

ОБЗОР ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ ПРОЧНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ПРОГРАММ ЛОГОС

*П. А. Авдеев, О. Л. Александрова, Е. О. Артемова, В. А. Афанасьев, Р. А. Барабанов,
В. В. Борляев, Д. Ю. Дьянов, И. А. Дяченко, А. В. Казанцев, Е. И. Корсакова, С. С. Косарим,
М. В. Медведкина, С. В. Морозов, А. О. Наумов, М. М. Пристаи, Д. И. Разваров,
Т. В. Резвова, В. Ф. Спиридонов, С. В. Стародубов, И. Ю. Тагирова, Е. А. Филимонкин,
К. В. Циберев, А. А. Челаков, Е. В. Шувалова*

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Введение

В настоящее время разрабатывается пакет программ ЛОГОС для решения широкого круга задач, в том числе механики деформируемого твердого тела на многопроцессорных вычислительных ресурсах [1, 2]. Разработка пакета программ ЛОГОС ведется с привлечением опыта, накопленного в РФЯЦ-ВНИИЭФ, а также в тесном сотрудничестве с ведущими российскими институтами и предприятиями, имеющими опыт в создании и использовании инженерных кодов. Пакет программ ЛОГОС-Прочность позволяет проводить расчет статического и динамического деформирования конструкций с учетом контактного взаимодействия и процесса разрушения. Реализована возможность учета таких физических процессов как теплопроводность, течение газа, детонация взрывчатых веществ. Одной из особенностей пакета программ ЛОГОС-Прочность является высокий уровень распараллеливания на смешанной модели (OpenMP + MPI), позволяющей проводить трехмерное комплексное моделирование на суперЭВМ с использованием тысяч процессорных ядер.

1. Основные принципы математической методики

В прочностном модуле пакета программ ЛОГОС для описания физических процессов реализуются современные физико-математические модели, подходы и алгоритмы, такие как:

- метод конечных элементов и конечных разностей (явные и неявные схемы с использованием эффективных прямых и итерационных параллельных решателей СЛАУ);
- контактное взаимодействие материалов (скольжение, трение, отскок, самоконтакт, разрушение);
- структурированные и неструктурированные сетки;
- библиотека универсальных и специализированных конечных элементов;
- алгоритмы взаимодействия твердотельных конструкций с газодинамической средой (Fluid Structure Interaction);
- распараллеливание с использованием смешанной модели (OpenMP + MPI).

2. Область применения

Прочностной модуль пакета программ ЛОГОС может использоваться при решении проблем прочности, безопасности, надежности, технологичности инновационных изделий в гражданских отраслях: в атомной энергетике, аэрокосмической промышленности, автомобилестроении, машиностроении и др.

Ядерные энергетические установки и применяемое в них ядерное топливо представляют большую экологическую опасность для окружающей среды. В связи с этим в атомной энергетике весьма остро стоит вопрос решения целого ряда проблем безопасности элементов технологического цикла атомных электростанций, таких как:

- динамическая прочность защитных сооружений атомных реакторов в условиях возможных аварий (падение самолета, террористический акт, техногенная авария);
- ударопрочность, герметичность и надежность защитных контейнеров для наземной и воздушной транспортировки свежего и отработанного ядерного топлива;
- прогноз ядерной безопасности при динамическом деформировании ТВС (тепловыделяющая сборка) в результате аварийных падений при внутристанционных работах.

В аэрокосмической отрасли промышленности прочностные расчеты проводятся с целью повышения безопасности и надежности различных типов летательных аппаратов в условиях таких возможных аварийных ситуаций, как:

- обрыв лопатки работающего газотурбинного двигателя на борту летательного аппарата (в полете и на земле);
- столкновение птицы с элементами летательного аппарата и попадание птицы в двигатель самолета;
- разрушение элементов шасси пассажирского самолета при взлете и посадке;
- террористический взрыв на борту самолета;
- ударопрочность корпуса бортового регистратора («черного» ящика) при импульсных динамических нагрузках и проникающем воздействии штыря;
- создание эффективных систем активного и пассивного демпфирования спускаемых космических аппаратов в приземлении на твердую земную поверхность.

