

# Решение задач переноса нейтронного и гамма излучения с использованием многопроцессорных вычислительных систем

А.В. Моряков, Н.Ш. Исаков, А.А. Спиридонов

Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, г. Москва

В работе представлены основные положения методики решения уравнения переноса с использованием параллельных вычислений, реализованной в программном комплексе LUCKY-A. Представлен перечень решаемых задач, основные характеристики и особенности программного комплекса. Параллельный алгоритм, реализованный в LUCKY-A, основанный на декомпозиции расчетной области, создан для применения на суперкомпьютерах с использованием MPI стандарта для обмена данными между параллельными вычислительными процессами. Для полномасштабной ядерно-энергетической установки представлена расчетная модель, результаты расчета доз от нейтронов и гамма квантов, полученные с использованием многопроцессорного вычислительного комплекса, приведены характеристики расчетной модели, число применяемых вычислительных ядер, размеры и параметры используемой пространственной сетки.

*Ключевые слова:* алгоритм, уравнение переноса,  $P_m S_n$  метод, программа, модуль, суперкомпьютер, параллельный процесс, базовые решения, пространственная подобласть, MPI стандарт.

## 1. Введение

Стремительное развитие вычислительной техники за последние десятилетия открывает новые возможности для математического моделирования процессов, описывающих поведение сложных технических систем, созданных человеком. ЯЭУ (ядерные энергетические установки), несомненно, относятся к таким системам.

Основными элементами современной вычислительной техники являются суперкомпьютеры - вычислительные машины с большим числом вычислительных ядер способных работать в параллельном режиме и использовать для решаемой задачи огромные ресурсы всей вычислительной системы. Суперкомпьютеры позволяют применять максимально детализированные модели для решаемых задач, использовать пространственную сетку большой размерности и получать результат за небольшое расчетное время.

Задачи радиационной защиты от нейтронного и гамма излучения ЯЭУ, как и задачи пространственной кинетики ядерных реакторов, возникающие при переходных процессах в активной зоне реактора (главного элемента ЯЭУ) являются основными задачами нейтронной физики. Повышенные требования к точности решения этих задач определяются жесткими критериями безопасности в работе ЯЭУ. Для решения этих задач создан программный комплекс LUCKY-A [1-4].

Для эффективного использования суперкомпьютеров необходимы методы, позволяющие моделировать сложные нейтронно-физические процессы в ЯЭУ, используя параллельные технологии. Алгоритмы, реализующие такие методы для решения стационарных и нестационарных задач переноса нейтронного и гамма излучения, реализованы в LUCKY-A.

Из зарубежных программ решающих задачи защиты от нейтронного и гамма излучения с применением параллельных вычислений можно отметить программы созданные в США PARTISN [5] и ATTILA [6] разработка Los Alamos National Laboratory, из российских программу РАДУГА-Т [7] созданную в ИПМ им. “М.В. Келдыша”. Программы ATTILA и РАДУГА-Т используют нерегулярные пространственные сетки, элементами которых являются тетраэдры.

## 2. Решаемые задачи

Программный комплекс LUCKY-A обладает широкими возможностями, создан в результате развития программы LUCKY. Используется для решения задач защиты ЯЭУ от нейтронного и гамма излучения, решения задач на собственное значение, а так же решения широкого круга нестационарных задач, описываемых уравнением переноса, задач с делением и распределенным источником, зависящим от времени. Для моделирования пространственной кинетики реакторов предусмотрен расчет задач с последовательным внесением реактивности по заданному сценарию. Кроме того в LUCKY-A возможен расчет нестационарных полей температур с заданными или рассчитанными источниками удельного тепловыделения.

Отличительной особенностью программы LUCKY-A является использование только XYZ геометрии, при малых шагах пространственной сетки по координатным осям эта геометрия может быть применена как универсальная. Программа разработана для использования на компьютерах с большим числом вычислительных ядер реализующих MPI стандарт для обмена данными между параллельными вычислительными процессами и ориентирована на решение больших и сложных по геометрической композиции задач, требующих максимальных вычислительных ресурсов. В модулях LUCKY-A, выполняющих нейтронно-физические расчеты, реализован алгоритм получения решения уравнения переноса Больцмана в рамках модели группового по энергии  $P_m S_n$  приближения, где  $m$  - порядок разложения индикатрисы рассеяния по полиномам Лежандра, а  $n$  - порядок используемой угловой квадратуры.

