

УДК 519.6

## МЕТОДИКА СОЛЯРИС ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ ЭВМ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ В МНОГОМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ С ВАКУУМНЫМИ ПОЛОСТЯМИ С УЧЕТОМ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ И ДРУГИХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

О. А. Абрамова, А. А. Базин, Г. В. Долголёва, Т. В. Королькова,  
С. Н. Крупина, В. М. Мельников, В. Ф. Миронова, Е. А. Новикова,  
П. И. Певная, Е. И. Рябов, И. Н. Салова, Б. П. Тихомиров,  
Ю. А. Циберева, Р. М. Шагалиев, Б. Н. Шамраев  
(РФЯЦ-ВНИИЭФ)

Описывается методика СОЛЯРИС, предназначенная для численного моделирования на многопроцессорных ЭВМ переноса излучения в сложных многомерных конструкциях, содержащих оптически плотные и оптически прозрачные области, с учетом газодинамического движения и спектрального переноса излучения в веществе в квазидиффузионном приближении в одномерной постановке.

Сформулированы физико-математические модели, изложены принципы построения методики, моделирующей разнородные физические процессы, описываются основные алгоритмы методики и подходы к распараллеливанию, приводятся результаты эффективности распараллеливания.

*Ключевые слова:* численное моделирование, спектральный перенос излучения в вакууме, теплопроводность, квазидиффузионное приближение, одномерное приближение, газовая динамика, спектральная диффузия, неравновесная диффузия, коэффициенты видимости, кинетика термоядерного горения, поглощение и перенос лазерной энергии, кинетика разложения и горения взрывчатого вещества, вспучивание полимерного покрытия, плавление, параллельные вычисления.

Одним из эффективных приближенных методов численного решения переноса излучения в сложных конструкциях, содержащих прозрачные для света полости, является метод, при котором в оптически плотных областях используется диффузионное приближение, а в прозрачных полостях решается уравнение переноса излучения в вакууме. При этом газодинамическое движение вещества в оптически плотных областях учитывается в одномерном секторном приближении. В каждом секторе решаются одномерные уравнения газовой динамики и переноса излучения, а в соответствующих сектору многомерных фрагментах учитываются поправки к объемам, поверхностям, плотностям веществ и т. д.

Такой подход достаточно давно развивается в РФЯЦ-ВНИИЭФ. В [1, 2] рассмотре-

ны приближенные математические методики, созданные в РФЯЦ-ВНИИЭФ для численного решения двумерных и трехмерных нестационарных задач теплопроводности и переноса энергии излучением в многосвязных областях с фиксированными и изменяемыми граничными поверхностями. В этих моделях движение среды либо задается таблично, либо описывается одномерными уравнениями газовой динамики. Перенос излучения в оптически прозрачной среде описывается интегральным уравнением, которое решается с помощью коэффициентов видимости.

Методика СОЛЯРИС базируется на основных идеях и является дальнейшим развитием приближенных методик [1, 2].

## Основные принципы организации методики СОЛЯРИС

Методика СОЛЯРИС предназначена для численного моделирования на ЭВМ с массовым параллелизмом переноса излучения в многомерных вакуумных областях и ряда физических процессов в сплошной среде. СОЛЯРИС является открытой методикой и дружелюбно настроена на работу с другими методиками, для которых она может предоставить прежде всего расчет переноса излучения в прозрачных для света областях.

В настоящее время в методике СОЛЯРИС возможно численное моделирование следующих физических процессов в двумерной и трехмерной постановках:

- перенос излучения в прозрачных для света средах;
- нелинейная и лучистая теплопроводность;
- химическая кинетика разложения и горения взрывчатых веществ (ВВ);
- плавление вещества;
- вспучивание специальных полимерных защитных покрытий;
- конвективный перенос тепла в диффузионном приближении

и моделирование в одномерной постановке методики СНД [3] следующих физических процессов:

- газодинамики;
- переноса тепла ионами и электронами;
- переноса излучения и взаимодействия его с веществом;
- кинетики термоядерного горения;
- поглощения и переноса лазерной энергии.

Совокупность моделей всех указанных процессов позволяет проводить численное моделирование:

- процессов лучистого теплообмена в сложных многомерных конструкциях, содержащих оптически плотные и оптически прозрачные области, с учетом газодинамического движения и спектрального переноса излучения в веществе в квазидиффузионном приближении в одномерной постановке (секторном приближении);
- процессов длительного нагревания и воспламенения ВВ в сложных конструкциях в двумерной и трехмерной постановках с учетом

нелинейной теплопроводности, химической кинетики разложения и горения ВВ, плавления веществ, вспучивания специальных полимерных защитных покрытий, конвективного переноса тепла в диффузионном приближении, переноса излучения в прозрачных для света средах;

- спектрального переноса излучения в рентгеновских мишенях в двумерной и трехмерной постановках с учетом газодинамического движения и спектрального переноса излучения в веществе в квазидиффузионном приближении в одномерной постановке (секторном приближении).