Проблемы надежности конструкций автомобиля и безопасности пассажиров являются важнейшими задачами при проектировании автомобилей. Для обоснования надежности проводятся комплексы практических расчетов, например:

- оптимизация конструкции впускных и выпускных каналов головки двигателя с учетом термоупругости;
- моделирование динамического воздействия на транспортное средство и анализ его последствий для водителя в экстремальных условиях (проведение виртуальных крэш-тестов);
- оценка безопасности экипажа при подрыве и обстреле автомобиля;
- исследование прочности при эксплуатационном нагружении, а также при ударном взаимодействии и разрушении элементов конструкции автомобиля.

3. Динамическая прочность

Рассмотрим подробнее функциональные возможности прочностного модуля пакета программ ЛОГОС для решения задач динамической прочности. Для моделирования упругопластических и газодинамических течений используется набор конечно-элементных аппроксимаций по пространству и конечно-разностных аппроксимаций по времени.

В текущей реализации пакета программ ЛОГОС реализованы три численные схемы по времени:

- центрально-временная конечно-разностная схема типа «крест», используемая по умолчанию;
- полностью консервативная схема методики ЛЭГАК, обобщенная на случай неструктурированных расчетных сеток в конечно-элементном подходе;
- схема Ньюмарка.

Для аппроксимации по пространству в пакете программ ЛОГОС реализована обширная библиотека конечных элементов, включающая в себя элементы сплошной среды (шестигранные, тетраэдральные), оболочечные элементы, балочные элементы, дискретные элементы.

Наполнение пакета программ ЛОГОС уравнениями состояния и моделями материалов осуществляется по принципу возможности использования как моделей коммерческих пакетов про-

грамм, так и моделей, используемых во ВНИИЭФ. В расчетах наиболее часто используются следующие модели и уравнения состояния (УРС): модель упругого изотропного материала, модель упругопластического изотропного материала с учетом кинематического упрочнения, модель упругопластического изотропного материала с кинетическим уравнением для предела текучести, модель Джонсона – Кука, модель пористого материала с анизотропными свойствами, модель материала с произвольной зависимостью между напряжением и деформацией, а также с произвольной зависимостью от скорости деформации, модель керамики, стекла и других хрупких материалов, УРС идеального газа, полиномиальное УРС, УРС Грюнайзена и др.

Для численного моделирования контактного взаимодействия между различными подобластями конструкции реализован метод штрафа в классической постановке, метод множителей Лагранжа, а также локальный иерархический пинболл-алгоритм [6, 7]. Для поиска зон контакта используется глобальный линейный позиционный алгоритм [8].

При распараллеливании прочностного модуля пакета программ ЛОГОС разработки, в основном, придерживаются принципов, положенных в основу распараллеливания методики ЛЭГАК [3]. Используются стандарты распараллеливания MPI и OMP, геометрическая декомпозиция данных по процессам. Геометрическая декомпозиция данных выполняется с использованием открытого кода ParMETIS, алгоритма рекурсивной координатной бисекции, а также собственных алгоритмов декомпозиции с возможностью квазидинамической балансировки вычислительной нагрузки.

Реализованный функционал обеспечивает возможность проведения высокоточных имитационных расчетов широкого класса промышленных задач и обеспечивает конкурентоспособность пакета программ ЛОГОС в части решения задач динамической прочности по сравнению с ведущими пакетами программ инженерного анализа, такими как LS-DYNA [4], ABAQUS [10], MSC.NASTRAN [11].

4. Квазистатическая прочность

Статический анализ применяется для задач, в которых действие сил инерции не оказывает существенного влияния на поведение конструкции.

Можно выделить следующие основные особенности модуля для решения задач статической прочности, реализованного в пакете программ ЛОГОС:

- библиотека поддерживаемых типов конечных элементов включает в себя набор трехмерных элементов сплошной среды первого и второго порядка аппроксимации (шестигранники, треугольные призмы, тетраэдры и пирамиды с четырехугольным основанием), а также плоские оболочечные элементы и одномерные балочные элементы;

- реализован широкий набор граничных условий и специальный функционал, позволяющий имитировать конструктивные элементы расчетных моделей: жесткие связи, заклепочные и сварные соединения, одноточечные и многоточечные ограничения и т. д.;

