Методы численного моделирования многомерных задач переноса излучения и частиц во ВНИИЭФ.

Р.М. Шагалиев

Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, проспект Мира, 37, Саров, Нижегородская область, Россия

В докладе дается обзор численных методов решения различных классов (линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных и т.п.) многомерных задач переноса, применяемых и развиваемых в РФЯЦ-ВНИИЭФ. А именно, кратко описаны особенности применения метода Монте-Карло, метода угловых коэффициентов (коэффициентов видимости) и дается подробный анализ детерминистских сеточных методов. При этом особое внимание уделяется вопросам решения нелинейных многомерных нестационарных связанных задач, где наряду с процессами переноса учитывается большое количество других физических процессов.

Введение.

Процессы переноса частиц и их взаимодействия со средой относятся к числу наиболее сложных и трудоёмких для численного решения. В докладе кратко излагаются численные методы решения задач переноса, развитые в РФЯЦ-ВНИИЭФ. В зависимости от класса прикладных задач и с учетом требований, предъявляемых к его численному решению (к полноте физической модели, к точности и экономичности расчетов и т.п.), в РФЯЦ-ВНИИЭФ применяются различные подходы к моделированию процессов переноса. Это, в первую очередь, подходы, основанные на методе Монте-Карло, на методе угловых коэффициентов (коэффициентов видимости) и на сеточной аппроксимации исходного уравнения методами конечных разностей и конечных элементов (детерминистскими сеточными методами). В докладе дается краткое изложение особенностей применения двух первых подходов задач. Дается более полный и подробный обзор детерминистских сеточных методов, базирующихся на аппроксимации уравнения переноса методами конечных разностей и конечных элементов. При этом особое внимание уделяется численным методам и алгоритмам схемам, созданным в РФЯЦ-ВНИИЭФ и предназначенным для решения многомерных связанных задач. При их решении необходимо учитывать, наряду с процессами переноса, большое число других физических процессов, что предъявляет ряд жестких требований к разрабатываемым методам и алгоритмам.

Метод М-К численного решения задач переноса

Изложению особенностей применения и развития метода М-К в нашем институте будет посвящен отдельный доклад. С учетом этого я ограничусь лишь краткой характеристикой направлений работ по моделированию методом М-К процессов переноса. Этот метод находит у нас широкое применение при решении следующих классов задач (Житник А.К и др., 1999), (Кочубей Ю.Б. и др., 2000), (Донской Е.Н и др., 1993):

1.Линейные задачи переноса частиц (перенос нейтронов и гамма-квантов, задачи расчета критических параметров ($К_{эфф.}$ и λ), расчет защиты от гамма-нейтронного излучения, расчет радиационной ядерной безопасности транспортно упаковочных контейнеров для перевозки и хранения отработанного ядерного топлива и т.п.).

2.Перенос заряженных частиц

3.Решение связанных задач, в которых наряду с процессами переноса учитывается ряд других физических процессов.

Используемые в программе алгоритмы обеспечивают хорошую точность описания физических процессов и обладают высокой эффективностью. Для моделирования траекторий используется метод максимальных сечений, обеспечивающий практически тоже быстродействие со спектральными константами, что и с групповыми. Учет теплового движения ядер среды, осуществляется в процессе моделирования траекторий на холодных сечениях вещества (Иванов Н.В. и др., 2003). Это позволяет избавиться от расчета сечений на заданные температуры. При моделировании траекторий электронов используется метод катастрофических столкновений, в котором для описания столкновений с малыми передачами энергии и импульса, используется приближение Фоккера-Планка (Донской Е.Н. и др., 1993). Разработана модель учёта рождения аннигиляционных и тормозных гамма-квантов, которая позволяет достаточно точно описывать их распространение без моделирования траекторий электронов и позитронов.

Программа распараллелена на основе библиотеки межпроцессорных обменов MPI. Используемые алгоритмы показывают высокую эффективность распараллеливания для достаточно большого числа процессоров.

Еще одним из направлений применений метода Монте-Карло для решений задач переноса является разработка алгоритмов моделирования на сеточных геометриях. Созданные алгоритмы позволяют моделировать на сеточных геометриях произвольной структуры, а эффективность моделирования практически не зависит от размеров ячеек сетки.

Расчет переноса излучения в вакууме методом коэффициентов видимости

При решения инженерных тепловых задач и задач лазерных мишеней необходимо учитывать перенос излучения в полостях конструкций. С этой целью в таких областях решается интегральное уравнение переноса излучения через оптически прозрачную среду (1) ((Бабаев Ю.Н. и др., 1978), (Зельдович Я Б. и др.,

1966), (Дементьев Ю.А. и др., 1984), (Бабаев Ю.Н. и др., 1995), (Bazin A.A et al., 1998)), (Дементьев Ю.А. и др., 1983):

$$J_\nu^-(P,t) = \int\limits_{S(P)} J_\nu^+\left(Q, t - \frac{\rho_{PQ}}{c}\right) \frac{\cos(\vec{n}_p, \vec{PQ})\cos(n_Q, \vec{QP})}{\pi r^2(P,Q)} dS_Q, \qquad (1)$$

где $J_\nu^+(P,t)$, $J_\nu^-(P,t)$ - односторонние потоки излучения частоты. В дальнейшем, для удобства, будем называть оптически прозрачные расчетные области вакуумными, все остальные области – диффузионными.На границе вакуумной и диффузионной областей уравнение (2) дополняется уравнением баланса:

$$J^-(A,t) - J^+(A,t) = q, \qquad (2)$$

где q – поток энергии через ед. площади граничной поверхности.

