

УДК 519.6

МЕТОДИКА ЛЭГАК-3D РАСЧЕТА ТРЕХМЕРНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ И ПРИНЦИПЫ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ НА МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ ЭВМ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПАМЯТЬЮ

С. М. Бахрах, С. В. Величко, В. Ф. Спиридонов, П. А. Авдеев, М. В. Артамонов, Е. А. Бакулина, И. Ю. Безрукова, В. В. Борляев, Н. А. Володина, А. О. Наумов, Н. Э. Огнева, Т. В. Резвова, А. А. Резяпов, С. В. Стародубов, И. Ю. Тарадай, А. П. Тихонова, К. В. Циберева, А. А. Шанин, М. О. Ширшова, Е. В. Шувалова (РФЯЦ-ВНИИЭФ)

Излагаются принципы конечно-разностной лагранжево-эйлеровой методики ЛЭГАК-3D, предназначенной для расчета нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды в трехмерной геометрии. Особенностью методики является использование концентраций для расчета многокомпонентной среды.

Приводятся также принципы организации комплекса программ, реализующего данную методику на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью.

Основы методики ЛЭГАК

Методика ЛЭГАК [1] — это конечно-разностная лагранжево-эйлерова методика, использующая регулярную сетку. В трехмерной геометрии это сетка, состоящая из выпуклых шестигранников.

В методике ЛЭГАК используются:

- лагранжево-эйлерова счетная сетка, которая частично увлекается веществом. При этом допускается, что поверхности счетной сетки могут как совпадать, так и не совпадать с границами веществ; в последнем случае возникают ячейки сетки, содержащие несколько веществ, и вводятся в рассмотрение концентрации [2];
- непрерывное согласованное представление [3] для потоков массы, энергии, количества движения и других величин при аппроксимации конвективных членов исходной системы уравнений;
- донорно-акцепторный алгоритм [2, 4] счета конвективных потоков для предотвращения счетной диффузии, который по полю концентраций веществ в окрестностях донорной ячейки определяет, какие вещества и в каком отношении вытекают из ячейки, содержащей несколько веществ.

При построении разностной схемы используется система законов сохранения, записанная для произвольного элемента пространства Ω , ограниченного поверхностью S :

$$\frac{d\mathbf{F}}{dt} + \int_S \mathbf{G}(\vec{u} - \vec{u}^*) \vec{n} ds = - \int_{\Omega} \mathbf{H} dV, \quad (1)$$

где \mathbf{F} , \mathbf{G} , \mathbf{H} — векторы: $\mathbf{F} = (M, M\vec{u}, Me)$; $\mathbf{G} = (\rho, \rho\vec{u}, \rho e)$; $\mathbf{H} = (0, \text{grad } P + \text{div } \hat{k}, P \text{ div } \vec{u} + \text{sp}(\hat{k}\hat{D}))$; $M = \rho V$ — масса, содержащаяся в элементе пространства Ω ; P — давление, определяемое уравнением состояния среды $P(\rho, e)$; \hat{D} — девиатор тензора скоростей деформаций; \hat{k} — девиатор тензора напряжений, определяемый законом Гука и условием текучести Мизеса; \vec{u}^* — скорость движения поверхности S . Остальные обозначения общепринятые.

Решение системы (1) осуществляется интегрированием по времени с привлечением метода расщепления [5]. Для этого исходная система (1) разбивается на две вспомогательные.

Первая система — на лагранжевом этапе — получается в предположении, что поверхность S движется со скоростью вещества, т. е. на первом этапе решается система уравнений

$$\frac{d\mathbf{F}^{(1)}}{dt} = - \int_{\Omega} \mathbf{H} dv. \quad (2)$$

При решении системы (2) используется метод расщепления по физическим процессам.

На втором (эйлеровом) этапе предполагается, что вещество покоится и происходит движение поверхности S . Таким образом, система уравнений, которую необходимо решить на этом этапе, имеет вид

$$\frac{d\mathbf{F}}{dt} + \int_S \mathbf{G}^{(1)} (\vec{u}^{(1)} - \vec{u}^*) \vec{n} ds = 0. \quad (3)$$

Разностные формулы для систем (2), (3) являются обобщением на трехмерный случай соответствующих соотношений, принятых при расчете осесимметричных течений [1]. При этом учтен опыт построения разностных формул для расчета трехмерных нестационарных течений, накопленный при создании ряда других методик [6–10], разрабатываемых во ВНИИЭФ. Вопросы построения разностных схем методики ЛЭГАК-3D изложены в серии докладов, представленных на конференции "Молодежь в науке, 2004" [11–14].

Как указывалось выше, в методике ЛЭГАК-3D грани счетных ячеек (шестигранников) могут не совпадать с контактными границами веществ. В этом случае возникают ячейки, содержащие несколько веществ (*смешанные* ячейки). В дополнение к \vec{r} , \vec{u} , ρ , e , g , p вводятся следующие величины: $a_i = M_i/M$ и $\beta_i = V_i/V$ — соответственно массовые и объемные концентрации компонентов, где M_i , V_i — масса и объем i -го вещества, содержащегося внутри счетной ячейки ω ; e_i — удельные (на единицу массы данного вещества) внутренние энергии. Каждое вещество имеет свое уравнение состояния $P_i = P_i(\rho_i, e_i)$.