- набор материальных моделей включает в себя модели линейно-упругого и упругопластического материалов. Реализована поддержка изотропных и ортотропных материальных свойств с учетом локальной ориентации, а также учет температурных зависимостей материальных параметров;

- конечно-элементная методика обеспечивает возможность проведения расчетов как на связанных сетках, так и на несогласованных сетках путем контакта-склейки поверхностей или прямого моделирования контактного взаимодействия;

- адаптивная схема расчета шага статической прочности обеспечивает разбиение прикладываемой нагрузки на шаги и подшаги с процедурой автоматического выбора величины подшага по нагрузке. Использование автоматической схемы выбора подшагов по нагружению позволяет обеспечить сходимость численного линеаризованного решения на сильно нелинейном характере деформирования;

- для решения глобальной системы линейных алгебраических уравнений реализованы интерфейсы к библиотекам прямых и итерационных решателей.

Реализованный функционал обеспечивает возможность проведения имитационных расчетов широкого класса промышленных задач с использованием моделей различного уровня сложности и обеспечивает конкурентоспособность пакета программ ЛОГОС в части решения задач квазистатической прочности по сравнению с ведущими пакетами программ инженерного анализа, такими как ANSYS [9], ABAQUS [10], MSC.NASTRAN [11].

5. Результаты некоторых демонстрационных расчетов

В данном разделе приведены результаты некоторых расчетов промышленных моделей, которые демонстрируют работоспособность и функциональные возможности модуля прочности пакета программ ЛОГОС.

5.1. Задача о деформировании графитового блока

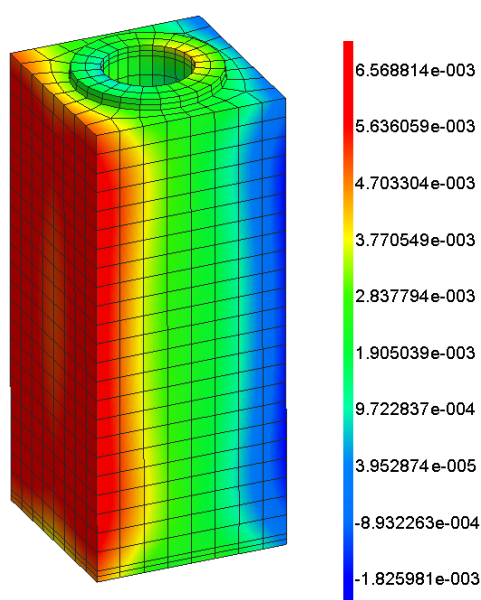


Рис. 1. Поле перемещения вдоль оси u на конечный момент времени в задаче о деформировании графитового блока

Рассматривается задача по моделированию процессов деформирования графитового блока кладки реактора при эксплуатационном нагружении. При проведении расчета учитывались основные факторы, определяющие НДС (напряженно-деформированное состояние) блока: трансверсально-изотропный материал графита, процессы теплового расширения, радиационного формоизменения, радиационной ползучести графита. Геометрические размеры блока, параметры нагружения, граничные условия, значения материальных констант графита марки ГР-280, характеристики теплового расширения, радиационного формоизменения, радиационной ползучести графита были взяты из нормативных документов. Конечно, элементная модель объекта построена на основе элементов сплошной среды первого порядка.

Расчет проводился в 2 шага нагружения. На первом шаге решалась упругая задача с нулевым флюенсом нейтронов, но заданным распределением температуры, а на втором шаге расчета флюенс линейно возрастал до максимальных значений при сохраняющемся неизменным полем температуры.

На рис. 1 приведены картины распределения полей перемещения вдоль одной из координатных осей на момент окончания расчета.

Совместно со специалистами Курчатовского института был проведен анализ расчетных данных и сделан вывод о хорошем согласии характеристик напряженно-деформированного состояния, полученных с помощью решателя ЛОГОС, с решением, полученным по пакету программ, используемому специалистами Курчатовского института.

5.2. Линейный анализ прочности кузова легкового автомобиля

Расчетная модель по данной задаче в рамках совместных работ была предоставлена АМИ НГТУ им. Алексева.

Рассматривается задача статического деформирования модели легкового автомобиля ГАЗ-31105 в режиме нагружения, при котором модель закрепляется в зонах расположения передней и задней подвески, а нагрузка приложена в верхний левый угол крыши (рис. 2).