Для решения задачи задается сеточное разбиение границы вакуумной области. Поверхностная сетка граничных элементов для вакуумных областей является нерегулярной, с граничными элементами, являющимися произвольными плоскими многоугольниками.

Решение интегрального уравнения совместно с уравнением баланса на границе вакуумной и диффузионной областей осуществляется методом коэффициентов видимости (зональным методом). Интегральное уравнение переноса излучения аппроксимируется системой линейных алгебраических уравнений, относительно осредненных по N граничным элементам потоков излучения:

$$S_i J_i^-(t) = \sum_{j=1}^{N} a_{ij} J_j^+\left(t - \frac{\rho_{ij}}{c}\right). \qquad (3)$$

Данная система уравнений замыкается граничными условиями:

$$J_i^-(t) - J_i^+(t) = q, \qquad i = 1,...,N. \qquad (4)$$

Коэффициенты a_{ij} (5) системы уравнений – это, так называемые, коэффициенты видимости:

$$a_{ij} = \frac{1}{S_i} \iint\limits_{Si\,Sj} H_{ij} \frac{\mu_p \mu_q}{\pi \rho_{PQ}^2} ds_q ds_p, \qquad (5)$$

С помощью функции H_{ij} в этих коэффициентах учитывается возможное затенение области видимости между поверхностями S_i и S_j другими телами. Для определения области видимости в интегралах (5) и вычисления коэффициентов видимости реализованы два известных метода – метод полусферы и метод полукуба. В качестве примера применения метода расчета переноса излучения

рассмотрены две задачи о распространении рентгеновского излучения в цилиндрической лазерной мишени. (Смотри рисунок 1).

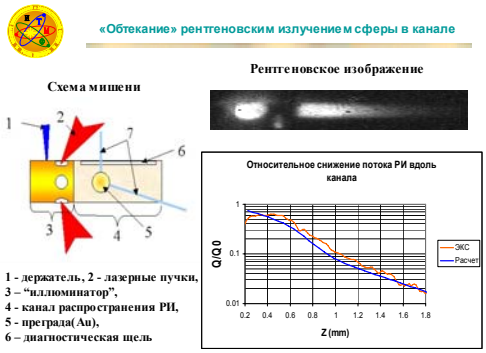


Рисунок 1. «Обтекание» рентгеновским излучением схемы в канале

Численное решение многомерных задач переноса методами конечных разностей и конечных элементов

При численном решении многих классов прикладных задач переноса во ВНИИЭФ широкое применение находят сеточные методы (Шагалиев Р.М. и др.., 1999). Среди таких численных методов следует ,прежде всего, выделить методы, основанные на конечно-разностной и конечно-элементной аппроксимациях многогруппового уравнения переноса. Данные методы широко используются, в частности, для численного решения линейных и нелинейных спектральных задач переноса физики высоких плотностей и энергии. Расчеты этих задач, как правило, проводятся в многогрупповом приближении в двумерной и трехмерной геометриях с одновременным учетом большого количества других физических процессов. С учетом этих особенностей к качеству разрабатываемых сеточных методов решения задач переноса предъявляется ряд жестких требований. Ниже перечислены некоторые положения, на которых основываются численные методы решения нестационарных задач переноса, разработанные во ВНИИЭФ:

1. Аппроксимация нестационарного уравнения переноса по переменной времени осуществляется по неявной двухточечной разностной схеме.

2. Аппроксимация уравнения переноса по пространственным переменным строится на неортогональных пространственных сетках, а именно на:

- регулярных неортогональных сетках из выпуклых четырёхугольников;
- нерегулярных неортогональных сетках из произвольных выпуклых многоугольников.

На указанных сетках построен ряд консервативных конечно-разностных схем: схема с расширенным шаблоном (Плетенёва Н.П. и т.д., 1989), (Москвин А.Н. и т.д., 2005), схема с введением замыкающих соотношений на основе моментных уравнений, схема, основанная на применении адаптивных дробных сеток в фазовом пространстве (Шагалиев Р.М, 2004), (Шагалиев Р.М. и др., 2004). Для дискретизации уравнения переноса по угловым переменным применяются схемы метода дискретных ординат. Общими для всех указанных схем является то, что они сохраняют на неортогональных сетках такие важные свойства DS_n – схем, как аппроксимацию уравнения переноса в рамках одной ячейки фазового пространства

и, как следствие, возможность разрешения систем сеточных уравнений по схеме бегущего счёта (Трощиев В.Е., 1976). Вместе с тем, они несколько отличаются друг от друга по таким свойствам, как точность аппроксимации на существенно неортогональных сетках, обеспечение монотонности сеточного решения и простоты алгоритмической реализации и некоторыми другими свойствами.

3. Численное решение взаимосвязанной системы многогрупповых сеточных уравнений переноса осуществляется методом итераций по источнику. Для повышения эффективности применяются алгоритмы ускорения сходимости итераций по источнику. В случае линейных стационарных задач для ускорения сходимости простых итераций нами разработан и успешно применяется потоковый согласованный, или, кратко, FCA-метод (Евдокимов В.В. и др., 1994), (Евдокимов и др., 1996), (Москвин А.Н. и др., 1996), а в случае нелинейных нестационарных задач - КМ-метод (Федотова Л.П. и др., 1991) и некоторые его модификации.