Предполагается, что для каждого вещества, содержащегося внутри смешанной ячейки, изменение величин описывается уравнениями, аналогичными системе (2) на лагранжевом этапе и системе (3) на эйлеровом.

Для определения изменения плотностей компонентов на лагранжевом этапе предполагается, что

$$\operatorname{div} \vec{u}_i = \operatorname{div} \vec{u}. \quad (4)$$

В одномерном случае (4) эквивалентно предположению о том, что скорость контактной границы, находящейся внутри счетной ячейки, опре-

деляется с помощью линейной интерполяции по скоростям в узлах сетки.

В предположении (4) правило для вычисления давления P в смешанной ячейке следует из условия аддитивности удельных энергий и принятого способа аппроксимации уравнений энергий компонентов:

$$\rho_i = \frac{\alpha_i \rho}{\beta_i}; \quad P = \sum_{i=1}^N \beta_i P_i(\rho_i, e_i),$$

где N — число веществ в смешанной ячейке; ρ_i — плотность i -го вещества.

Введение на эйлеровом этапе специального донорно-акцепторного алгоритма счета потоков из ячеек, содержащих несколько веществ [4], ограничивает счетную диффузию и позволяет локализовать не выделяемые явно контактные границы с точностью до одной счетной ячейки. Идею алгоритма, ограничивающего счетную диффузию, можно пояснить на следующем простом примере: из смешанной ячейки в *чистую* вытекает сначала вещество, которое содержится в чистой ячейке. В общем случае анализируется поле концентраций в окрестности донорной ячейки, содержащей несколько веществ, и на основании этого анализа определяется, какое вещество, в какой пропорции и с какими скоростями вытекает из данной ячейки.

Разностная схема (двухслойная, явная) имеет первый порядок точности и является условно устойчивой с ограничением на шаг интегрирования по времени $\tau(\tilde{u} + c) < kh$, где h — характерный линейный размер счетной ячейки, c — скорость звука, \tilde{u} — скорость движения сетки относительно вещества, $k = 0,5$.

Комплекс программ ЛЭГАК-3D

Методика ЛЭГАК-3D реализована в рамках одноименного комплекса программ. Базовые принципы создания этого комплекса совпадают с принципами создания комплекса ЛЭГАК [15], предназначенного для расчета осесимметричных течений.

В комплексе ЛЭГАК-3D принята полистная организация данных. Одно из семейств поверхностей счетной сетки образуют плоскости, либо пересекающиеся по одной прямой (ось системы), либо параллельные. Это семейство является эйлеровым, плоскости листов фиксированы. В листе счетная сетка строится по правилам, принятым в комплексе ЛЭГАК [15].

Плоскую структуру листов может нарушать модуль счета лагранжевой газодинамики [11]. Восстановление структуры листов осуществляется модулями корректировки сетки и пересчета величин [12] в два этапа.

На первом этапе производится проектирование точек в листы и пересчет величин, связанный с этим изменением счетной сетки (конвективные потоки через "межлистовые" грани шестигранников).

На втором этапе производится корректировка счетной сетки в листах и соответствующий пересчет величин (конвективные потоки через "внутрилистовые" грани шестигранников).

Типы счетных сеток в листах такие же, как и в комплексе ЛЭГАК.

Комплекс программ ЛЭГАК-3D позволяет рассчитывать нестационарные течения сплошной среды в лагранжево-эйлеровых переменных, что включает:

- расчет нестационарных газодинамических течений;
- расчет упругопластических течений;
- расчет распространения волн детонации с постоянной скоростью и с учетом кинетики разложения взрывчатого вещества (ВВ);
- учет разрушения материалов.

Программы для расчета названных выше процессов реализованы в виде отдельных счетных модулей.

В комплекс программ ЛЭГАК-3D также включен набор программ для организации и управления счетом (программы *Ведущая*, *Таблица прерываний* и т. д.).

В настоящее время комплекс ЛЭГАК-3D функционирует в однообластном варианте.

Комплекс программ ЛЭГАК-3D, так же как и комплекс программ ЛЭГАК, состоит из счетной и сервисной частей.

Счетная часть написана на языке Fortran-90. Она функционирует как на ПК, так и на других вычислительных комплексах, поддерживающих Fortran-90 и стандарт передачи сообщений MPI [16].

Сервисная часть, предназначенная для подготовки задач и обработки результатов, реализована как Windows-приложение, написана на языке C++, функционирует на ПК. В настоящее время ведутся работы по обеспечению единой сервисной части для обоих комплексов программ — ЛЭГАК и ЛЭГАК-3D.