### 3. Использование метода пространственной декомпозиции расчетной области для организации параллельного вычислительного процесса

Используемый в программе LUCKY-A алгоритм применяет метод параллельного решения кинетического уравнения переноса с использованием разбиения расчетной области на ряд подобластей, решение в которых вычисляется на параллельно работающих вычислительных ядрах суперкомпьютера. Вычисление на каждой пространственной подобласти выполняется на отдельном вычислительном ядре суперкомпьютера. Алгоритм использует свойство линейности решаемого уравнения переноса, что позволяет разбить решаемую краевую задачу на ряд краевых подзадач, проводя сшивку решения для каждой подобласти на общих поверхностях подобластей. Окончательное решение задачи находится как результат итерационного процесса, обеспечивающего выполнение решаемого уравнения в каждой расчетной подобласти.

Алгоритм применяет “базовые” решения для каждой “материальной ячейки” (пространственного элемента с уникальным материальным составом) вычисленные один раз, как основу для итерационного процесса. В базовых решениях уже учтены все физические процессы, влияющие на перенос частиц. С помощью “базовых” решений любое решение уравнения переноса в “материальной ячейке” может быть представлено как линейная композиция, с некими коэффициентами, решения от распределенного источника в ячейке с нулевыми граничными условиями и решений краевой задачи для ячейки без распределенного источника в ней, но с ненулевыми граничными условиями. Непрерывность углового потока на общих границах материальных ячеек обеспечивается сшивкой решений на этих границах. Отметим, что время расчета задачи не зависит от используемого порядка индикатрисы рассеяния. Это особенность алгоритма обусловлена применением “базовых” решений при проведении итерационного процесса.

На внутренних итерациях используется ускорение Гаусса-Зейделя. В модулях LUCKY-A применяется сквозная глобальная (для образования пространственных подобластей) и локальная (детальная на отдельной подобласти) пространственная сетка. Это позволяет задать дискретизацию геометрии задачи с использованием всего 6 параметров (размерности по координатным осям глобальной и локальной сетки).

Введем величину эффективности параллельного вычислительного процесса, определив ее как  $E_p = T_1 / (T_n \cdot n)$ , где  $T_1$  - время решения задачи одним ядром, а  $T_n$  - время на  $n$

вычислительных ядрах. Таким образом,  $E_p$  определяет выигрыш по времени на одно вычислительное ядро. При пространственной декомпозиции каждая подобласть может быть связана не более чем с шестью соседними подобластями, таким образом, получаем слабосвязанную систему, что обеспечивает умеренный обмен данными между вычислительными процессами и как следствие хорошую эффективность параллельного вычислительного процесса, на реальных задачах 0,25-0,5. Чем более нагружено вычислительное ядро (определяется размером локальной пространственной сетки на подобласти) тем больше доля времени на вычисление задачи, соответственно меньше доля времени на обмен данными. Детальное описание алгоритма получения базовых решений и их использование в итерационном процессе представлено в работах [1-2].

#### 4. Описание решаемых задач и расчетные модули

Модуль LUCKY – расчет стационарных задач переноса нейтронного и гамма излучения. Решение задач защиты, в которых процесс описывается уравнением  $(\Omega, \nabla \varphi) + \Sigma_t \varphi_i = S\varphi + Q$ , где  $\varphi$  – угловой поток,  $S$  – оператор, отвечающий за процесс рассеяния,  $Q$  – распределенный источник. Решение задач на собственное значение, решаемое уравнение

$$(\Omega, \nabla \varphi) + \Sigma_t \varphi_i = \frac{\chi \iint v \Sigma_f \varphi d\Omega dE}{4\pi K_{эфф}} + S\varphi \quad (1)$$

Для задачи нахождения  $K_{эфф}$  используется классический метод итерации источника. Возможные условия на внешних границах: ноль влета частиц в систему, отражение.