4. Численное решение системы сеточных уравнений переноса с известной правой частью осуществляется методом бегущего счета (Трощиев В.Е., 1976) и по модификации этого метода, ориентированного на многогрупповой случай (Федотова Л.П. и др., 1991).

5. Для численного решения двумерных и трехмерных задач переноса на многопроцессорных ЭВМ разработаны и применяются эффективные комбинированные алгоритмы распараллеливания, ориентированные на общий случай, когда используются неортогональные пространственные сетки (Алексеев А.В. и др., 2001), (Алексеев А.В. и др., 1993), (Алексеев А.В. и др., 1996).

Более подробное изложение некоторых особенностей алгоритмов и методов, используемых при численном решении уравнения переноса сеточными методами, приведено ниже.

Аппроксимация уравнения переноса по переменной времени , пространственным и угловым переменным. Схемы с расширенным шаблоном.

Эти схемы строятся с привлечением значений сеточной функции в ячейке, на сторонах и вершинах четырёхугольной ячейки (рис. 2). Система сеточных уравнений включает:

1. Сеточные уравнения, выражающие баланс частиц в ячейках сетки:

2. Дополнительные соотношения по переменной времени и угловой переменной φ

Рисунок 2. Аппроксимация многогрупповых кинетических уравнений.

3. Дополнительные соотношения по пространственным переменным, связывающие значения искомой функции в ячейке, на сторонах и в вершинах ячейки. Число дополнительных соотношений в рассматриваемой схеме зависит от количества освещённых сторон четырёхугольной ячейки. В зависимости от значений (μ_m , $\varphi_{q,m}$) здесь возможны три различных варианта освещённости сторон ячейки пространственной сетки, которые приведены на рисунке 3.

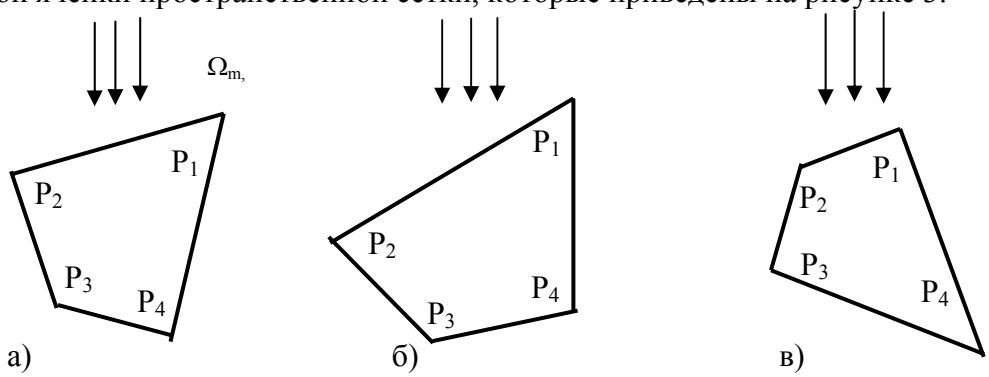


Рисунок 3. Варианты освещённости ячейки

Этим вариантам освещённости в двух рассматриваемых ниже схемах с расширенным шаблоном соответствуют свои дополнительные связи, полученные разными способами. А именно, в схеме 1 (Плетенёва Н.П. и др., 1989) привлекаются дополнительные соотношения, которые основываются на представлении решения внутри ячейки в виде линейной функции, а ко второй схеме, ниже, для краткости, обозначенной как схема 2 (Москвин А.Н. и др., 2005), дополнительные соотношения выводятся из приближенного представления решения уравнения переноса вдоль характеристик, что приводит к необходимости решения разностных уравнений внутри одной ячейки в два этапа.

Ниже приведены результаты расчетов одной двумерной тестовой задачи на вычисление собственного параметра λ (Плетенёв Н.П. и др., 1989), (Москвин А.Н. и др., 2005).Численные расчеты задачи проводились на прямоугольных сетках и существенно неортогональных сетках. Результаты расчетов приведены в таблице 1. Нетрудно убедиться, что расчетные значения λ, полученные по обеим схемам, удовлетворяют формуле, соответствующей сходимости со вторым порядком, $\lambda = 0.1647 - \frac{A}{k^2}$, где A – некоторая константа, близкая к единице.

Таблица 1. Значение параметра λ на различных пространственных сетках, полученные в расчетах по сх.1 и сх.2.

Сетка	Размер ячеек			
	h=0.1(см)	h/2	h/4	h/8
Значение параметра λ на различных пространственных сетках (по сх.1)				
Прямоугольная	0.1627515	0.1642543	0.1646291	0.1647228
Неортогональная	0.1618866	0.1639924	0.1644934	0.1646495
		ℓ=0.07(см)	ℓ=0.035(см)	ℓ=0.0175(см)
Значение параметра λ на различных пространственных сетках (по сх.2)				
Прямоугольная	0.162753	0.164256	0.164631	0.164724
Неортогональная	0.161205	0.164074	0.164678	0.16477
	ℓ=0.1(см)	ℓ=0.07(см)	ℓ=0.035(см)	ℓ=0.0175(см)

Схема с введением замыкающих соотношений на основе моментных уравнений.