Распараллеливание комплекса программ ЛЭГАК-3D

При выработке принципов и схемы распараллеливания комплекса программ ЛЭГАК-3D использовался опыт распараллеливания комплекса программ ЛЭГАК [15]. Основные принципы распараллеливания при этом остались прежними:

- отсутствие программных ограничений на количество используемых процессоров (ограничение может быть связано только с размерами конкретной рассчитываемой задачи);
- обеспечение возможности изменения количества процессоров в ходе решения задачи;
- независимость физических результатов расчетов от количества используемых процессоров;
- переложение основной нагрузки, связанной с обеспечением расчетов в многопроцессорном режиме, на комплекс служебных подпрограмм;
- переносимость комплекса программ на различные вычислительные системы с распределенной памятью, поддерживающие стандарт передачи сообщений MPI;
- текстуальное единство комплекса программ ЛЭГАК-3D для проведения расчетов на различных однопроцессорных и многопроцессорных вычислительных системах в разных режимах их использования;
- обеспечение распараллеливания программ путем минимальных изменений в их текстах и организация работы в многопроцессорном режиме аналогично однопроцессорному.

Применяемая при распараллеливании комплекса программ ЛЭГАК-3D схема частично совпадает со схемой распараллеливания двумерного комплекса, но и имеет ряд существенных отличий.

При распараллеливании комплекса программ ЛЭГАК-3D используется *матричная* геометрическая декомпозиция задачи по процессам. При этом счетный фрагмент для одного процессора — это несколько рядом расположенных ячеек счетной сетки по строкам и столбцам с полными данными по всем листам. На рис. 1 показано разбиение задачи на 9 (3×3) фрагментов в листе.

В отличие от комплекса программ ЛЭГАК в трехмерном комплексе дублирование счета на

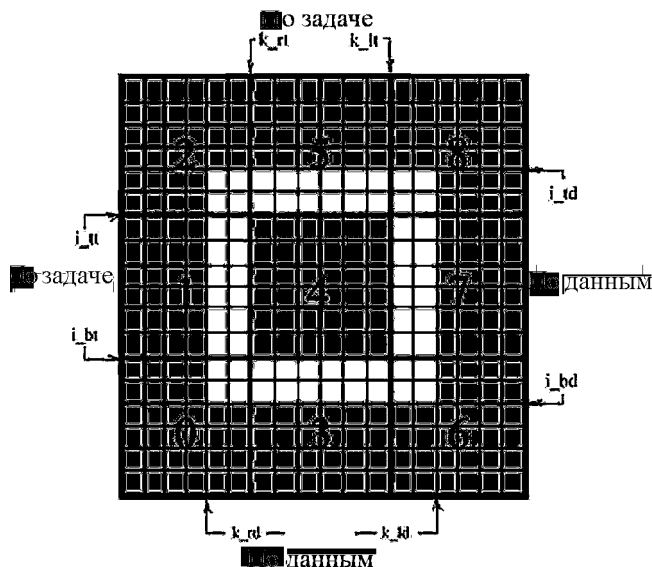


Рис. 1. Пример разбиения задачи на 9 (3 × 3) фрагментов в листе: тонкими линиями обозначены строки и столбцы перехлеста по данным, стрелками обозначена декомпозиция для фрагмента 4

границах фрагментов производится только для сеточных массивов узловых величин.

Каждый процесс рассчитывает свой фрагмент задачи, при этом на один из процессов дополнительно возлагаются функции управления и синхронизации. Выделенного "ленивого" управляющего процесса, как в двумерном комплексе ЛЭГАК, нет.

Массивы величин, размеры которых зависят от числа строк и/или числа столбцов в задаче, подвергаются декомпозиции, и в оперативной памяти каждого процесса хранятся только нужные для данного процесса сечения этих массивов.

Комплекс программ ЛЭГАК-3D в основном (для большинства учитываемых физических процессов) использует явные конечно-разностные схемы. При этом для нахождения новых значений величин в ячейке необходимы значения в нескольких ячейках по трем измерениям. Для расчета значений в граничных точках фрагмента нужно знать значения величин из соседних фрагментов. Размер *перехлеста* (по данным) по строкам и по столбцам в комплексе программ ЛЭГАК-3D равен 2. С целью обеспечения адекватности декомпозированных данных по перехлестам соседних фрагментов после работы счетных программ осуществляется межпроцессорный обмен данными в ячейках перехлеста.

Для реализации указанных принципов созда-

ны структуры данных и пакет сервисных подпрограмм, которыми обеспечиваются:

1. *Декомпозиция задачи и данных.* Расчет декомпозиции производится автоматически в процессе считывания разреза независимо для каждой области каждым процессом задачи. Расчет распределения строк и столбцов по процессам производится независимо.
2. *Чтение и запись разреза.* Разрез, хранящий информацию по задаче, является многофайловым. Головной файл содержит всю общую информацию по задаче и ее текущему состоянию и таблицу размещения данных в дополнительных файлах. Дополнительные файлы содержат блоки массивов и концентраций.
3. *Согласование сеточных данных в многопроцессорном режиме.* Счетные модули комплекса программ ЛЭГАК-3D изменяют свои фрагменты сеточных массивов. Для обеспечения совпадения данных в ячейках перехлеста после выполнения программ, изменяющих сеточные массивы, производится обновление значений этих массивов в соседних фрагментах. При этом используются механизм возобновляемых запросов и производные типы данных [8].
4. *Расчет счетного шага по времени.* Алгоритмы выработки шага того или другого уровня в комплексе программ ЛЭГАК-3D аналогичны алгоритмам двумерного комплекса. Общее для всех процессов значение шага выбирается с использованием групповых коммуникаций.
5. *Расчет интегральных величин.* Как и в двумерном комплексе, каждый из процессов рассчитывает интегральные величины для своего фрагмента задачи. Значения интегральных величин по всей задаче вычисляются при помощи групповых коммуникаций. Средние значения величин вычисляются на управляющем процессе.
6. *Работа аппарата засечек времени выполнения.* В процессе расчета собирается информация о времени выполнения различных компонентов комплекса (счетных модулей, таблицы прерываний) и накладных расходов на распараллеливание (работа подпрограмм обмена данными, синхронизация и т. п.). По окончании счета информация со всех процессов записывается в текстовом виде в файл специального формата. При этом

автоматически оценивается эффективность распараллеливания проведенного расчета и сбалансированность счета на разных процессорах.

Примеры расчетов по комплексу программ ЛЭГАК-3D

Проведен ряд тестовых и методических расчетов, подтверждающих работоспособность методики и комплекса программ ЛЭГАК-3D при расчете нестационарных течений сплошной среды. Ниже приводятся примеры некоторых расчетов.

Задача 1. Адиабатический разлет газового эллипсоида [11]. Аналитическое решение этой задачи получено в работе [17].

Исходная геометрия представляет собой 1/8 часть от трехосного эллипсоида ($x \geq 0, y \geq 0, z \geq 0$) с полуосями $a_x = 3, a_y = 2, a_z = 1$ (рис. 2). Область заполнена идеальным газом ($\gamma = 7/5$).

Начальное распределение плотности и давления задается соотношениями

$$P_0 = (1 - \eta^2)^{\gamma/(\gamma-1)}; \quad \rho_0 = (1 - \eta^2)^{1/(\gamma-1)}.$$

Здесь $\eta^2 = \frac{x^2}{a_x^2} + \frac{y^2}{a_y^2} + \frac{z^2}{a_z^2}$.

Границы, лежащие на координатных плоскостях, являются жесткими стенками. На внешней границе задано нулевое давление.

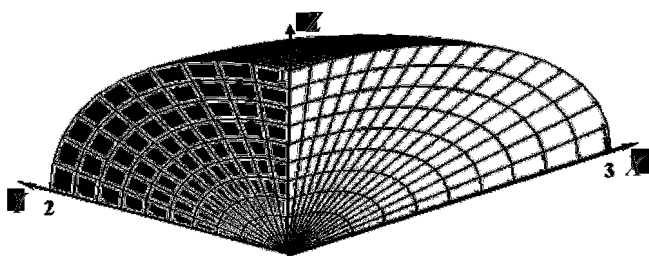


Рис. 2. Трехосный эллипсоид

Результаты расчета задачи 1

Сетка	U_x	U_y	U_z	$S_1 = a_y/a_x$	$S_2 = a_z/a_y$	$S_3 = a_z/a_x$
16 × 10 × 16	2,33	2,89	3,8	1,225	1,32	1,616
16 × 20 × 16	2,43	3,02	3,92	1,233	1,3	1,605
16 × 30 × 16	2,46	3,07	3,97	1,236	1,3	1,607
Асимптот. решение	2,56	3,17	4,27	1,23	1,35	1,66

В табл. 1 приведены результаты расчетов на разном числе точек. Здесь запись 16 × 10 × 16 означает разбиение на 16 столбцов, 10 строк и 16 листов и т. д.

По результатам расчетов видно удовлетворительное согласие между полученными значениями и асимптотическим решением. При этом, чем больше разбиение по направлению разлета, тем ближе численное решение приближается к асимптотическому.

Задача 2. Развитие трехмерной неустойчивости Рихтмайера—Мешкова [11]. Постановка задачи взята из работы [7]. Исходная область представляет собой параллелепипед с высотой 0,4 и длинами сторон 1,5, заполненный газом, с уравнением состояния $P = c_{зв}^2 (\rho - \rho_0)$. На верхней грани задается постоянное давление $P = 1$, нижняя грань является свободной поверхностью, а боковые грани — жесткими стенками.

В начальный момент времени по всей области задается возмущение

$$y = y_0 - A_0 \left(\cos \frac{\pi x}{l_1} + \cos \frac{\pi z}{l_2} \right).$$

Начальные параметры следующие: $c_{зв} = 1; l_1 = l_2 = 1,5; \rho_0 = 20; A_0 = 0,004$.