Кроме того, реализована связь СОЛЯРИС с *многомерной газодинамической* методикой МИМОЗА (методика решения многомерных задач газодинамики, спектрального переноса излучения в диффузионном приближении, теплопроводности, упругопластики и других физических процессов [4]). Расчеты модельных задач МИМОЗА—СОЛЯРИС подтвердили правильность разработанных алгоритмов, позволили отработать основные принципиальные вопросы связи СОЛЯРИС с многомерными газодинамическими методиками и подойти к решению задач переноса излучения в достаточно произвольных двумерных и трехмерных вакуумных областях с изменяющейся в процессе счета геометрией с учетом газодинамического движения и переноса излучения в диффузионном приближении в веществе в многомерной постановке.

Организация методики СОЛЯРИС основывается на следующих основных положениях:

- в различных фрагментах области решения задачи могут рассчитываться различные физические процессы;
- моделирование совокупности физических процессов осуществляется на основе метода расщепления по физическим процессам;
- область решения задачи является многомерной (двумерной или трехмерной), многосвязной и состоит из областей трех типов: 1) многомерные области, заполненные оптически плотным веществом (диффузионные области); 2) многомерные области с пренебрежимо малым поглощением и рассеянием излучения (вакуумные области); 3) области, в которых физические процессы моделируются в одномерном (секторном) приближении;

- диффузионная область может разбиваться на подобласти (счетные области), в каждой из которых задается своя система координат и своя регулярная (структурированная) пространственная расчетная сетка;
- вакуумная область покрывается нерегулярной (неструктурированной) сеткой граничных элементов;
- в процессе счета может изменяться конфигурация области и ее состав, а для вакуумных областей возможно изменение числа граничных элементов, образующих их поверхности, и числа самих областей;
- методика удовлетворяет свойству *коммуникабельности* — максимальной доступности другим методикам. Другими словами, при организации связи с другими методиками требуются минимальные изменения в СОЛЯРИС и этих методиках (в идеале необходимо разработать только интерфейсные программы связи);
- методика удовлетворяет свойству мобильности — максимальной переносимости на различные ЭВМ;
- расчеты по методике могут проводиться на любом числе процессоров с приемлемым обеспечением масштабируемости вычислений;
- методика реализована на языке Fortran-90;
- для реализации межпроцессорных обменов используется система сообщений MPI.

### Численное моделирование переноса излучения в вакууме

**Постановка задачи.** В вакуумных областях решается интегральное уравнение переноса излучения через оптически прозрачную среду

$$J_{\nu}^{-}(P, t) = \int_{S(P)} J_{\nu}^{+}(Q, t - \frac{\rho_{PQ}}{c}) \frac{\cos(\vec{n}_P, \overrightarrow{PQ}) \cos(n_Q, \overrightarrow{QP})}{\pi \rho_{PQ}^2} dS_Q \quad (1)$$

с граничным условием

$$J_{\nu}^{-} = J_{\nu}^{+} + q_{\nu}, \quad (2)$$

где  $J_{\nu}^{+}$  и  $J_{\nu}^{-}$  — спектральные односторонние потоки излучения в направлениях внутренней и внешней нормалей к поверхности  $S$  соответственно;  $P$  и  $Q$  — точки, принадлежащие поверхности  $S$ ;  $S(P)$  — видимая из точки  $P$

поверхности  $S$ ;  $\rho_{PQ}$  — расстояние между точками  $P$  и  $Q$ ;  $\vec{n}_P$  — внутренняя нормаль к поверхности  $S$  в точке  $P$ ;  $q_{\nu}$  — проекция результирующего спектрального потока излучения на направление внешней нормали к поверхности.

Уравнение (1) аппроксимируется системой линейных алгебраических уравнений относительно осредненных по граничным элементам потоков излучения:

$$J_i^{-} = \sum_{j=1}^N a_{ij} J_j^{+} \left( t - \frac{\rho_{ij}}{c} \right), \quad i = \overline{1, N},$$

где

$$a_{ij} = \frac{1}{S_i} \iint_{S_i S_j} \frac{\cos(\vec{n}_i, \overrightarrow{P_i Q_j}) \cos(\vec{n}_j, \overrightarrow{Q_j P_i})}{\pi \rho_{ij}^2} dS_i dS_j, \\ i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, N}$$

— так называемые коэффициенты видимости (рис. 1) [5].