При построении данной схемы решение внутри ячейки сетки представляется в виде билинейного разложения по пространственным переменным и угловой переменной φ:

$$N = N_{Po} + \frac{\tau}{2} N_{\tau} + \frac{\eta}{2} N_{\eta} + \frac{\varphi'}{2} N_{\varphi'} + \frac{r\eta}{4} N_{r\eta} + \frac{r\varphi'}{4} N_{\tau\varphi'} + \frac{\eta\varphi'}{4} N_{\eta\varphi'} , \qquad (6)$$

где $\varphi' = \frac{\varphi}{\Delta\varphi_{q-1/2}}$, η, τ - координаты пространственной точки внутри ячейки сетки при билинейном преобразовании четырёхугольника в единичный квадрат. Для поиска неизвестных коэффициентов разложения решения используются уравнение баланса (1)-(3) частиц в ячейках пространственной сетки, а также соответствующие моментные уравнения.

Ниже приводятся некоторые результаты численных исследований на линейной задаче переноса частиц в цилиндрическом слое $0 \le R \le 1,\ 0 \le Z \le 2$. Источник и коэффициенты уравнения заданы следующие: $Q = 1,\ \alpha = 1, \beta = 1.$ На границах, параллельных оси R, задавался нулевой входящий поток, на границе параллельной оси Z, задавалось граничное условие зеркальное “отражение”. На рисунке 4 приводится профили функции плотности частиц $n^{(0)}$ вдоль центрального столбца , полученные с использованием двух схем: схемы с расширенным шаблоном (схема

1) и схемы LMS.Как видно из рисунка, использование схемы LMS не приводит к занижению решения на оси Z и с высокой точностью передает константу в решении. В то же время, в расчетах по схеме с расширенным шаблоном имеет место некоторое отклонение от одномерного характера решения (порядка ~ 1% в расчете 1), характерное для схем типа DSn -метода.

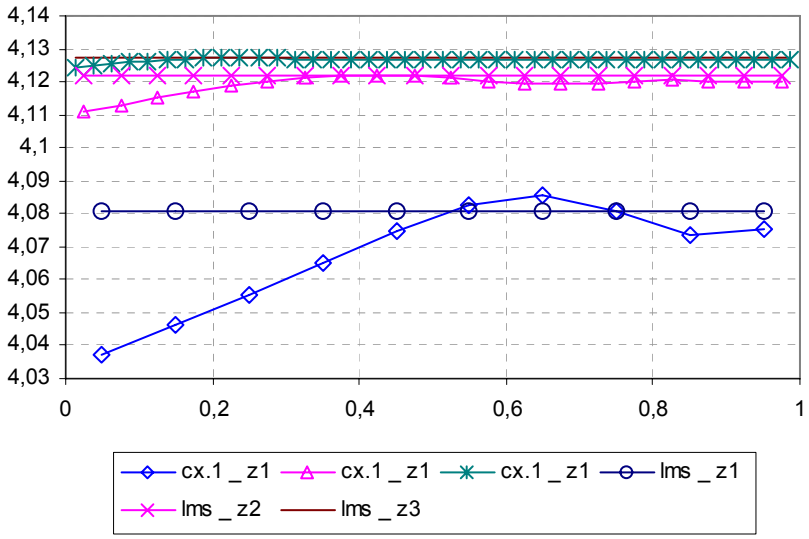


Рисунок 4. Решение вдоль центрального столбца

Адаптивный метод дробных сеток в фазовом пространстве

Идея рассматриваемого метода заключается в том, что в фазовой области, где ищется решение задачи, выделяется некоторая, в общем случае неодносвязная область, в которой дробление ячеек исходной сетки на более мелкие (Шагалиев Р.М., 2004), (Шагалиев Р.М и др., 2004). Дробление может осуществляться: по пространственным переменным, по угловым переменным, по переменной энергии.В нестационарных задачах область дробления ячеек опорной сетки переопределяется на временных шагах. При этом привлекаются специальные алгоритмы. При аппроксимации уравнения переноса в дробных ячейках адаптивной сетки обеспечивается сохранение основных свойств схемы, используемой для численного уравнения переноса на опорной сетке (порядок аппроксимации, консервативность, возможность решения сеточных уравнений переноса по алгоритму бегущего счета и некоторые другие).

Ниже приводится пример расчета одной двумерной тестовой нестационарной задачи, с применением адаптивного метода дробных сеток по пространственным переменным. Рассматривается осесимметричная система, представленная на рисунке 5 и состоящая из двух физических областей: 1-ая область – плотный кожух $\{0 \le Z \le 5;\ 1 \le R \le 1{,}2\}$, 2-ая – прозрачная область $\{0 \le Z \le 5;\ 0 \le R \le 1\}$. Учитывается процессы поглощения и переизлучения фотонов средой, причем сечение поглощения фотонов задано формулой $\chi_a = A/T^3$,где $A=50.89$ в первой области и A=0.1374 во второй области.