Модуль LUCKY\_TD – расчет нестационарных задач переноса нейтронного и гамма излучения, расчет задач пространственной кинетики после введения реактивности по заданному сценарию. Решаемая система уравнений с учетом запаздывающих нейтронов

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -(\Omega, \nabla \varphi) - \Sigma_t \varphi + \frac{(1-\beta)\chi \iint v \Sigma_f \varphi d\Omega dE}{4\pi} + S\varphi + \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^N h_i \lambda_i C_i + Q \quad (2)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = -\lambda_i C_i + \beta_i \iint v \Sigma_f \varphi d\Omega dE \quad (3)$$

Возможные условия на внешних границах: ноль влета частиц в систему, отражение

При решении задачи на собственное значение  $K_{эфф}$  возможно нахождение решения как предел последовательности, полученный через итерационный процесс при решении уравнения

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \varphi_i}{\partial t} = -(\Omega, \nabla \varphi_i) - \Sigma_t \varphi_i + \frac{\chi \iint v \Sigma_f \varphi_i d\Omega dE}{4\pi K_{эфф,i-1}} + S\varphi_i \quad (4)$$

Если  $Q = \iiint v \Sigma_f dE d\Omega dV$ , тогда  $k_i = \frac{Q\varphi_i}{Q\varphi_{i-1}}$ , а  $K_{эфф,i} = \prod_{l=1}^i k_l$ ,  $i$  - номер временного шага, при

начальных условиях  $\varphi_{i-1}$ . В результате итерационного процесса  $\frac{\partial \varphi_i}{\partial t} \rightarrow 0$ , а  $\varphi_i \rightarrow \varphi$  к решению задачи (1), а  $K_{эфф,i} \rightarrow K_{эфф}$  собственному значению задачи (1). Получение решения (4) на каждом временном шаге  $i$  может быть рассмотрено как аналог внешней итерации при получении решения уравнения (1) по классическому алгоритму итерации источника.

Модуль LUCKY\_HEAT – расчет нестационарных полей температур с заданными источниками тепловыделения, задача описывается уравнением

$$\rho(x, y, z) C_p(x, y, z) \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \lambda \cdot \Delta T(x, y, z, t) + Q_v(x, y, z, t) \quad (5)$$

Возможны граничные условия первого (фиксированная температура) и второго рода (фиксированный тепловой поток) на границах расчетной области.

## 5. Метод решения нестационарных уравнений в модулях LUCKY\_TD и LUCKY\_HEAT

Для нахождения решения системы уравнений (2-3) и уравнения (5) используется оригинальный численный метод решения задачи Коши для систем линейных обыкновенных дифференциальных уравнений большой размерности с использованием параллельных вычислений с применением MPI стандарта для обмена данными между вычислительными процессами. Детальное описание алгоритма представлено в работе [3]. Модули LUCKY\_TD [4] и LUCKY\_HEAT используют “решатель”, в котором реализован алгоритм этого метода. Основным достоинством метода является возможность использовать параллельные вычисления, применяя аналитические решения для уравнений при проведении итерационного процесса. Представим основные положения используемого метода.

Рассмотрим задачу Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с оператором  $A(t, \varphi(t))$ :

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = A(t, \varphi(t)) \quad (6),$$

начальные условия  $\varphi(0) = \mathfrak{A}$ ,  $t \in [0,1]$ . Вектор  $\varphi(t)$  задан в пространстве  $R_0^n$  с расстоянием между элементами пространства  $D(x,y) = \max |x_j(t) - y_j(t)|$  для  $\forall j = 1 \dots n$ .

Предполагается, что оператор  $A(t, \varphi(t))$  удовлетворяет условию Липшица  $|A(t, \varphi_1(t)) - A(t, \varphi_2(t))| \leq M |\varphi_1(t) - \varphi_2(t)|$ . Любая система, определенная на интервале времени  $t \in [0, T]$  может быть сведена к системе определенной на отрезке  $[0,1]$  введением

новой переменной  $t = T \cdot s$ ,  $s \in [0,1]$  Тогда  $\frac{d\varphi(s)}{ds} = \frac{d\varphi(t)}{dt} \cdot \frac{dt}{ds} = \frac{d\varphi(t)}{dt} \cdot T$ , с учетом этого

$$\frac{d\varphi(s)}{ds} = (A(s, \varphi(s))) \cdot T.$$

Запишем уравнение (6) следующим образом

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = A(t, \varphi(t)) + r\varphi(t) - r\varphi(t), \text{ введя некоторый положительный параметр } r.$$

