрывной волной высокой мощности. Конечно-элементная сетка панели состоит из оболочечных элементов типа S4R. Материал задаётся как упругий с учетом пластичности по Мизесу и изотропного упрочнения. Контактные взаимодействия не учитываются.

| <b>E5</b>                             |           |
|---------------------------------------|-----------|
| Имя файла:                            | e5.inp    |
| Число приращений времени:             | 81716     |
| Число элементов модели:               | 50        |
| Начальное установившееся приращение   | 6.122E-07 |
| Конечная кинетическая энергия:        | 1.050E+01 |
| Минимальный объем оперативной памяти: | 150 MB    |

#### **E6: Концентрически расположенные сферы**

В этой задаче рассматривается несколько концентрически расположенных сфер с зазором между каждой парой сфер. Конечно-элементная сетка сфер состоит из восьмиузловых элементов типа C3D8R. Материал задаётся как упругий с учетом пластичности по Мизесу и изотропного упрочнения. Контактные взаимодействия для всех сфер задаётся помощью алгоритма General Contact. Наружная сфера колеблется с высокой амплитудой, что приводит к комплексному возникновению контактных взаимодействий между сферами.

| <b>E6</b>                             |           |
|---------------------------------------|-----------|
| Имя файла:                            | e6.inp    |
| Число приращений времени:             | 23291     |
| Число элементов модели:               | 244124    |
| Начальное установившееся приращение   | 2.116E-07 |
| Конечная кинетическая энергия:        | 2.034E+06 |
| Минимальный объем оперативной памяти: | 1000 MB   |