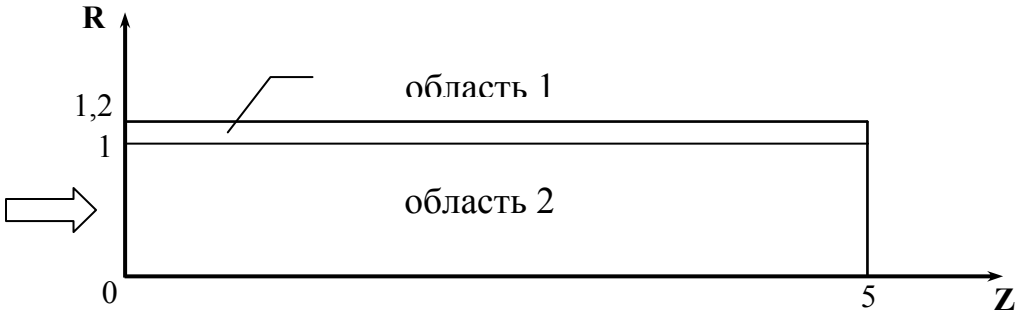


Рисунок 5. Геометрия системы в двумерной тестовой задаче

Начальная температура T во всех точках системы полагалась равной 0,0001. На части левого торца прямоугольной области задается входящий изотропный поток излучения, соответствующий температуре $T = 1$. Рассматриваемая задача имеет существенно двумерное решение.

Ниже приведены некоторые результаты ее численного решения. При этом для описания пространственных сеток, на которых выполнялись расчеты, используется следующее обозначение: $Nr(Pr)\times Nz(Pz)$, где Nr – число строк, Nz – число столбцов, Pr – максимальный уровень адаптивности по строкам (*MaxAdapt*), Pz – максимальный уровень адаптивности по столбцам. Результаты счета тестовой задачи на адаптивных сетках 10(4)×50(4) и 10(8)×50(8) показаны на рисунке 6, там же для сравнения приведены численные решения на некоторых пространственных сетках без адаптивности. Как видно из представленных графиков, решение, полученное на сетке 10(8)×50(8) с использованием адаптивной методики, оказывается близким к результату расчета на сетке 40×200 с использованием стандартной методики. При этом адаптивный расчет требует в 2,8 раза меньше затрат вычислительного времени.

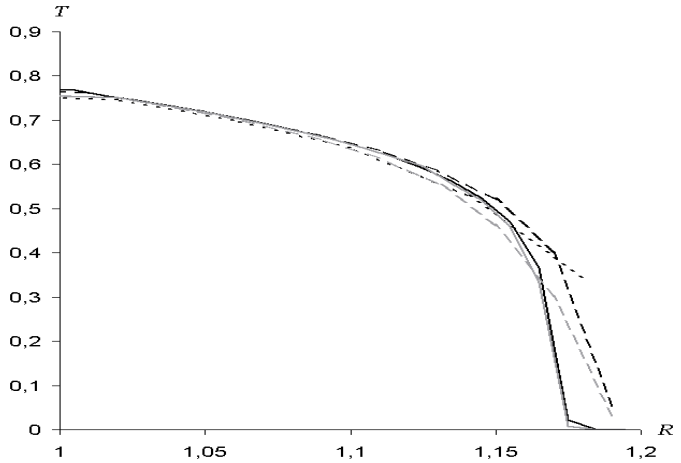


Рисунок 6. Профиль температуры вещества вдоль линии $Z = 2$ на момент времени 0,01 в двумерной тестовой задаче для различных опорных сеток: —— – решение на базовой сетке 40×200; – – – – расчет 20×100; ····· – расчет 10×50; – – – – расчет 10(4)×50(4); —— – расчет 10(8)×50(8)

Алгоритмы ускорения сходимости итерационных процессов

Для обеспечения эффективности при решении многогрупповых сеточных уравнений переноса очень важно применять эффективные методы ускорения сходимости традиционно используемого итерационного метода по источнику (по правой части) уравнения переноса.

Для решения линейных стационарных задач переноса нами разработан и успешно применяется потоковый согласованный метод ускорения (FCA - метод). Краткая формулировка данного метода и некоторые результаты его численных исследований приводятся ниже.

FCA-метод (потоковый согласованный метод).

В методе FCA (Евдокимов В.В. и др., 1994), (Евдокимов В.В. и др., 1996) искомыми являются функции одностороннего потока. Сеточные значения этих функций вводятся на ребрах и средних линиях ячеек. В рассмотрение вводятся уравнения для нулевого и первых моментов функции N, содержащие компенсирующие источники для согласования решения этапа ускорения и решения простой итерации. Использование FCA- метода позволяет сократить временные затраты расчетов оптически плотных систем в несколько сотен раз.

Ниже, в таблице 2 и 3, приведен примеры применения FCA-метода для ускорения сходимости простых итераций (N/A метод) в тестовой задаче с чистым рассеянием, решаемым в кубической области, а также в двумерной тестовой задаче для реактора РБМК.

Таблица 2. Область {*0<x<1.5, 0<y<1.5, 0<z<1.5*}

α	β	2D		3D	
		N/A	FCA	N/A	FCA
10.	9.	81	7	116	12
10.	9.9	331	7	300	13
10.	9.99	463	7	361	13
10.	10.	482	7	370	13

Таблица 3. Результаты расчетов канала реактора РБМК

Метод	Число итераций
Метод Келлога	229
Прямой метод	412
Метод итераций по источнику	555
Метод итераций по источнику + FCA	42
Метод итераций по источнику + FCA + + метод Чебышева	24

Особо высокие требования к сходимости и эффективности методов ускорения предъявляются при решении нелинейных нестационарных многогрупповых задачах переноса рентгеновского излучения. Для данного класса задач нами был

сконструирован еще в 80-х годах и в последние годы усовершенствован так называемый КМ-метод (Федотова Л.П. и др., 1991). Ниже приведена краткая формулировка КМ-метода, а также даны результаты сравнительных расчетов одной нестационарной тестовой задачи.