Граничные условия (2) реализуются по безусловно устойчивой схеме, предложенной в работе [6].

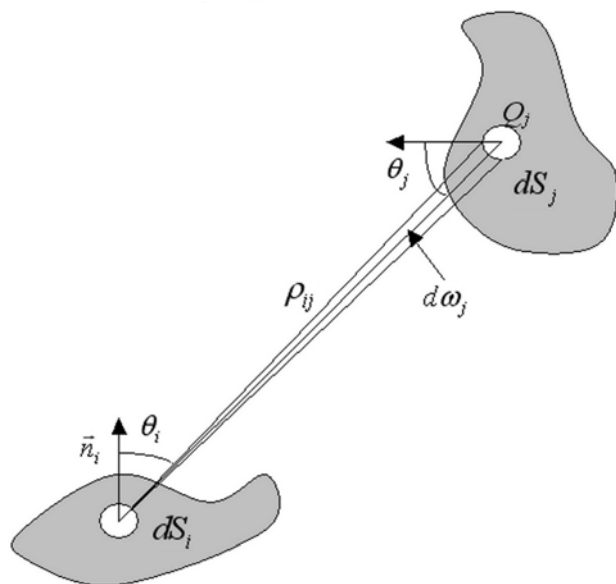


Рис. 1. Определение коэффициента видимости между произвольными поверхностями конечных размеров

**Формирование вакуумных областей.** Поверхностная сетка вакуумной области является

нерегулярной и может состоять из плоских граничных элементов произвольной конфигурации. В методике СОЛЯРИС может обрабатываться любое число многосвязных вакуумных областей практически произвольной конфигурации. При этом в процессе счета у каждой вакуумной области может изменяться геометрия и число граничных элементов, образующих ее поверхность. Более того, в процессе счета возможно изменение числа вакуумных областей.

Вакуумные области формируются автоматически из частей поверхностей, которые могут рассчитываться на разных процессорах. Их формирование производится на всех процессорах, поскольку для расчета коэффициентов видимости необходима полная геометрия вакуумной области. Формирование вакуумных областей осуществляется в несколько этапов.

На первом этапе, после получения всех частей поверхностей всех вакуумных областей, производится простое объединение этих частей в связанные поверхности. Объединение производится по близости точек границы частей поверхностей.

На втором этапе поверхности проверяются на вложенность друг в друга и из них формируется дерево, состоящее из упорядоченных цепочек вложенных поверхностей:  $S_1 \supset S_{11} \supset S_{111} \dots$ ,  $S_1 \supset S_{11} \supset S_{11k} \dots$ ,  $\dots$ ,  $S_n \supset S_{nj} \supset S_{njr} \dots$  (рис. 2).

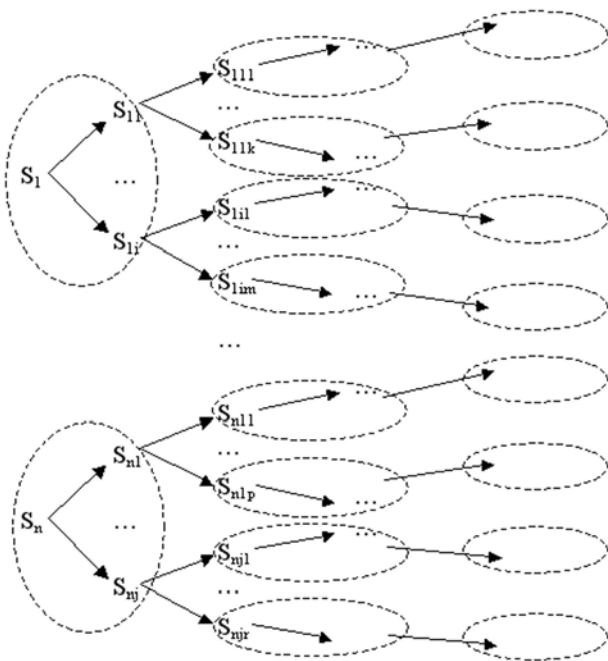


Рис. 2. Дерево вложенных поверхностей

На третьем этапе анализируется дерево вложенных поверхностей и формируется список вакуумных областей. Формирование вакуумной области начинается с поверхности, которая не находится внутри других поверхностей. Эта поверхность объявляется вакуумной областью. Далее просматривается дерево поверхностей и к выбранной поверхности присоединяются вложенные в нее поверхности, располагающиеся в следующем по дереву ряду. Список выбранных по соседству поверхностей образует вакуумную область. Новая вакуумная область присоединяется к списку вакуумных областей. Данная процедура продолжается до тех пор, пока не будут выбраны все поверхности дерева.