Построим последовательность  $\varphi_k(t)$  для получения решения уравнения (6) согласно итерационному процессу по следующей схеме, стартуя с некоторого, например,  $\varphi_0(t) = \mathfrak{A}$ ,  $k$  - номер итерации

$$\frac{d\varphi_k(t)}{dt} = A(t, \varphi_{k-1}(t)) + r\varphi_{k-1}(t) - r\varphi_k(t)$$

Обозначим  $\gamma_{k-1}(t) = A(t, \varphi_{k-1}(t)) + r\varphi_{k-1}(t)$

тогда система уравнений примет вид

$$\frac{d\varphi_k(t)}{dt} = -r\varphi_k(t) + \gamma_{k-1}(t) \quad (7)$$

Фактически процесс получения решения производится посредством итераций по “источнику”  $\gamma_{k-1}(t)$  зависящему от  $\varphi_{k-1}(t)$ .

Особенностью системы (7) является то, что в уравнениях неизвестные в векторе  $\varphi_k(t)$  не связаны друг с другом (связь производится через  $\gamma_{k-1}(t)$ ) следовательно, могут быть найдены с помощью параллельных вычислительных процессов. Система имеет простое аналитическое решение, можно назвать его “ведущим” решением

$\varphi_k(t) = e^{-rt} \int_0^t e^{rt'} \gamma_{k-1}(t') dt' + e^{-rt} \mathfrak{A}$ . Обозначим  $B\varphi(t) = e^{-rt} \int_0^t e^{rt'} (A(t', \varphi(t')) + r\varphi(t')) dt'$ , тогда

$\varphi_k(t) = B\varphi_{k-1}(t) + e^{-rt}\mathfrak{Q}$ . В работе [3] показано, что  $B$  – оператор сжатия с оценкой для сходимости  $D(B^k\theta_1, B^k\theta_2) = \max |B^k\theta_1 - B^k\theta_2| \leq (M+r)^k \frac{1^k}{k!} \max |\theta_1 - \theta_2|$  и итерационный процесс сходиться к решению уравнения (6). Таким образом, итоговое решение уравнения (6) может быть представлено в виде  $\varphi(t) = e^{-rt} \int_0^t e^{r't'} \Psi(t') dt' + e^{-rt}\mathfrak{Q}$ , где  $\Psi(t')$  – вектор функция, полученная в результате итерационного процесса. В практической реализации  $\varphi(t)$  от времени представляется в виде ряда по полиномам, полученным из полиномов Лежандра, образующих полную систему на интервале  $t \in [0,1]$  и предложенный выше алгоритм применяется для моментов разложения решения по полиномам.

Если система разбивается на  $N$  подобластей, тогда справедлива следующая оценка

$$D(B_i^k\theta_{1,i}, B_i^k\theta_{2,i}) = \max |B_i^k\theta_{1,i} - B_i^k\theta_{2,i}| \leq W^k N^k \max |\theta_1 - \theta_2| \frac{1^k}{k!}.$$

Где  $W$  наибольшая величина  $(M+r)M$  и  $(M+r)$ , где  $r > 0$ .

Для задач, где оператор  $A$  описывает конечно-разностную аппроксимацию уравнений в частных производных первого или второго порядка по пространственным переменным в прямоугольной системе координат и число пространственных подобластей (подпространств) равно  $N$ , связь подобластей будет только с соседними подобластями. Таким образом, полное число связей в системе будет не более  $6N$ , система будет слабосвязанная. Для таких задач эффективность параллельного процесса будет значительной даже при больших значениях  $N$ , так как коэффициент при  $\max |\theta_1 - \theta_2|$  будет иметь вид  $W^k 7^k \frac{1^k}{k!}$  (где  $7$  определяется подпространством плюс 6 соседей) и не зависеть от  $N$ . При  $k \approx 12$   $k!$  “догонит”  $7^k$  и получим  $\frac{7^k}{k!} < 1$ .

Порядок точности определяется порядком разложения в ряд. Алгоритм реализован в решателе, что позволяет формализовать вычислительный процесс для различных задач, описываемых системой (6). Следует отметить, что найденное по данному алгоритму решение задачи Коши является приближённым. Точность полученного решения определяется рамками вычислительной модели – порядком  $m$  разложения в ряд по ортогональным полиномам “ведущего” решения в процессе проведения итераций.