Физико-механические характеристики материалов. Материал (изотропный упругий): плотность – $7,85 \text{ г/см}^3$, коэффициент Пуассона – $0,3$, модуль Юнга – 210 ГПа .

Конечно-элементная модель содержит порядка 179217 элементов (рис. 3).

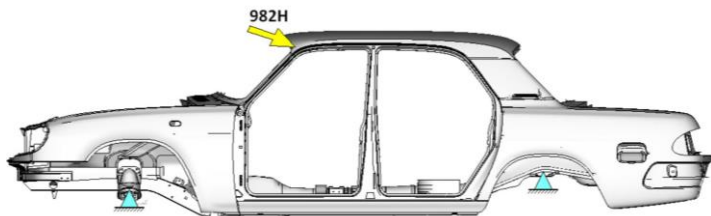


Рис. 2. Постановка задачи

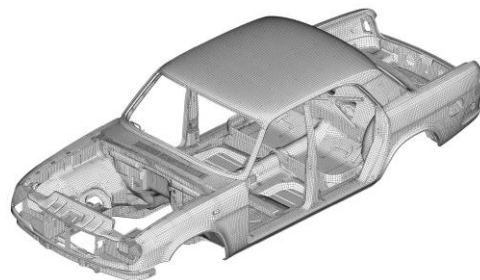


Рис. 3. КЭ-модель

Расчет проводится в лагранжевой постановке. В качестве результатов рассматриваются результирующие смещения в модели (рис. 4).

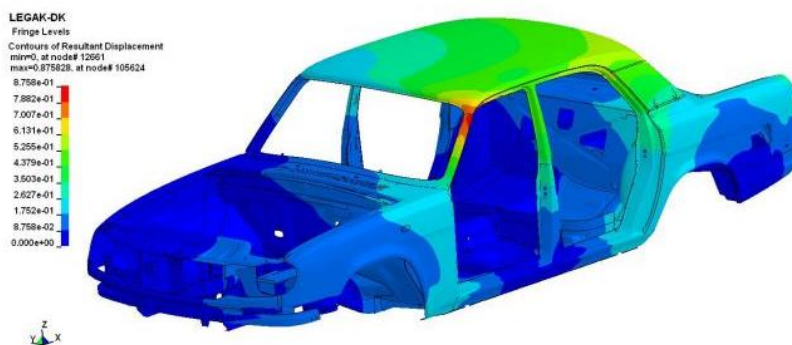


Рис. 4. Результирующие смещения в модели, мм

Совместно со специалистами АМИ НГТУ был проведен анализ расчетных данных и сделан вывод о хорошем согласии характеристик напряженно-деформированного состояния, полученных с помощью решателя ЛОГОС, с эталонным решением, полученным по коммерческому пакету программ.

5.3. Расчет попадания птицы в вентилятор газотурбинного двигателя

В качестве иллюстрации работоспособности, реализованных в пакете программ ЛОГОС алгоритмов решения связанных задач прочности и гидродинамики сглаженных частиц (sph – Smoothed Particle Hydrodynamics), в данном разделе представлено решение практической задачи, в которой моделируется попадание птицы в вентилятор газотурбинного двигателя самолета [12]. Геометрия расчетной модели приведена на рис. 5.



Рис. 5. Геометрия расчетной модели

Птица моделируется sph-подобластью (105057 частиц), а вся остальная расчетная область – элементами сплошной среды (574580 конечных элементов). Данная задача демонстрирует функциональные возможности реализованных алгоритмов в части расчета сложного контактного взаимодействия, которое имеет место не только между птицей и остальной конструкцией, но и между лопатками вентилятора, которое возникает вследствие удара первой из них о птицу.

Для поставленной задачи использовались следующие модели материала:

1. Модель упругопластического материала, используемая для моделирования корпуса и лопаток лопаток вентилятора. В табл. 1 приведены входные параметры данной модели.