При расчете переноса излучения на каждом счетном шаге по времени на каждом процессоре осуществляется прием со всех процессоров новых значений полей излучения для всех граничных элементов вакуумных областей, полученных при расчете предыдущих физических процессов. При этом передача данных между процессорами осуществляется с помощью коллективных обменов MPI. Рассчитанные новые значения полей передаются как граничные величины для расчета следующего физического процесса и, как правило, остаются на тех же процессорах, на которых происходил их расчет.

### Расчет коэффициентов видимости.

Основное время в расчете переноса излучения занимает процесс вычисления коэффициентов видимости. В зависимости от задачи расчет полной матрицы коэффициентов может занимать от нескольких минут до нескольких часов. Поэтому пересчет коэффициентов на каждом газодинамическом счетном шаге практически невозможен. К тому же для хранения коэффициентов требуется большой объем памяти ( $\approx n^2$  для  $n$  граничных элементов), и оперативной памяти ЭВМ может оказаться недостаточно.

Для повышения эффективности расчета коэффициентов видимости в методике СОЛЯРИС реализованы как различные базовые алгоритмы расчета коэффициентов, так и дополнительные алгоритмы, оптимизирующие способы и число вызовов программ расчета коэффициентов.

В методике СОЛЯРИС реализовано три базовых алгоритма расчета коэффициентов видимости:

- 1) метод половинного куба (hemisphere) [7] — он прост в реализации и достаточно эффективен, если не требуется высокой точности;

- 2) SVBSP (Shadow Volume, Binary Space Partitioning) [8] — основан на аналитическом подсчете коэффициента видимости между точечным источником и прямоугольником, поэтому дает наилучшую точность;
- 3) алгоритм вычисления коэффициентов видимости для осесимметричных вакуумных областей [9].

Для оптимизации расчета коэффициентов видимости реализованы следующие алгоритмы.

*Разбиение пространства над источником.* Если полупространство над источником разделить на некоторые конические сегменты, то вычисление коэффициентов видимости в каждом из этих сегментов можно выполнять независимо (рис. 3) [10].

Количество плоских многоугольников, представляющих геометрию сегмента, как правило, существенно меньше количества многоугольников, описывающих геометрию всей задачи. Поэтому последовательные расчеты коэффициентов видимости в каждом сегменте и последующее их объединение могут оказаться эффективнее громоздкого расчета коэффициентов во всем полупространстве. Разбиение можно провести неравномерно, в каждом сегменте применив свой базовый алгоритм.

Для области, ограниченной двумя сферами с общим центром, аппроксимированной  $\sim 6000$  треугольниками, разделение на два сегмента при использовании алгоритма SVBSP дает экономию времени  $\sim 30\%$ . Примерно так же обстоит дело и при каждом последующем делении, пока число треугольников в сегменте превышает  $\sim 1500$ ; после этого порога эффективность теряется.

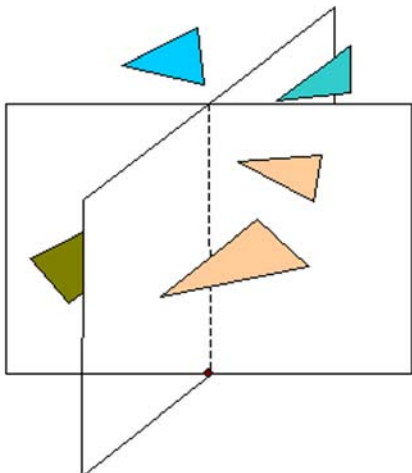


Рис. 3. Разбиение пространства над источником на сегменты

*Учет осевой симметрии.* Для поверхностей, обладающих симметрией бесконечного порядка относительно некоторой оси, достаточно рассчитать лишь строки матрицы коэффициентов видимости, соответствующие граничным элементам с центрами, лежащими в одной из плоскостей, проходящих через ось. Другие строки матрицы коэффициентов видимости получаются из рассчитанных строк циклическим сдвигом. В качестве иллюстрации приводится рис. 4, а, где показано, что элемент  $i$  "видит" элемент  $j$  так же, как элемент  $i+k$  видит элемент  $j+k$ .

Таким образом, время счета сокращается пропорционально числу разбиений сетки по углу вращения.