КМ-метод.

$$\frac{1}{v_i}\frac{\overset{s+\frac{1}{2}}{N_i^{n+1}}-N_i^n}{\Delta t}+L\overset{s+\frac{1}{2}}{N_i^{n+\gamma}}+\alpha_i\overset{s+\frac{1}{2}}{N_i^{n+\gamma}}=\frac{1}{2\pi}\sum_{j=1}^{NI}\beta_{ij}\,\overset{s}{n_j^{(0)^{n+\gamma}}},$$
$$N_i^{n+\gamma}=\gamma N_i^{n+1}+(1-\gamma)N_i^n,\ i=1,2,\ldots,NI \tag{7}$$

I этап – предиктор:

$$\frac{1}{v_i}\frac{\Delta\overset{s+1}{N_i^{n+1}}}{\Delta t}+L\,\Delta\overset{s+1}{N_i^{n+\gamma}}+\alpha_i\Delta\overset{s+1}{N_i^{n+\gamma}}-\sum_{j=1}^{NI}\beta_{ij}\Delta\overset{s+1}{N_j^{n+\gamma}}=\frac{1}{2\pi}\sum_{j=1}^{NI}\beta_{ij}\,\Delta\overset{s+\frac{1}{2}}{n_j^{(0)^{n+\gamma}}},$$
$$\Delta\overset{s+1}{N_i}=\overset{s+1}{N_i}-\overset{s+\frac{1}{2}}{N_i},\ \Delta\overset{s+1}{N_i^{n+\gamma}}=\gamma\,\Delta\overset{s+1}{N_i^{n+1}}, \tag{8}$$
$$\Delta\overset{s+\frac{1}{2}}{n_i^{(0)}}=\overset{s+\frac{1}{2}}{n_i^{(0)}}-\overset{s}{n_i^{(0)}}\ ,i=1,2,\ldots,NI$$

II этап – корректор в поправочной форм

Приведем результаты расчетов одной тестовой задачи, выполненных с использованием КМ-метода (см таблицу 4)

Таблица 4. Результаты расчётов тестовой задачи с применением КМ-метода.

№ шага	$\Delta t=0.1\cdot10^{-10}$ с ек			$\Delta t=0.5\cdot10^{-10}$ сек			$\Delta t=0.1\cdot10^{-9}$ сек		
	Пр.итер	КМ	КМ3	Пр.итер.	КМ	КМ3	Пр.итер.	КМ	КМ3
1	19108	14	14	28696	26	26	26454	35	35
5	3332	24	20	6363	121	88	7960	238	174
10	1559	27	20	8477	101	75	9146	179	135
t, сек	*2880*	*61*	*47*	*7020*	*233*	*184*	*8580*	*435*	*347*

Алгоритмы распараллеливания

Как уже отмечалось выше, численное решение многих классов многомерных нестационарных задач переноса связано с большими вычислительными затратами. Для решения указанных задач на многопроцессорных ЭВМ в пространственно-двумерном и трехмерном приближениях нами разработан эффективные методы мелкозернистого распараллеливания, ориентированные на общий случай применения неортогональных пространственных сеток (Алексеев А.В. и др., 2001) (Алексеев А.В. и др., 1993). Эти алгоритмы распараллеливания представлены на семинаре отдельным докладом. Поэтому ограничимся здесь демонстрацией их эффективности на примере расчета одной трехмерной тестовой задачи.

Параметры задачи: 8 энергетических групп, 96 направлений полета частиц (S_8), 250000 трехмерных пространственных ячеек. Оценка эффективности проводится методом увеличения. Размер задачи на каждом процессоре остается постоянным. $Sp_N = \frac{T_1 * N}{T_N}$. Результаты приведены на рисунке 7.

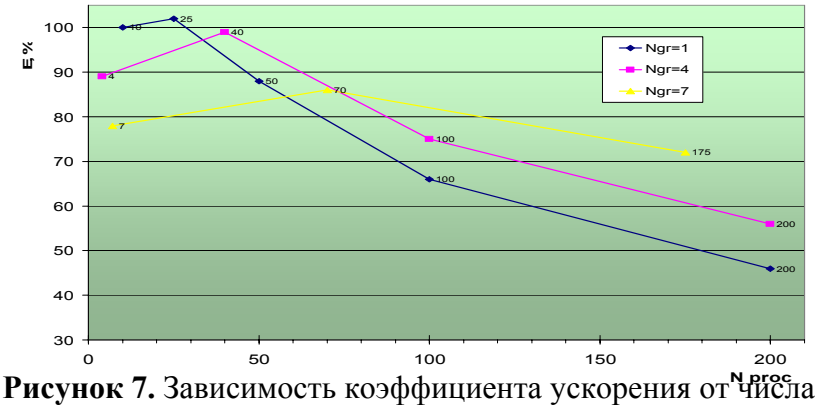


Рисунок 7. Зависимость коэффициента ускорения от числа процессоров

Результаты расчёта одной прикладной задачи

Для демонстрации возможностей разработанных методов ниже приведен пример расчёта одной демонстрационной задачи, описывающей эксперименты на лазерной установке ИСКРА (Бельков С.А. и др., 2004, смотри также рисунки 8-9).