Решатель применялся для решения задач массопереноса радиоактивных продуктов деления по контурам ядерных энергетических установок, а также для решения задач молекулярной динамики (моделирование динамики большого ансамбля взаимодействующих частиц).

К особенностям предложенного алгоритма можно отнести:

- возможность решать нелинейные задачи с пересчетом оператора  $A(\varphi(t), t)$  при проведении итерационного процесса;
- простоту и возможность аналитически (точно) вычислять моменты от решения;
- использование параллельных вычислений в процессе получения решения;
- главное требование к оператору – удовлетворение условию Липшица;
- используется неявный метод для получения решения.

Алгоритм хорошо распараллеливается с возможностью использования GPU (графических процессоров) и MPI технологии, так как большинство вычислительных операций разделены и представляют собой умножение матрицы на вектор.

## 6. Геометрический модуль, используемые библиотеки ядерно-физических данных, подготовка констант в пространственных элементах

Все расчетные модули используют один и тот же геометрический модуль для задания геометрии задачи. Геометрический модуль работает параллельно на вычислительных ядрах. Его задача подготовить расчетную пространственную сетку по пространственным элементам, а так же номера материальных зон для пространственных элементов, однозначно определяющие физические свойства этих элементов. В результате работы геометрического модуля создается файл lucky.lsp для контроля геометрии расчета средствами графического пакета AUTOCAD.

Геометрический модуль, используя метод вложения тел, работает с набором примитивов (шар, параллелепипед, цилиндр, призма и другие) с возможностью объединения их в блоки, позволяет использовать созданные блоки в качестве нового примитива. В модуле имеются средства построения различных структур из блоков и примитивов, что значительно облегчает задание сложной по геометрии задачи.

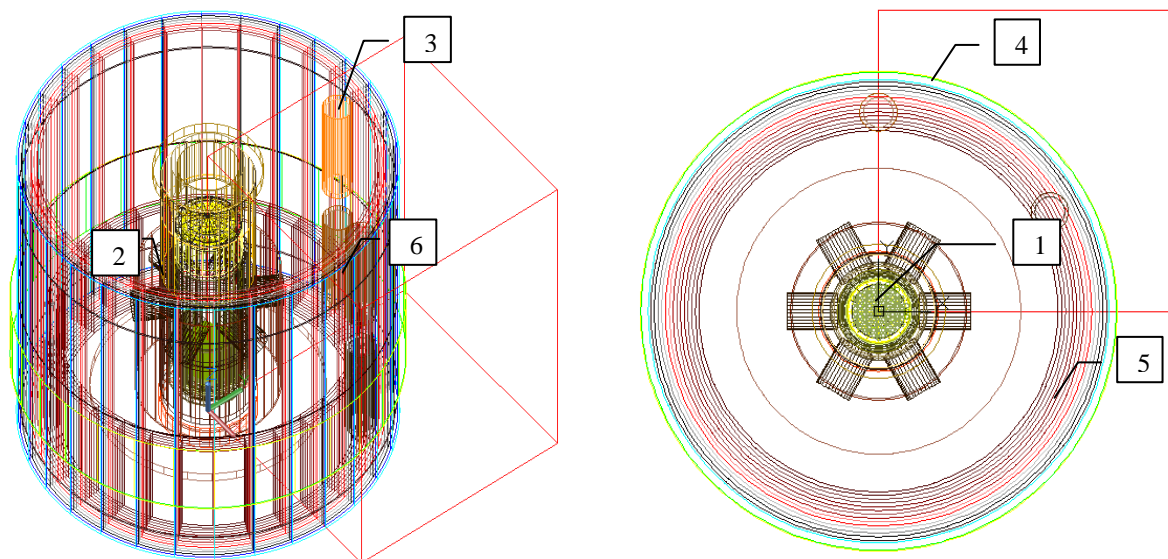
Программный комплекс LUCKY-A использует многогрупповые по энергии макроконстанты в GIT (group independent tape) формате, получаемые из библиотек ядерных данных, например, BUGLE-96 [8] посредством программ GIP или TAPEMAKER [9]. Возможно использование системы CONSYST. Применяемый порядок разложения индикатрисы рассеяния ограничивается порядком, представленным в используемой библиотеке ядерных констант.