В случае симметрии конечного порядка (рис. 4, б) возможно выполнение расчета строк коэффициентов только для первой точки из каждой группы симметрии, т. е. для первого блока. Коэффициенты для элементов из остальных блоков получаются из значений коэффициентов для соответствующих строк предыдущего блока циклическим сдвигом на число граничных элементов в блоке.

Таким образом, в случае симметрии конечного порядка время счета сокращается пропорционально числу повторяющихся блоков.

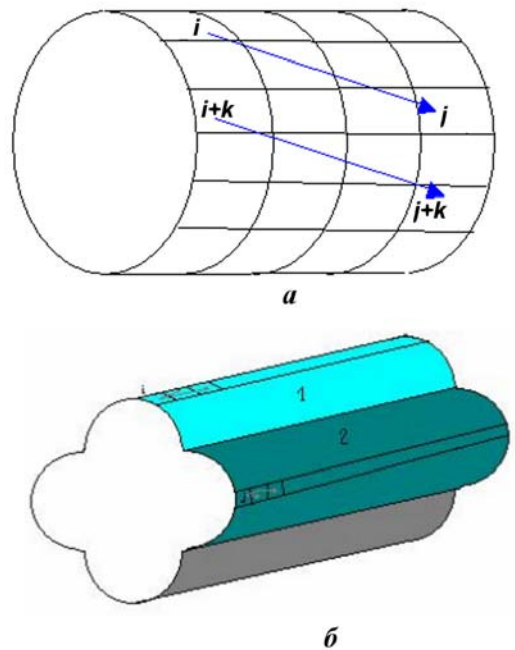


Рис. 4. Учет осевой симметрии бесконечного и конечного порядков: а — видимость одних граничных элементов другими; б — случай симметрии конечного порядка

Оценка необходимости пересчета коэффициентов видимости. В расчетах переноса излучения в вакуумной области с подвижными границами характерное время изменения геометрии вакуумной области гораздо больше характерного времени течения физического процесса. Для учета этого обстоятельства разработан алгоритм оптимизации числа вызовов программы расчета коэффициентов видимости. Суть алгоритма состоит в отслеживании изменения площади поверхности вакуумной области и ее кривизны.

Использование данного алгоритма в задачах с изменяющейся геометрией вакуумных областей позволило сократить время расчета коэффициентов видимости в 10 и более раз практически без потери точности вычислений коэффициентов и основных рассчитываемых полей излучения.

Расчет коэффициентов видимости в параллельном режиме. Вычисление коэффициента видимости для каждого граничного элемента требует полной информации о геометрии поверхности. Поэтому данные о геометрии рассылаются на каждый процессор.

Коэффициенты видимости для каждого граничного элемента вычисляются независимо, поэтому расчет матрицы коэффициентов, где строка соответствует элементу поверхности, распараллеливается по строкам.

Расчет коэффициентов видимости для разных элементов требует разных вычислительных затрат. Для сбалансированной загрузки процессоров применяется рассеивание (scatter) [10] строк матрицы по процессорам. В данном алгоритме строки распределяются последовательно по процессорам: первая строка — на первый процессор, вторая — на второй и т. д. После перебора всех процессоров распределение строк продолжается с первого процессора по той же схеме. Таким образом, произвольная  $i$ -я строка матрицы коэффициентов видимости будет рассчитываться на процессоре с номером  $n = \{i/N\}$  — остаток от деления  $i$  на  $N$ , где  $N$  — общее число процессоров.

### Численное моделирование процессов в диффузионных областях

**Теплопроводность.** В областях, заполненных оптически плотным веществом, может рассчитываться несколько процессов.

Прежде всего решается уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\operatorname{div} \bar{S} + f, \quad (3)$$

где  $E = \rho c T + a T^4$  — плотность энергии вещества и излучения;  $\bar{S}$  — поток тепла,

$$\bar{S} = \begin{cases} -\frac{lc}{3} \nabla a T^4 & \text{— лучистая теплопроводность;} \\ -\lambda \nabla T & \text{— нелинейная теплопроводность,} \\ & \lambda = \lambda(T); \end{cases}$$

$f$  — источник тепла.

Уравнение теплопроводности аппроксимируется на неортогональной пространственной сетке схемой расщепления по пространственным переменным и содержит смешанные производные. Аппроксимация смешанных производных берется с предыдущего слоя.