Таблица 1

Входные параметры упругопластической модели материала

Номер материала	Детали конструкции	Начальная плотность, 10^{-6} кг/мм ³	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Предел текучести, ГПа	Касательный модуль, ГПа
1.1	Корпус	$2,85 \cdot 10^{-6}$	75,739998	0,3	0,37	0,51
1.2	Лопатки	$4,45 \cdot 10^{-6}$	120	0,34	0,8	0,625

2. Модель недеформируемого тела с плотностью $\rho = 4,45 \cdot 10^{-6}$ кг/мм³. Данная модель используется для моделирования оснований лопаток.

3. Птица моделируется газодинамической моделью с уравнением состояния Грюнайзена в форме

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a\mu) \rho e, \quad \text{где } \mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1.$$

Далее приведены входные параметры уравнения состояния:

– начальная плотность: $\rho_0 = 10^{-6}$ кг/мм³;

- начальная скорость звука: $C = 1500$ мм/мс;
- начальная внутренняя энергия: $e_0 = 0$;
- $S_1 = 2,5599999$, $S_2 = -1,98759999$, $S_3 = 0,2268$, $a = 0$.

Расчет проводился в MPI-режиме с использованием 60 вычислительных ядер. Время расчета в ЛОГОС составило 40 ч.

Далее представлены результаты расчетов на последний момент времени моделирования $t = 8,1$ мс.