Расчет велся до момента времени $t = 12$. Счетная область разбивалась на 21 точку по направлениям Ox и Oz и на 6 точек по направлению Oy . Так как аналитического решения задача не имеет, сравнение проводилось с расчетами по другим методикам [6—10]. Результаты расчетов сравнивались по росту амплитуды возмущения в сечениях $z = 0$ и $z = 1,5$. Соответствующие кривые приведены на рис. 3. Видно хорошее согласие с результатами, полученными по другим методикам.

На рис. 4 приведены расчетные области на моменты времени $t = 10$ и $t = 12$.

Задача 3. Расчет неустойчивости Рихтмайера—Мешкова [11, 16]. В двумерной по-

Таблица 1

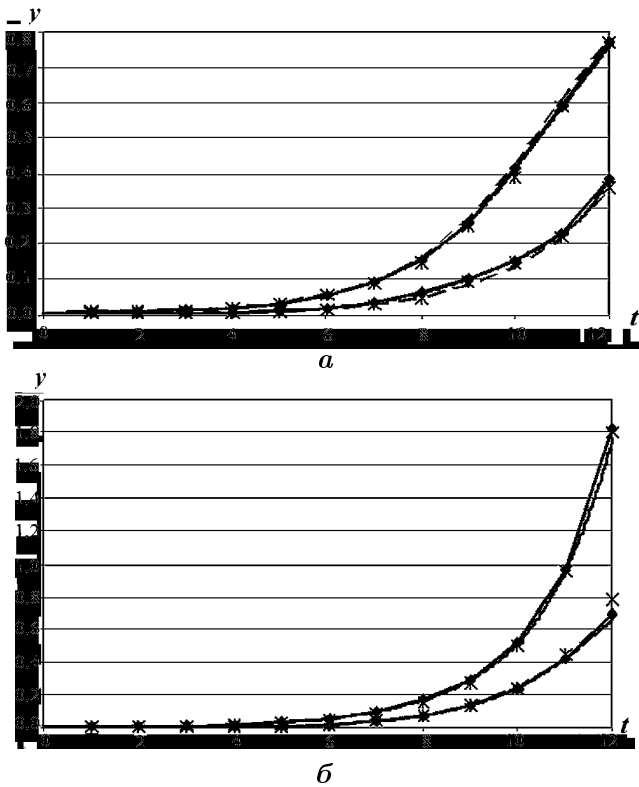


Рис. 3. Задача 2. Расчетные зависимости амплитуды возмущения от времени: *a* — $z = 1,5$; *b* — $z = 0$: нижние кривые — на нижней поверхности, верхние — на верхней поверхности; \blacklozenge — по методике ДЗ; --- — МИМОЗА; \times — РАМЗЕС; — — ЛЭГАК-3D

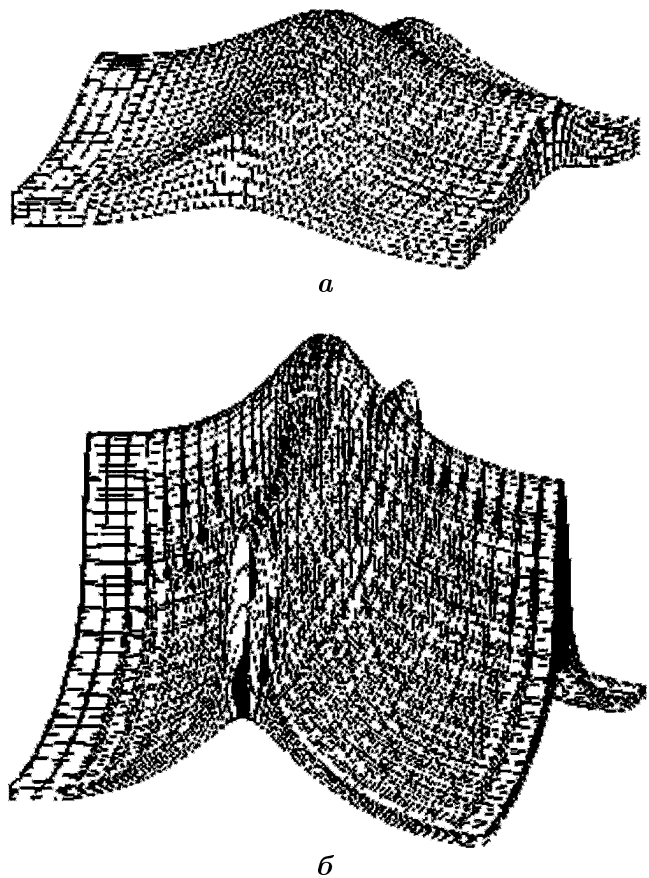


Рис. 4. Задача 2. Расчетная область: *a* — $t = 10$; *b* — $t = 12$

становке эта задача рассмотрена в [5]. В трехмерной постановке расчет этой задачи был проведен по методике МЕДУЗА [10].