В модулях LUCKY и LUCKY\_TD возможно использование режима позволяющего подготовить макроконстанты в пространственных элементах с учетом доли объема входящих в пространственный элемент физических материалов, посредством использования детальной локальной пространственной сетки на пространственных элементах. Это позволяет получать более точный результат на используемой в задаче пространственной сетке, но при этом число используемых в задаче материалов возрастает.

## 7. Расчет полномасштабной ЯЭУ

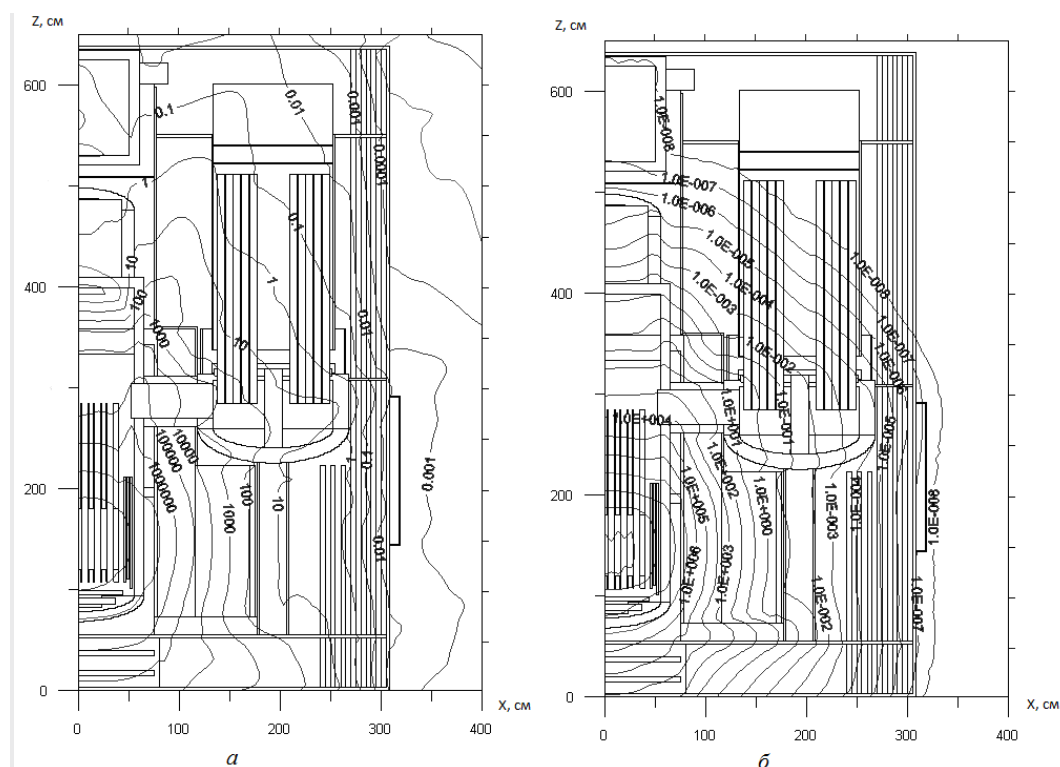
Представим пример решения задачи защиты с использованием программного комплекса LUCKY-A. Размеры установки 400, 400, 600 см. по координатным осям X,Y,Z соответственно. В нижней части установки находится активная зона. Конструкция установки предполагает использование 25 различных конструкционных материалов с различными нейтронно-физическими свойствами. Использовалась библиотека ядерных данных BUGLE-96 имеющая данные для 47 энергетических групп нейтронов и 20 групп гамма квантов. Решалась задача с распределенным источником нейтронов. Применялись 1000 вычислительных ядер. Каждая из 1000 подобластей сопровождалась отдельным вычислительным ядром. Использовалась равномерная сетка для разбиения на пространственные подобласти  $10 \times 10 \times 10$  по координатным осям X,Y,Z соответственно. Локальная сетка на каждой подобласти равномерная, имеющая  $ND=120 \times 120 \times 100$  пространственных элементов с дискретизацией по пространству  $\sim 0,333$  см. в плоскости XY и  $\sim 0,7$  см. по оси Z. Полное число пространственных элементов в расчетной области  $NV=1\,440\,000\,000$ . Все расчеты проводились в  $P_3S_6$  приближении, предполагающем разложение индикатрисы сечения рассеяния до 3 порядка по полиномам Лежандра и 48 направлений полета частиц на единичной сфере для каждого пространственного элемента (соответствует порядку  $S_6$  по угловой квадратуре). Время расчета задачи  $\sim 180$  минут. Рассчитывалась  $\frac{1}{4}$  часть композиции с граничными условиями отражения слева и по фронту системы.