**Кинетика горения ВВ.** В различных фрагментах области расчета могут решаться системы уравнений многокомпонентной многостадийной химической кинетики разложения и горения ВВ

$$\frac{dw_i}{dt} = \sum_{j=1}^n \alpha_j(T) w_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \beta_{jk}(T) w_j w_k, \\ i = 1, \dots, n$$

с источниками типа

$$f = \sum_{i=1}^n q_i \alpha_i(T) w_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n q_{ij} \beta_{ij}(T) w_i w_j$$

для уравнения (3), где  $w_i$  — концентрация  $i$ -го компонента ВВ;  $\alpha_j, \beta_{jk}$  — коэффициенты кинетики;  $q_i, q_{ij}$  — тепловые эффекты реакций.

Уравнения химической кинетики аппроксимируются неявной разностной схемой первого порядка.

В дополнение к указанным процессам возможно моделирование фазовых переходов в веществах [11], вспучивания специальных полимерных защитных покрытий [12–14] и учет конвективного переноса тепла в осесимметричных воздушных прослойках [15].

**Фазовые переходы.** При моделировании фазовых переходов за основу взят метод, предложенный в работе [11]. Суть метода сводится к тому, что учет основного соотношения для энтальпии при фазовом переходе

первого рода осуществляется непосредственно в нелинейном уравнении теплопроводности (3) заменой коэффициента теплоемкости  $c(T)$  на обобщенный коэффициент теплоемкости  $\tilde{c}(T) = c(T) + \Delta h \delta(T - T^*)$ , где  $\Delta h \equiv h_2 - h_1$  — теплота перехода единицы массы,  $h_1$  и  $h_2$  — удельные энтальпии первой и второй фаз,  $h_i = \int_0^T c_i(T) dT + h_0$ ;  $T^*$  — температура фазового перехода;  $\delta(\xi)$  — дельта-функция Дирака.

**Вспучивание огнезащитного покрытия.** Моделирование этого процесса основывается на предположении, что защитное покрытие имеет в начальный момент малую толщину по сравнению с линейными размерами площади покрытия и увеличение его объема происходит только в направлении нормали к поверхности, на которую оно нанесено [12–14]. Это приводит к тому, что при вспучивании вещества положение вершин пространственных ячеек можно определить из уравнения сохранения масс

$$\int_{V(t_1)} \rho(\bar{r}, t_1) dV = \int_{V(t_2)} \rho(\bar{r}, t_2) dV,$$

где  $\rho$  — плотность вещества.

В процессе вспучивания покрытия происходит изменение поверхности вакуумной области, граничащей с покрытием. При этом пересчет коэффициентов видимости производится по мере необходимости в соответствии с описанным выше алгоритмом.

**Учет конвективного переноса тепла.** Осуществляется только для воздушных осесимметричных горизонтальных слоев в диффузионном приближении [15]. В уравнении (3) молекулярная теплопроводность  $\lambda = \lambda(T)$  заменяется на эквивалентную теплопроводность  $\lambda_{\text{эКВ}} = \xi \lambda(T)$ , где безразмерный коэффициент  $\xi$  учитывает влияние конвекции и зависит от толщины воздушного слоя и от разности температур на границах воздушной прослойки.

**Диффузионная область расчета.** Геометрия диффузионной области расчета может быть достаточно произвольной. Область может быть многосвязной и включать практически произвольное число различных веществ, образующих неоднородные включения произвольной геометрии. При необходимости область расчета можно

разбить на произвольное число математических подобластей, в каждой из которых задается своя система координат и своя расчетная сетка.

Расчет в трехмерной области ведется в системе координат с выделенной координатной линией, ортогональной двум другим координатным линиям. Двумерная пространственная разностная сетка (при решении трехмерных задач это сетка для плоскостей, нормальных к выделенной координатной линии) в диффузионной области может быть произвольной неортогональной, но регулярной четырехугольной. Сетка может изменяться в процессе счета.

Локальные неоднородности в процессе счета также могут изменять параметры составляющих их веществ и свою геометрию. При этом вещества могут переходить в другие вещества за счет фазовых переходов. Геометрия неоднородности может изменяться вследствие фазовых переходов, вспучивания специальных полимеров.

### Моделирование физических процессов в одномерной постановке

Для некоторых классов задач вполне подходящим является приближение, при котором моделирование некоторых процессов осуществляется в одномерной постановке [1, 2]. При этом диффузионная область может входить в расчетные области одномерных задач, а вакуумная область — представляться разреженным воздухом. При совместных многомерных и одномерных расчетах в диффузионных и вакуумных областях в СОЛЯРИС, как и в методиках [1, 2], учитывается газодинамическое движение вещества с помощью поправок к объемам и поверхностям ячеек, плотностям вещества, поверхностям граничных элементов вакуумных областей и другим параметрам задачи.