В области $0 \leq X \leq 12$ см, $0 \leq Y \leq 12$ см, $0 \leq Z \leq 24$ см находятся два идеальных газа: воздух с параметрами $\rho = 0,001205$ г/см³; $e = 0,2033195$ кДж/г; $\gamma = 1,4$ и фреон с параметрами $\rho = 0,00513$ г/см³; $e = 0,1374339$ кДж/г; $\gamma = 1,139$. Фреон занимает область $0 \leq X \leq 6$ см, $0 \leq Y \leq 6$ см, $0 \leq Z \leq 9$ см. Начальная геометрия задачи представлена на рис. 5.

Все границы счетной области, кроме верхней, — жесткие стенки. На верхней границе области ($Z = 24$ см) задавалось давление $P = 2,2148 \cdot 10^{-4}$ ГПа. Начальная сетка разбивалась на 101 строку, 101 столбец и 101 лист по направлениям Z , X , Y соответственно. Листы счетной сетки располагались параллельно плоскости XOZ . Сетка в листах в интервале $0 \leq Z \leq 9$ см содержала 90, а в интервале $9 \leq Z \leq 24$ см — 10 строк. Сетка по столбцам и листам — равномерная по расстоянию.

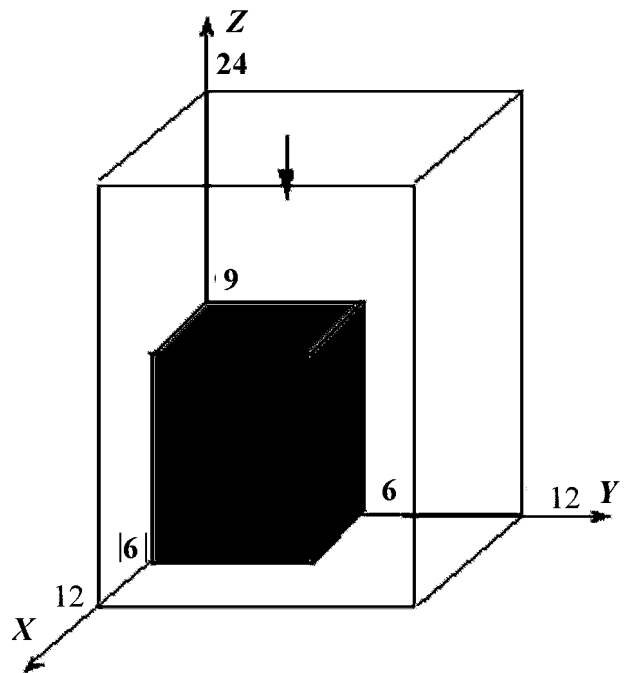


Рис. 5. Начальная геометрия задачи 3

Область $0 \leq Z \leq 9$ см до момента времени $t = 650$ мкс была неподвижной. После этого момента сетка во всей задаче поддерживалась равномерной по расстоянию.

На рис. 6 представлены сечения области плоскостями $X = 0$, $Y = 0$ и $X = Y$ (диагональное сечение) на момент времени $t = 750$ мкс (сечение построено с использованием симметрии решения).

На рис. 7 представлено развитие неустойчивости на различные моменты времени.

Результаты расчетов этой задачи по комплексу расчетов ЛЭГАК-3D согласуются с результатами расчетов, проведенных по комплексу МЕДУЗА-3D [10].

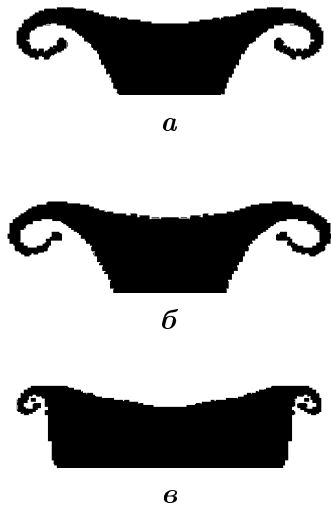


Рис. 6. Задача 3. Сечения области на момент времени $t = 750$ мкс: *a* — плоскостью $X = 0$; *б* — плоскостью $Y = 0$; *в* — плоскостью $X = Y$

Задача 4. Разгон и сжатие сферической оболочки слоем ВВ [12]. Начальная геометрия задачи с полем концентраций представлена на рис. 8.

В области $0 < r < 8,14$ см находится вакуум.

Область $8,14 < r < 8,8$ см — оболочка с уравнением состояния типа Ми—Грюнайзена с параметрами $\rho_{00} = 7,82$ г/см³; $\gamma = 3,5474$; $c_0 = 4,9$ км/с; $n = 3$.

В области $8,8 < r < 15$ см находится ВВ. Уравнение состояния ВВ и продуктов взрыва $P = (\gamma - 1)\rho e$, $\gamma = 3$.

В области $15 < r < 30$ см — вакуум.

Начальные условия: $\rho_{\text{обол}} = 7,82$ г/см³; $\rho_{\text{ВВ}} = 1,67$ г/см³; $E_{\text{обол}} = E_{\text{ВВ}} = U_{\text{обол}} = U_{\text{ВВ}} = 0$.