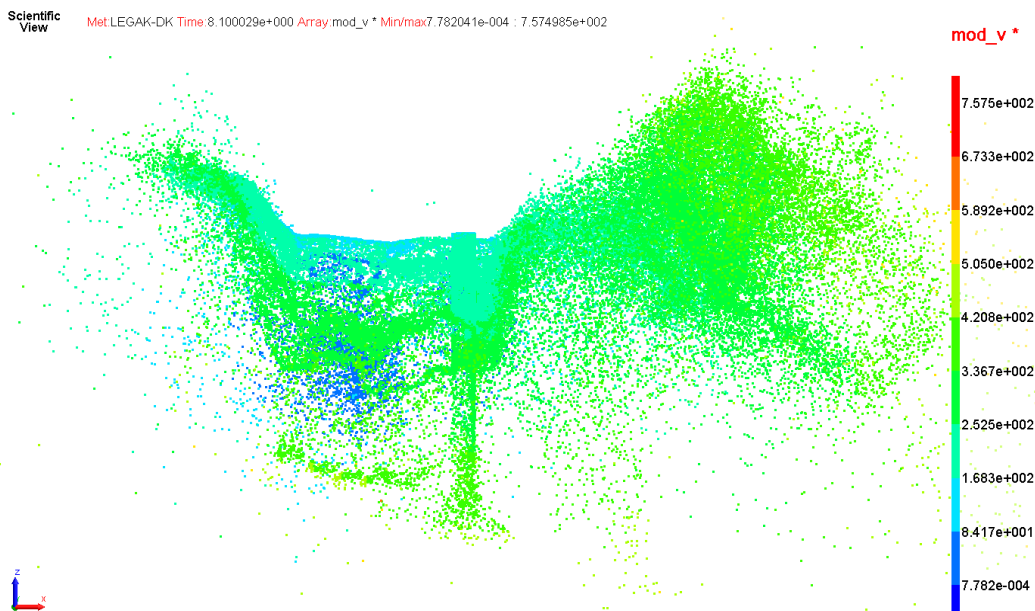


Рис. 6. Поле результирующей скорости частиц

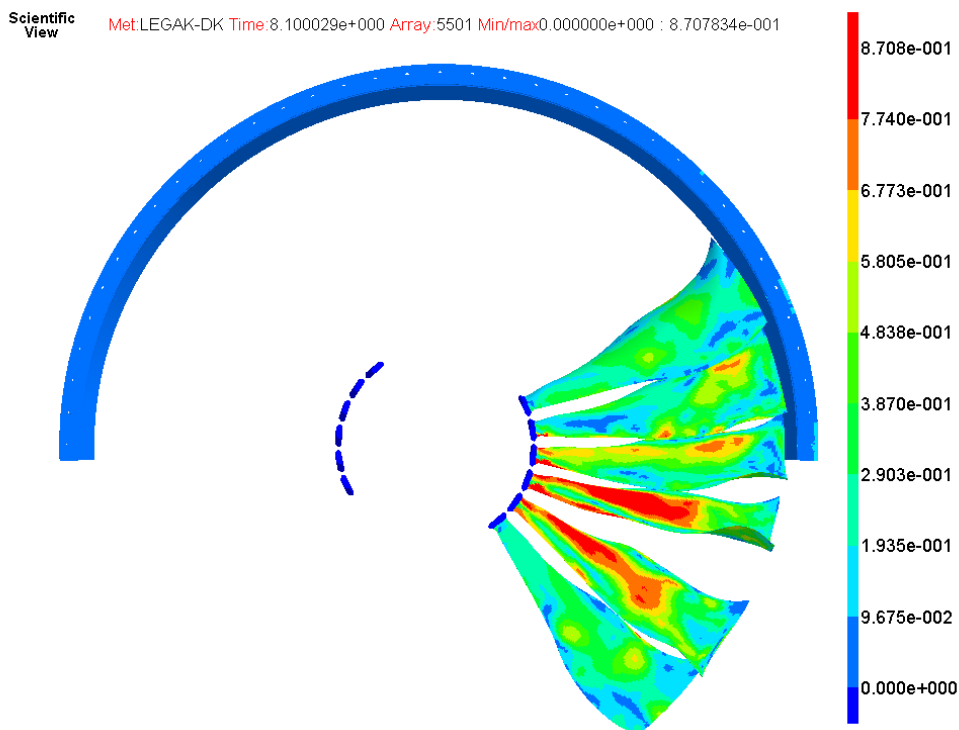


Рис. 7. Поле интенсивности напряжений лопаток вентилятора

Анализ полученных результатов показал хорошее качественное и количественное совпадение с результатами, полученными в работе [12].

5.4. Разрыв ТК в центре активной зоны реактора

Рассматривается задача по моделированию процессов деформирования элементов активной зоны реактора под давлением пароводяной смеси при разрыве одного из технологических каналов.

Основными элементами активной зоны реактора являются графитовая кладка. В колонне графитовой кладки установлен технологический канал, внутри которого теплоноситель омывает тепловыделяющую сборку (ТВС).

Графитовая кладка представляет собой цилиндр радиусом около 7 м и высотой 8 м, включающий в себя 2488 вертикальных графитовых колонн высотой 8 м. Каждая колонна набрана из 14 графитовых блоков сечением 250×250 мм. Высота отдельных блоков может равняться 200, 300, 500 и 600 мм. Следует отметить, что графитовые блоки колонн не прилегают друг к другу вплотную, а между ними существует зазор. Графит пронизан большим количеством вертикальных отверстий, через каждое из которых проходит труба давления (также называемая технологическим каналом (ТК)). ТК представляет собой трубную конструкцию длиной 18340 мм и весом 260 кг.

Конечно-элементная сетка сборки реакторной установки была построена из объемных восьмиузловых элементов и оболочных четырехузловых элементов общим числом 160 млн КЭ.

Моделирование процессов деформирования конструкции проводилось в упругопластическом приближении.

Нагружение кладки происходит в результате разрыва центрального канала на середине высоты (между отметками 4,325 и 4,925 м от верхней грани нижнего металлического блока). Разрыв моделировался навязанным по определенному закону давлением на центральный канал.

Расчет проводился в параллельном режиме на 1250 процессорах. Общее время счета составило около 20 дней.

На рис. 8 представлены результаты численного моделирования на момент времени 0,31 и 1,6 с.