В отличие от методик [1, 2] в методике СОЛЯРИС для описания одномерных процессов используется не только методика расчета одномерных газодинамических процессов с теплопроводностью, но и методика СНД [3], в которой моделируется большое число физических процессов. Отметим, что связь *СНД* — *вакуумная область* реализована также в методике СНД—ЛИРА [16].

В методике СНД в одномерной постановке рассчитывается следующая система уравнений в частных производных [3]:

— система уравнений газовой динамики;

- уравнения переноса тепла ионами и электронами;
- уравнение переноса излучения и взаимодействия его с веществом;
- система уравнений кинетики термоядерного горения;
- уравнения, описывающие поглощение и перенос лазерной энергии.

Связь одномерных методик в методике СОЛЯРИС осуществляется через граничные условия и внутренние источники. В СОЛЯРИС осуществляется расчет начальных данных, распределение одномерных секторов по области решения задачи и по процессорам, формирование одномерных секторов и связей СОЛЯРИС с этими секторами.

Программных ограничений на число секторов нет. Более того, возможно задание для каждого граничного элемента поверхности своего сектора. Для реализации такой возможности введено понятие шаблона сектора. При распределении граничных условий исполнителем задается ссылка на шаблон группы секторов. В программе для каждого граничного элемента из шаблона формируется реальный сектор и ссылка на шаблон заменяется ссылкой на реальный сектор.

Время счета различных секторов может сильно различаться. Поэтому при распределении секторов по процессорам учитываются типы секторов, указанных в начальных данных, и число разнородных секторов. Распределение секторов по процессорам осуществляется таким образом, чтобы на каждом процессоре располагалось по возможности одинаковое число разнородных секторов. Такое распределение позволяет сгладить неравномерность загрузки процессоров в расчетах с разнородными секторами.

### Связь с методикой расчета многомерных газодинамических задач

Обращение к методике СОЛЯРИС из газодинамической методики производится после окончания счета газодинамического шага. Связь СОЛЯРИС с газодинамической методикой осуществляется с помощью интерфейсных функций и не затрагивает внутреннюю структуру этой методики. В интерфейсных функциях отбор граничных элементов частей поверхностей и соответствующих им граничных величин производится на основе информации о типе гранично-

го условия связи с вакуумом и знания структуры граничных величин и пространственных сеток газодинамической методики. Все остальные действия — обмен данными, формирование вакуумных областей, расчет переноса излучения, обработку граничных условий — производит СОЛЯРИС. Расчет по методике СОЛЯРИС может производиться на любом числе отведенных процессоров.

### Результаты расчетов

Возможность использования методики СОЛЯРИС при численном моделировании экспериментов по инерционному синтезу оценивалась на задаче о спектральном переносе излучения внутри полости сферического бокса-конвертора рентгеновской мишени. Эксперименты с такими мишенями уже длительное время проводятся в РФЯЦ-ВНИИЭФ на установке "Искра-5", в которой лазерное излучение вводится внутрь бокса 12 лазерными пучками через 6 отверстий. Поглощение лазерного излучения на внутренней поверхности сферического бокса-конвертора приводит к нагреву стенок бокса и генерации рентгеновского излучения (рис. 5).

При численном моделировании внутренняя поверхность бокса-конвертора аппроксимировалась различным числом граничных элементов, каждому из которых соответствовал свой од-

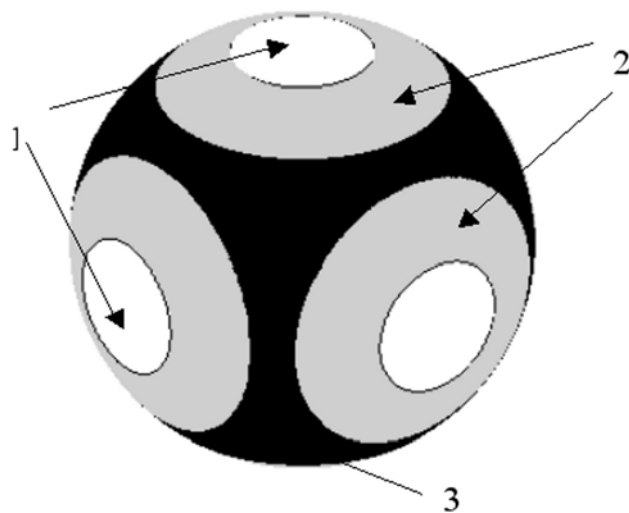


Рис. 5. Схема расположения секторов в расчете переноса рентгеновского излучения в полости сферического бокса: 1 — отверстия; 2 — сектора, освещаемые лазерным излучением; 3 — неосвещенная часть поверхности



номерный сектор. Было использовано два типа секторов (секторов-шаблонов), соответствующих освещенной и неосвещенной частям поверхности бокса-конвертора. Времена счета этих секторов существенно различались.