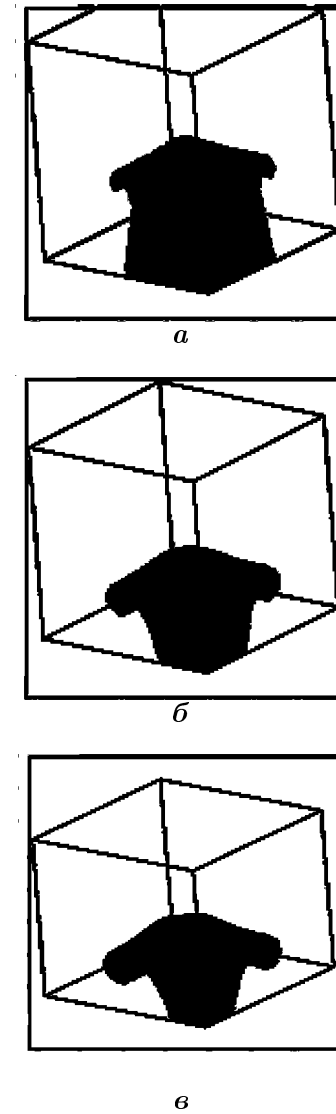


Рис. 7. Задача 3. Развитие неустойчивости на различные моменты времени: *a* — $t = 500$ мкс; *б* — $t = 660$ мкс; *в* — $t = 750$ мкс

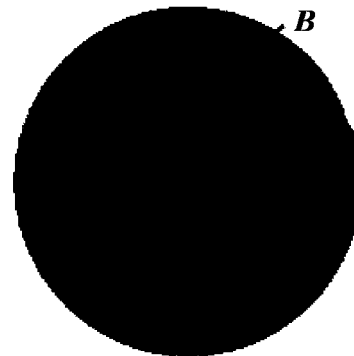


Рис. 8. Начальная геометрия задачи 4

Параметры ВВ: калорийность $Q = 3,61$ кДж/г; скорость детонации $D = 7,6$ км/с. Иницирование детонации происходит в точке с координатами $x = 0$; $y = 15$ см; $z = 0$ (см. рис. 8, точка В).

Задача считалась до момента максимального сжатия оболочки. Счетная область разбивалась на 100 точек по строкам, 30 точек по столбцам, 60 точек по листам (полный разворот): на вакуум и оболочку — 30 точек по радиусу, на ВВ и вакуум — 70 точек по радиусу равномерно по расстоянию. Тип интерполяции вдоль строк — равномерно по углу, вдоль столбцов — отделение ВВ от оболочки лагранжевой линией, в остальных точках — безытерационное равномерное разбиение.

На рис. 9 приведена картина развития волны детонации.

На рис. 10 показан фрагмент счетной области на момент времени $t = 50$ мкс.

В ходе процесса происходит схлопывание оболочки, в какой-то момент достигается максимальное значение ее плотности. В расчетах фиксировался этот момент и соответствующее максимальное значение плотности оболочки.

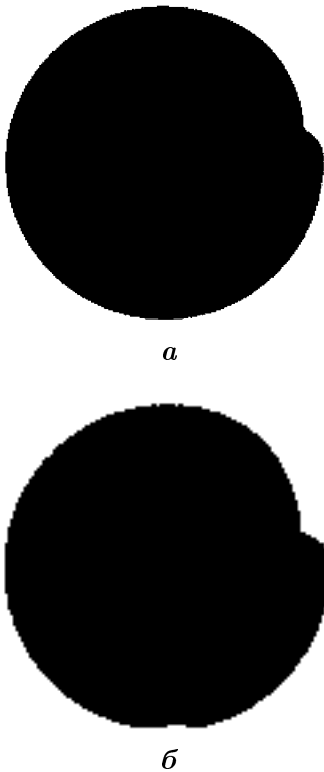


Рис. 9. Задача 4. Трехмерное сечение поля концентраций системы: $a - t = 15$ мкс; $b - t = 35$ мкс

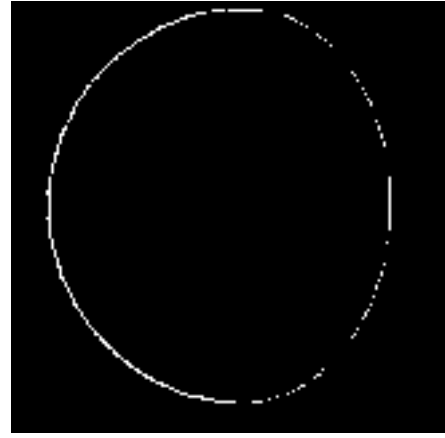


Рис. 10. Задача 4. Фрагмент счетной области на момент времени $t = 50$ мкс

Также была посчитана задача по комплексу ЛЭГАК с иницированием на оси системы.

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета задачи 4

Расчет	Время максимального обжатия оболочки, мкс	Максимальная средняя плотность оболочки, г/см ³
ЛЭГАК	60,8	8,93
ЛЭГАК-3D	60,3	8,82

Заключение

Комплекс программ ЛЭГАК-3D для расчета трехмерных нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды функционирует на многопроцессорных вычислительных системах с распределенной памятью.