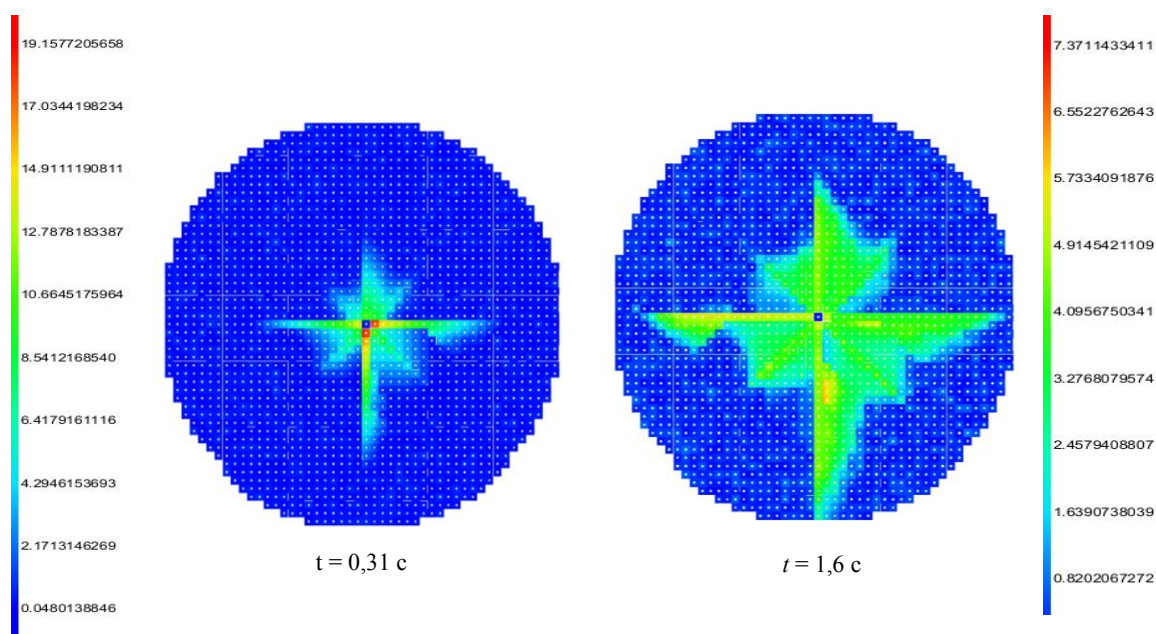


Рис. 8. Результирующие смещения, мм

6. Заключение

В работе представлено описание функциональных возможностей текущей версии пакета программ ЛОГОС, предназначенных для решения задач динамической и квазистатической прочности. Работоспособность и эффективность реализации показана на примере численного решения ряда практических инженерных задач.

Литература

1. Циберев К. В., Авдеев П. А., Артамонов М. В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения задач прочности / Под ред. Р. М. Шагалиева // Труды XIII Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011.
2. Речкин В. Н., Спиридонов В. Ф., Циберев К. В. Пакет программ ЛОГОС. Модуль решения квазистатических задач прочности и модального анализа / Под ред. Р. М. Шагалиева // Там же.
3. Бахрах С. М., Величко С. В., Спиридонов В. Ф. и др. Методика ЛЭГАК-3D расчета трехмерных нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы ее реализации на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2004. Вып. 4. С. 41–50.
4. Hallquist J. O. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation. 2006.
5. Peery J. S., Carroll D. E. Multi-material ALE Methods in Unstructured Grids // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2000. Vol. 187. P. 591–619.
6. Benson D. J., Hallquist J. O. A single surface algorithm for the post-buckling analysis of shell structures // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1990. Vol. 91. P. 141–163.
7. Belytschko T., Neal M. O. Contact-impact by the pinball algorithm with penalty and Lagrangian methods // International Journal of Numerical Methods and Engineering. 1991. Vol. 31. P. 547–572.
8. Oldenburg M., Nilsson L. The position code algorithm for contact searching // International Journal of Numerical Methods and Engineering. 1994. Vol. 37. P. 359–386.
9. ANSYS [Electronic resource]. Mode of access: www.ansys.com
10. ABAQUS [Electronic resource]. Mode of access: www.siemens.com
11. MSC.NASTRAN [Electronic resource]. Mode of access: www.mssoftware.com
12. Ryabov A. A., Romanov V. I., Kukanov S. S. et al. Chupin Fan Blade Bird Strike Analysis Using Lagrangian, SPH and ALE Approaches // 6th European LS-DYNA Users' Conference 6th European LS-DYNA Users' Conference [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.dynalook.com/european-conf-2007/fan-blade-bird-strike-analysis-using-lagrangian.pdf>

ГЕТЕРОГЕННАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ НЕСТРУКТУРИРОВАННОЙ МНОГОГРАННОЙ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ

А. Ю. Алейников

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Для проведения параллельных газодинамических расчетов на больших многопроцессорных вычислительных системах необходимо осуществлять декомпозицию расчетной сетки. При этом каждая ячейка расчетной сетки относится к конкретному вычислительному устройству, а также выстраивается топология обменов расчетными величинами в ячейках. В программах, основанных