Геометрия расчетной композиции, реализованная средствами AUTOCAD, представлена на Рис. 1. На Рис. 2 даны линии уровня для распределения доз от гамма квантов и нейтронного излучения. Ослабление по дозам от излучения при прохождении элементов конструкции составляет более 10 порядков.



**Рис. 1.** Геометрическая композиция ЯЭУ

1 – активная зона, 2 – корпус реактора, 3 – баки воздуха, 4 – страховочный корпус, 5 – биологическая защита, 6 – теплообменник



**Рис. 2.** Распределение дозы (бэр/час) от гамма (а) и нейтронного (б) излучения в XZ сечении ЯЭУ

## 8. Опыт использования

Основное применение модуля LUCKY - решение задач защиты от нейтронного и гамма излучения для больших и сложных по геометрической композиции систем. Как уже отмечалось, программа разработана для использования максимальных ресурсов суперкомпьютера, она применялась при решении задачи нахождения потока быстрых

нейтронов на корпусе реактора ВВЭР и других установок с использованием большого количества вычислительных ядер (до 8000), при этом использовались пространственные сетки размером в несколько миллиметров.

Известная формула Амдала  $E = \frac{T_1}{\alpha \cdot T_1 + (1-\alpha) \cdot T_1 / n} = \frac{1}{\alpha + (1-\alpha) / n}$ , определяющая

выигрыш по времени, при использовании  $n$  параллельных вычислений (в идеальном случае, когда  $T_n = T_1 / n$ ), показывает, что если в алгоритме есть последовательная часть, доля времени которой  $\alpha$ , то в пределе при  $n \rightarrow \infty$  полученное ускорение не может превысить величину  $1/\alpha$ . Соответственно, чем меньше время расчета задачи, тем жестче требования к времени последовательной части алгоритма, для того, чтобы получить хорошую эффективность параллельного процесса.

Решение практических задач обычно занимает значительное время. Последовательная часть программы, чаще всего, определяется временем ввода исходных данных, которое составляет тысячные или сотые доли от времени расчета, что дает возможность получать значительный выигрыш по времени при использовании алгоритмов с хорошей эффективностью параллельного процесса. Для задач требующих расчета в реальном времени проблема снижения времени последовательной части алгоритма более актуальна.

## 9. Заключение

1. Программный комплекс LUCKY-A может быть применен для решения задач переноса излучения в больших и сложных по геометрии системах, где необходимо описание геометрии задачи с использованием детальной пространственной сетки с большим числом элементов. При решении задачи возможно использовать все доступные ресурсы современных вычислительных комплексов. Применение метода пространственной декомпозиции для организации параллельных вычислительных процессов в модулях LUCKY-A позволяет достигать хорошей эффективности параллельного вычислительного процесса с возможностью масштабирования задачи на значительное число вычислительных ядер.

2. Для решения нестационарных задач в программе реализован алгоритм получения решения линейной задачи Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений большой размерности с возможностью использования параллельных вычислений. Зависимость искомой функции от времени представляется в виде ряда по ортогональным полиномам.

3. Решатель, в котором реализован предложенный алгоритм для решения нестационарных задач, может быть использован для решения различных задач, сводимых к линейной задаче Коши.

Все расчеты проводились на суперкомпьютере МВС-10П в Межведомственном Суперкомпьютерном Центре Российской Академии Наук [10]. Авторы выражают благодарность МСЦ за возможность проведения расчетов и выделенные ресурсы.

## Литература

1. Моряков А.В. Программа LUCKY. Решение уравнения переноса нейтронов и гамма излучения с использованием параллельных технологий. //ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2010, выпуск 4, с. 18-29.
2. Моряков А.В. Алгоритм получения угловых потоков в ячейке для многопроцессорных программ LUCKY и LUCKY\_C. // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2011, выпуск. 1, с. 3-7.
3. Моряков А.В. Алгоритм решения линейной задачи Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений большой размерности с использованием параллельных вычислений. //ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, выпуск. 2, с. 4-14.
4. Моряков А.В. Программа LUCKY\_TD для решения нестационарного уравнения переноса с использованием параллельных вычислений. //ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, выпуск 2, с. 15-19.