Расчеты разных типов задач подтвердили работоспособность как методики ЛЭГАК-3D, так и комплекса, реализующего эту методику.

Расчеты, проведенные в многопроцессорном режиме, показали приемлемую эффективность распараллеливания комплекса. На матричной декомпозиции 10 строк, 10 столбцов и 100 листов эффективность составила 60 % при использовании 100 процессоров.

В настоящее время функционирует однообластной вариант комплекса. В планы авторов на ближайшее время входит завершение работ по обеспечению возможности счета задач в многообластной постановке, что значительно увели-

чит возможности комплекса и уменьшит затраты времени ЭВМ на проведение расчетов. При переходе к реализации многообластного счета в трехмерном комплексе программ ЛЭГАК-3D, скорее всего, потребуется расширение функций служебного комплекса подпрограмм.

Работы по более глубокому распараллеливанию (декомпозиция по третьему измерению) предполагается провести на следующем этапе разработки комплекса программ ЛЭГАК-3D.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 02—01—0796).

Список литературы

1. *Бахрах С. М., Спиридонов В. Ф., Шанин А. А.* Метод расчета газодинамических течений неоднородной среды в лагранжево-эйлеровых переменных // Докл. АН СССР. 1984. Т. 276, № 4. С. 429—433.
2. *Бахрах С. М., Спиридонов В. Ф.* Метод концентраций расчета нестационарных течений сплошной среды // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1999. Вып. 4. С. 32—36.
3. *Бахрах С. М., Спиридонов В. Ф.* Схема согласованной аппроксимации потоков в методике ЛЭГАК // Там же. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1988. Вып. 4. С. 38—43.
4. *Бахрах С. М., Глаголева Ю. Г., Самигулин М. С. и др.* Расчет газодинамических течений на основе метода концентраций // Докл. АН СССР. 1981. Т. 257, № 3. С. 257; № 3. С. 566—569.
5. *Ковеня В. В., Яненко Н. Н.* Метод расщепления в задачах газовой динамики. Новосибирск: Наука, 1981.
6. *Воронин Б. Л., Скрыпник С. И., Софронов И. Д.* Эйлерово-лагранжева методика численного решения трехмерных нестационарных задач газовой динамики с учетом теплопроводности // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1988. Вып. 3. С. 3—8.
7. *Змушко В. В., Плетенев Ф. А., Сарев В. А., Софронов И. Д.* Методика решения трехмерных уравнений газовой динамики в смешанных лагранжево-эйлеровых координатах // Там же. Вып. 1. С. 22—27.
8. *Артемов А. Ю., Делов В. И., Дмитриева Л. В.* Методика расчета трехмерных нестационарных задач газодинамики в переменных Лагранжа // Там же. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1989. Вып. 1. С. 30—39.
9. *Стадник А. Л., Шанин А. А., Ячилкин Ю. В.* Эйлерова методика ТРЭК для расчета трехмерных газодинамических течений многокомпонентной среды // Там же. 1994. Вып. 4. С. 71—78.
10. *Барabanов Р. А., Бутнев О. И., Волков С. Г. и др.* Программа Медуза-3D расчета трехмерных задач газовой динамики на нерегулярных сетках. Расчеты неустойчивости Рихтмайера—Мешкова // Сб. докл. науч.-тех. конф. "Молодежь в науке". Саров, 2003. С. 13—18.
11. *Бахрах С. М., Спиридонов В. Ф., Зайцева М. О. и др.* Разностная схема расчета трехмерной лагранжевой газодинамики в комплексе ЛЭГАК-3D // "Молодежь в науке". Сб. тезисов докладов III науч.-тех. конф. Саров. 2004. С. 26.
12. *Бахрах С. М., Безрукова И. Ю., Борляев В. В. и др.* Корректировка сетки и пересчет величин в комплексе программ ЛЭГАК-3D // Там же. С. 19.
13. *Бахрах С. М., Борляев В. В., Володина Н. А.* Алгоритмы сглаживания высокочастотных возмущений поля скоростей в комплексе программ ЛЭГАК-3D // Там же. С. 38.
14. *Бахрах С. М., Спиридонов В. Ф., Циберев К. В.* Алгоритмы контроля скорости детонационной волны в комплексе программ ЛЭГАК-3D // Там же. С. 16.
15. *Авдеев П. А., Артамонов М. В., Бахрах С. М. и др.* Комплекс программ ЛЭГАК для расчета нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы реализации комплекса на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2001. Вып. 3. С. 14—18.

16. MPI: A Message Passing Interface Standart // Message Passing Interface Forum. March 22, 1994.
 17. Немчинов И. В. Разлет трехосного газового эллипсоида в регулярном режиме // ПММ. 1965. Вып. 1. С. 134—140.
 18. Бахрах С. М., Величко С. В., Спиридонов В. Ф. Безавостная технология расчета течений сплошной среды по методике ЛЭГАК на многопроцессорных ЭВМ // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2002. Вып. 3. С. 14—21.
-