

УДК 539.4:532.5:533.6:519.(683+684)

## ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛЭГАК-ДК ДЛЯ РАСЧЕТА ЗАДАЧ ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ И ПРОЧНОСТИ НА НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТКАХ В ЛАГРАНЖЕВО-ЭЙЛЕРОВЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

© 2011 г.

*А.А. Рябов, С.В. Величко, А.Ю. Волков, Н.А. Володина,  
 Д.Ю. Дьянов, Е.И. Корсакова, С.С. Косарим, В.Г. Куделькин,  
 П.А. Авдеев, М.В. Артамонов, В.В. Борляев*

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров

alex.ryabov@saec.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Пакет программ ЛЭГАК-ДК является составной частью разрабатываемого отечественного программного обеспечения для комплексного имитационного моделирования на вычислительных системах различной архитектуры, в том числе на суперЭВМ с массовым параллелизмом, и предназначен для использования на предприятиях высокотехнологичных отраслей промышленности при проектировании и разработке перспективной конкурентоспособной продукции. Пакет программ ЛЭГАК-ДК уже сейчас позволяет проводить моделирование динамического и статического деформирования конструкций с учетом контактного взаимодействия и разрушения. Реализованы такие процессы, как теплопроводность, течение газа, детонация взрывчатых веществ. В пакете программ ЛЭГАК-ДК для описания физических процессов реализуются современные физико-математические модели, подходы и алгоритмы.

*Ключевые слова:* пакет программ ЛЭГАК-ДК, суперЭВМ, динамические задачи, статические задачи, имитационное моделирование, метод конечных элементов, метод конечных разностей, контактное взаимодействие.

Пакет программ ЛЭГАК-ДК (ЛЭГАК-Динамика Конструкций) разрабатывается в рамках проекта «Развитие суперкомпьютеров и грид-технологий».

Разработка пакета программ ЛЭГАК-ДК ведется с привлечением опыта, накопленного математическим отделением ВНИИЭФ при решении задач оборонной тематики. Ведется тесное сотрудничество с ведущими российскими институтами и предприятиями, имеющими опыт в создании и использовании инженерных кодов.

В пакете программ ЛЭГАК-ДК 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 систем линейных алгебраических уравнений),

- контактное взаимодействие материалов (скольжение, трение, отскок, самоконтакт, разрушение),

- структурированные и неструктурированные сетки,

- библиотека универсальных и специализированных конечных элементов,

- алгоритмы взаимодействия прочных конструкций с газодинамической средой (Fluid Structure Interaction),

- распараллеливание с использованием смешанной модели (OpenMP+MPI).

**Модуль расчета динамической прочности** использует конечно-элементную аппроксимацию по пространству и конечно-разностную аппроксимацию по времени. Пространственная сетка может быть построена на основе четырехугольников и треугольников (2D-случай), гексаэдров, тетраэдров, оболочек и балочных элементов (3D-случай).

При интегрировании соответствующих соотношений с использованием метода конечных элементов может применяться как однотоочное, так и многотоочное интегрирование. Основным достоинством полного интегрирования является более высокая точность моделирования и устойчивость к нефизическим возмущениям. При однотоочном интегрировании можно получить нефизические искажения счетной сетки типа «песочных часов». Поэтому возникает необходимость использования механизмов сглаживания.

**Алгоритмы сглаживания** в методике ЛЭГАК-ДК разделяются на два типа: вязкостные и жесткостные. Вязкостные алгоритмы основаны на использовании искусственной вязкости специального вида. Однако данный подход не всегда позволяет сдерживать возмущения типа «песочных часов» в случае малых скоростей деформации. Другим распространенным способом борьбы с высокочастотными возмущениями поля скоростей является усиление жесткостных характеристик элемента в направлении действия возмущений «песочных часов».

Данный вид сглаживания позволяет достаточно хорошо справляться с проблемой в случае малых и средних скоростей деформации. В пакете программ ЛЭГАК-ДК имеется возможность использования данных подходов как по отдельности, так и в комбинации.

Пакет программ ЛЭГАК-ДК имеет достаточно мощную **библиотеку уравнений состояний и моделей материалов**. Сюда входят как широкоизвестные модели, используемые в большинстве коммерческих пакетов инженерного анализа, так и модели, используемые во ВНИИЭФ.

С целью оценки прочности и оптимизации геометрии конструкций реализован **модуль расчета статического напряженно-деформированного состояния**.

Одним из направлений развития пакета ЛЭГАК-ДК является разработка программных средств для решения задач определения отклика конструкций при действии вибрационных нагрузок (**модальный анализ**). Основная задача заключается в определении собственных частот и соответствующих им форм колебаний конструкций. Для решения обобщенной проблемы собственных значений используется библиотека решателей PMLP.

Для численного моделирования **контактно-го взаимодействия** между различными подобластями конструкции реализован метод пэнальти в классической постановке, а также пинболл-алгоритм. Одним из преимуществ реализованных методов является автоматическое определение зон контакта. Реализована возможность множественного контакта и самоконтакта. Проводится совместный учет трения и разрушения.

Для решения задач с сильными деформациями счетной сетки реализован **ALE-подход**. Выбор шага интегрирования разделяется на два этапа: лагранжев (сетка движется вместе с веществом) и эйлеров (сетка корректируется по заданному закону с пересчетом величин между сетками). Реализован набор параметрических критериев, автоматически определяющих «плохие» узлы. Корректировка положения выбранных узлов осуществляется также автоматически. Для пересчета величин реализовано несколько схем, в том числе схемы с повышенным порядком аппроксимации.

**Модуль расчета детонации и взрывчатых веществ** позволяет проводить расчет идеальной детонации с учетом упругопластического деформирования непрореагировавшего взрывчатого вещества и моделирование детонации с использованием кинетических моделей.

Одной из особенностей пакета программ ЛЭГАК-ДК является высокий уровень **распараллеливания**, позволяющий проводить трехмерное комплексное моделирование на суперЭВМ с использованием тысяч процессорных ядер.

Выполненное тестирование (как на классических тестовых задачах, так и на задачах авиа- и автомобилестроения) показало хорошую точность численных решений, получаемых по пакету программ ЛЭГАК-ДК.

#### THE «LEGAK-DK» PARALLEL CODES FOR ANALYZING HYDRODYNAMICS AND STRENGTH PROBLEMS IN LAGRANGIAN-EULERIAN VARIABLES ON UNSTRUCTURED GRIDS

*A.A. Ryabov, S.V. Velichko, A.Yu. Volkov, N.A. Volodina, D.Yu. Dyanov, E.I. Korsakova, S.S. Kosarim, V.G. Kudel'kin, P.A. Avdeev, M.V. Artamonov, V.V. Borlyayev*

LEGAK-DK code package is a component of the Russian software under development for the simulation on computing platforms of various architectures, including massively parallel supercomputers, which is intended for developing and designing promising competitive products at high-technology industrial enterprises.

Currently, LEGAK-DK allows simulating both the dynamic and static straining of structures with regard to contact interactions and failure. Some processes, such as heat transfer, gas flows, and detonation of high explosives have been implemented.

To describe the physical processes, LEGAK-DK implements modern physical-mathematical models, approaches and algorithms.

*Keywords:* LEGAK-DK code package, supercomputer, dynamic problems, static problems, simulation, method of finite elements, contact interactions.