Проведенные расчеты показали высокую эффективность распараллеливания программ, реализующих методику СОЛЯРИС, на задачах расчета лазерных мишеней. Так, например, в задаче с 256 секторами двух типов, рассчитываемыми по методике СНД, коэффициент эффективности  $f = \frac{t_1 n_1}{t_2 n_2} \cdot 100\%$  был на уровне 95–98% при расчетах на числе процессоров до 64 и падал до 82% при расчете на 256 процессорах, когда на процессоре находился всего один сектор.

В многомерной задаче воспламенения ВВ с 5 вакуумными областями, общим числом граничных элементов поверхностей вакуумных областей, равным 41 000, и числом коэффициентов видимости более  $360 \cdot 10^6$  эффективность распараллеливания расчета коэффициентов видимости находилась на уровне 99% на различном числе процессоров. Эффективность же расчета собственно переноса излучения равнялась 77% на 32 процессорах.

### Список литературы

1. Бабаев Ю. Н., Баженов С. В., Базин А. А. и др. Методики и программы ВНИИЭФ для решения двумерных и трехмерных нестационарных задач лучистого энергопереноса в областях сложной формы с использованием коэффициентов видимости. Проблемы конверсионных приложений // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1995. Вып. 4. С. 3–8.
2. Софронов И. Д., Тихомиров Б. П., Баженов С. В. и др. Приближенные методы расчета лучистого энергопереноса в оптически неоднородных областях сложной формы // Там же. 1999. Вып. 4. С. 68–75.
3. Долголёва Г. В. Методика расчета движения двухтемпературного излучающего газа (Программа СНД) // Там же. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1983. Вып. 2(13). С. 29–33.
4. Софронов И. Д., Винокуров О. А., Змушко В. В. и др. Комплекс программ МИМОЗА-99 // Там же. 1999. Вып. 4. С. 37–41.
5. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975.
6. Базин А. А., Скудан Г. И., Тихомиров Б. П. Устойчивые обменные граничные условия в диффузионно-вакуумной модели лучистого теплопереноса // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1998. Вып. 3. С. 17–23.
7. Cohen M. F., Greenberg D. P. The "Hemisphere": A radiosity solution for complex environments // Computer Graphics. 1985. Vol. 19(3). P. 31–40.
8. Jacob P., Hagen H. A BSP-based algorithm for analytical form-factor calculation // Computer graphics and geometry. 2002. Vol. 5, No 1. <http://www.cgg.ru>
9. Дементьев Ю. А., Машинин Р. Ф., Миронова В. Ф., Ченцов Н. Н. Приближенное вычисление коэффициентов углового распределения для нестационарного теплового излучения с поверхности вращения // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1983. Вып. 1(12). С. 32–34.
10. Шикин Е. В., Боресков А. В. Компьютерная графика. Полигональные модели. М.: Диалог—МИФИ, 2000.
11. Самарский А. А., Моисеенко Б. Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журнал вычисл. мат. и мат. физ. 1965. Т. 5, № 5. С. 816–827.
12. Решетников И. С., Антонов А. В., Халтуринский Н. А. Математическое описание горения вспучивающихся полимерных систем // ФГВ. 1997. Т. 33, № 6. С. 48–67.
13. Исаков Г. Н., Кузин А. Я. Моделирование тепло- и массопереноса в многослойных тепло- и огнезащитных покрытиях при взаимодействии с потоком высокотемпературного газа // Там же. 1998. Т. 34, № 2. С. 82–89.
14. Зверев В. Г., Гольдин В. Д., Несмелов В. В., Цимбалюк А. Ф. Моделирование тепло- и

- массопереноса во вспучивающихся огнезащитных покрытиях // Там же. С. 90—98.
15. *Кутателадзе С. С.* Основы теории теплообмена. М.: Машгиз, 1962.
  16. *Бондаренко С. В., Долголёва Г. В., Новикова Е. А.* Численная методика расчета в секторном приближении спектрального переноса рентгеновского излучения и лазерного поглощения в боксе-конверторе рентгеновской

мишени (программа СНД—ЛИРА) // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2007. Вып. 3—4. С. 15—26.

Статья поступила в редакцию 10.06.09.

---