5. Alcouffe R.E., Baker R.S., Dahl J.A., Turner S.A., and Robert Ward. PARTISN: A Time-Dependent, Parallel Neutral Particle Transport Code System. LA-UR-08-07258 (Revised Nov. 2008).
6. McGhee J.M., Wareing T.A., Barnett D.A. Attila User's Manual. Transpire Inc., 15 January 2007.
7. Николаева О.В., Басс Л.П. Алгоритм решения уравнения переноса излучения на неструктурированных тетраэдральных сетках. Программа Радуга-Т. Нейтронно-физические проблемы ядерной энергетики (Нейтроника-2014): Материалы семинара (Обнинск, 2014), с. 22.
8. White J.E., Ingersoll D.T., Slater C.O., Roussin R.W. Bugle-96: Coupled 47 neutron, 20 gamma-ray group cross section library derived from ENDF/B-VI for LWR shielding and pressure vessel dosimetry applications. RSIC Data Library Collection, DLC-185, march 1996.
9. Engle W.W. A User Manual for ANISN, Union Carbide Corporation, K-1693, 1967.
10. URL: <http://jscc.ru> (дата обращения: 10.03.2017)

## The solution neutron and gamma transport problems by use of supercomputers

A.V. Moryakov, N.SH. Isakov, A.A. Spiridonov

NRC "Kurchatov Institute", Moscow

This paper is devoted for LUCKY-A computer code. The main positions of the parallel algorithm to get solution of the transport equation and time-dependent transport equation by space decomposition method are presented. The algorithm was created especially for supercomputers with MPI technology to exchange data between parallel processes. The results for neutron and gamma dose for full scale nuclear installation calculated by LUCKY-A are presented. Characteristics of the calculated model are given.

*Keywords:* algorithm, transport equation,  $P_m S_n$  approximation, program, module, supercomputer, parallel process, base solutions, space domain, MPI technology.

## References

1. Moryakov A.V. The LUCKY program for solving the transport equation for neutrons and gamma radiation with the use of parallel technologies. //Physics of Atomic Nuclei, vol. 74, No. 14, 2011, p. 1891
2. Moryakov A.V. Algorithm for obtaining angular fluxes in a cell for the LUCKY and LUCKY\_C multiprocessor programs // Physics of Atomic Nuclei, 2012, v.75, №14, p.1627.
3. Algorithm for solving the linear Cauchy problem for large systems of ordinary differential equations with the use of parallel computations. Moryakov A.V., //Physics of Atomic Nuclei, 79(8), 1233-1241, 2017, DOI 10.1134/S1063778816080147
4. LUCKY\_TD code for solving the time-dependent transport equation with the use of parallel computations. Moryakov A.V., //Physics of Atomic Nuclei, 79(8), 1242-1245, 2017, DOI 10.1134/S1063778816080159
5. Alcouffe R.E., Baker R.S., Dahl J.A., Turner S.A., and Robert Ward. PARTISN: A Time-Dependent, Parallel Neutral Particle Transport Code System. LA-UR-08-07258 (Revised Nov. 2008).
6. McGhee J.M., Wareing T.A., Barnett D.A. Attila User's Manual. Transpire Inc., 15 January 2007.
7. Nikolaeva O.V., Bass L.P. Algorithm for solving transport equation for radiation by use of unstructured tetrahedral space meshes. Program Радуга-Т. [ Neutron-physical problems of nuclear energetics (Нейтроника-2014): Workshop materials (Obninsk, 2014)]., p. 22.
8. White J.E., Ingersoll D.T., Slater C.O., Roussin R.W. Bugle-96: Coupled 47 neutron, 20 gamma-ray group cross section library derived from ENDF/B-VI for LWR shielding and pressure vessel dosimetry applications. RSIC Data Library Collection, DLC-185, March 1996.
9. Engle W.W. A User Manual for ANISN, Union Carbide Corporation, K-1693, 1967.
10. URL: <http://jscc.ru>