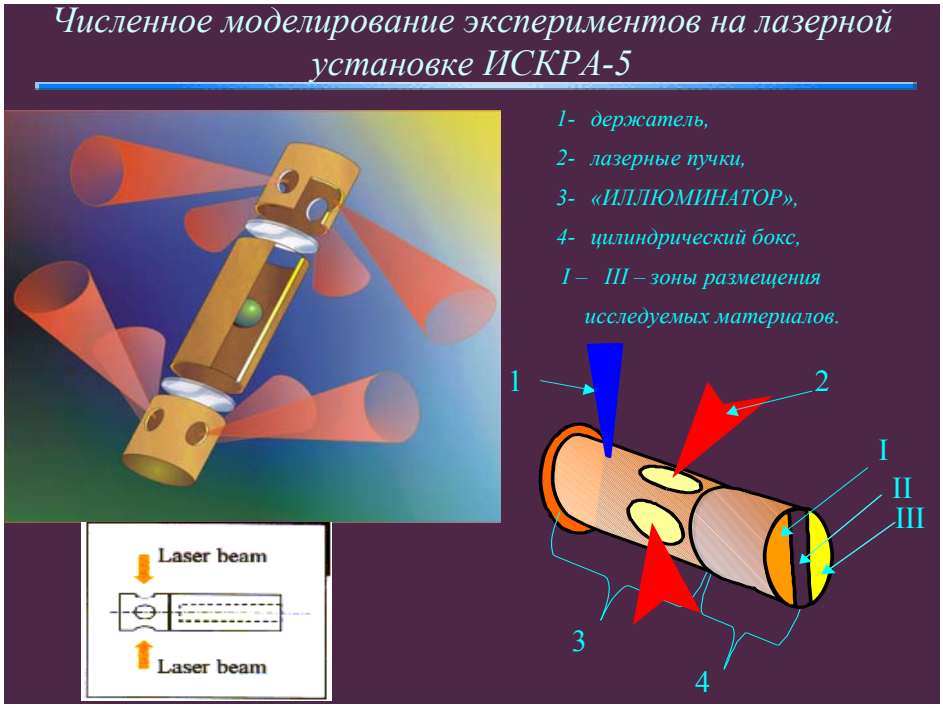


Рисунок 8. Постановка задачи по моделированию эксперимента на лазерной установке ИСКРА -5

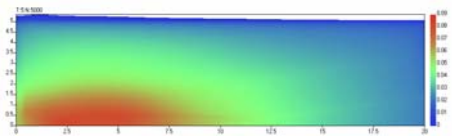
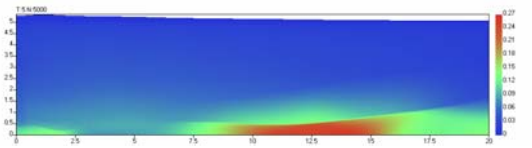
а)  б) 

Рисунок 9. Распределение эффективной температуры излучения (а) и электронов (б) внутри цилиндра на момент времени 5 нс. Масштаб длины - 100 мкм, масштаб температуры – кэВ.

Заключение

Уравнение переноса в настоящее время находит широкое применение при моделировании разнообразных физических процессов. Численное решение этого класса задач связано с весьма большими вычислительными затратами, В этих условиях важно использовать те численные методы, которые наиболее полно учитывают специфические особенности постановок и поведения решения конкретных классов прикладных задач переноса, и ,тем самым, позволяют обеспечить необходимую точность наиболее экономичным образом.

В докладе дан обзор численных методов, развитых и используемых для решения многомерных задач переноса в РФЯЦ-ВНИИЭФ. Это подходы, основанные на методе Монте-Карло, на методе угловых коэффициентов (коэффициентов видимости) и на сеточной аппроксимации исходного уравнения методами конечных разностей и конечных элементов (детерминистскими сеточными методами). В докладе дается краткое изложение особенностей применения двух первых подходов задач. Дается более полный и подробный обзор детерминистских сеточных методов, базирующихся на аппроксимации уравнения переноса методами конечных разностей и конечных элементов. При этом особое внимание уделяется численным методам, алгоритмам и схемам для численного решения многомерных связанных задач переноса, где особенно важно обеспечить, во-первых, необходимую точность расчетов на неортогональных пространственных сетках и, во- вторых, эффективность решения уравнения переноса на многопроцессорных вычислительных системах.

Благодарности.

Часть работ по построению адаптивных методов, представленная в данном докладе, выполнена по контрактам с Ливермольской национальной лабораторией (контракты B514484, B526462) и Лос-Аломосской национальной лабораторией (контракт №37713-000-02-35, задача 014)

Список использованных источников

Житник А.К., Кочубей Ю.К., Субботин А.Н. и др. Применение в РФЯЦ-ВНИИЭФ метода Монте-Карло к задачам переноса частиц // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1999. Вып.4. С. 64-67.

Кочубей Ю.К., Житник А.К., Артемьева Е.В. и др. Программа С-95. Моделирование совместного переноса нейтронов и гамма-квантов методом

Монте-Карло // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2000. Вып. 2. С. 49-52.

Иванов Н.В., Иванов А.Н. Учет теплового движения атомов среды при решении задач переноса нейтронов методом Монте-Карло // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2003. Вып. 4. С. 25-32.

Донской Е.Н.. Методика и программа ЭЛИЗА решения методом Монте-Карло задач совместного переноса гамма-излучения, электронов и позитронов. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1993. Вып. 1. С. 3-6.

Бабаев Ю.Н., Баженов С.В., Дементьев Ю.А. Об особенностях решения одного интегрального уравнения переноса излучения//ВАНТ, Сер. Математическое моделирование физических процессов, 1978, вып. 1(1), С. 7-9.

Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М. Наука, 1966 – 688с.

Дементьев Ю.А., Машинин Р.Ф., Нагорный В.И., Рогачев В.Г., Тихомирова Э.Н. Методика численного решения трехмерных нестационарных задач энергопереноса излучением через область вакуума // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методика и программа численного решения задач математической физики. 1984. Вып. 2(16). С. 26-28.

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. ВАНТ, Сер.: Математическое моделирование физических процессов, 1995, вып. 4, с. 3-8.

Bazin A.A., Vatulin V.V., Dementiev Yu.A., Mironova V.F., Skidan G.I., Tikhomirov B.P., Tikhomirova E.N. Application of View Factor Method in Calculations of Radiation Transport in Targets. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A415 (1998), 123-126.

Дементьев Ю.А., Машинин Р.Ф., Миронова В.Ф., Ченцов Н.Н. Приближенное вычисление коэффициентов углового распределения для нестационарного теплового излучения с поверхности вращения // ВАНТ. Серия: Методики и программы численного решения задач математической физики.-1983, выпуск 1(12), с.32-34.

Шагалиев Р.М., Шумилин В.А., Алексеев А.В., Беляков И.М., Евдокимов В.В. и др. Математические модели и методики решения многомерных задач переноса частиц и энергии, реализованные в комплексе САТУРН-3. ВАНТ. Сер.: Математическое моделирование физических процессов. 1999, вып.4, с. 20-26.

Плетенева Н.П., Шагалиев Р.М. Аппроксимация двумерного уравнения переноса на четырехугольных и многоугольных пространственных сетках по разностной схеме с расширенным шаблоном. ВАНТ. Сер.: Математическое моделирование физических процессов. 1989. Вып. 3, С. 34-41.

Трощиев В.Е. О классах сеток, допускающих консервативные аппроксимации двумерного оператора переноса треугольным разностным оператором // Журнал вычисл. мат. и мат. физ. 1976. Т. 16, № 3. С. 793-797.

Москвин А.Н., Шумилин В.А. Методика решения двумерного уравнения переноса на нерегулярных многоугольных сетках // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Математическое моделирование физических процессов. 2005. Вып. 1. С.31- 40.

Шагалиев Р.М. Адаптивный метод решения многомерного уравнения переноса с применением дробных сеток в фазовом пространстве. ВАНТ. Сер.: Математическое моделирование физических процессов. 2004. Вып. 4, С. 3-15.

Шагалиев Р.М., Алексеев А.В., Беляков И.М., Гичук А.В., Евдокимов В.В., Москвин А.Н., Нуждин А.А., Плетенева Н.П., Шемякина Т.В. Численное решение двумерного уравнения переноса с применением адаптивного по пространству метода пробных сеток. ВАНТ. Сер.: Математическое моделирование физических процессов. 2004. Вып. 4, С. 16-25.

Федотова Л.П., Шагалиев Р.М. Конечно-разностный КМ-метод для двумерных нестационарных процессов переноса в многогрупповом кинетическом приближении. Математическое моделирование, Т.3., N6, 1991.

Евдокимов В.В., Шагалиев Р.М. Согласованный метод FCA ускорения сходимости итераций при численном решении уравнения переноса нейтронов на неортогональных сетках. ВАНТ, серия: Математическое моделирование физических процессов. 1994. Вып. 3, С.11-17.

Евдокимов В.В., Шагалиев Р.М. Некоторые результаты численных исследований FCA-метода при решении двумерных задач переноса по схемам типа DSn-метода. Алгоритмы и программы для нейтронно-физических расчетов ядерных реакторов, “Нейтроника-94”,с.108-112, Обнинск, 1996.

Москвин А.Н. , Никифорова А.В., Шагалиев Р.М. и др. EKRAN Code for the Calculation of the Effective Neutron Multiplication Factor for Reactor Systems , Труды Международной конференции по физике реакторов, 16-20 сентября 1996 г, г. Мито, Япония, Т.3, p.A386-A395.

Алексеев А.В., Нуждин А.А., Шагалиев Р.М. Метод мелкозернистого распараллеливания двумерных и трехмерных задач переноса на неортогональных сетках ВАНТ. Сер.: Математическое моделирование физических процессов. 2001 Вып.2, с. 3-11.

Алексеев А.В., Шагалиев Р.М. Алгоритм распараллеливания численного решения трехмерного уравнения переноса в комплексе САТУРН // ВАНТ. Сер.: Математическое моделирование физических процессов. 1993. Вып. 3, С. 3-7.

Бельков С.А., Беляков И.М., Нуждина И.С., Винокуров О.А. Расчеты поля излучения в мишенях типа <ЛАБИРИНТ> для условий экспериментов на установке ИСКРА-5. Труды 31 конференции по физике плазмы Европейского физического общества, Volume 28G, P2.004, Лондон, 28 июня-2 июля, 2004.