ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ ԳԻՏԱԿԱՆ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ЕРЕВАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Բնական գիտություններ 3, 1980 Естественные науки

Физика

УДК 621.039

А. В. ОВСЕПЯН, И. Н. АЙРАПЕТЯН, Р. А. ТАРАНЯН

МЕТОД РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНОГО ПЕРЕНОСА НЕЙТРОНОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИНЦИПА СУПЕРПОЗИЦИИ

В данной работе приводится метод расчета нестационарных процессов с использованием метода Монте-Карло. Суть метода заключается в моделировании методом Монте-Карло отклика заранее выбранного элемента обсчитываемой среды на короткий импульс входящих с ее границы нейтронов и дальнейшим решением задачи методом сшивки входящих и выходящих потоков на границах элементов.

По сравнению с методом Монте-Карло данный метод расчета существенно сокращает машинное время, а также объем используемой памяти.

Получены результаты для одномерного случая.

По мере накопления информации о взаимодействии нейтронов с веществом и развития вычислительной техники возрастает роль численных методов решения задач переноса. Однако при реализации возникают определенные трудности, связанные с большим объемом и временем вычислений. Так, эффективность метода Монте-Карло сильно зависит от геометрических размеров системы по отношению к среднему пробегу.

В частности, расчет небольшого топливного элемента методом Монте-Карло может быть реализован, а расчет трехмерного реактора в целом требует непомерно большого расчетного времени и объема памяти машины [1—3].

В данной работе приводится метод расчета нестационарных процессов, пригодный для одно-двух- и трехмерных расчетов, который базируется на методе Монте-Карло, однако не требует столь большого объема вычислений и памяти.

Пусть мы имеем элемент n-мерной среды, ограниченный m-гранями. Пусть в момент времени t_0 на j-ую $(1<j<m)$ грань падает короткий импульс нейтронов мощностью $J_{j\,\text{вх}}$. На остальных гранях имеет место условие равенства нулю входящих потоков.

Методом Монте-Карло можно смоделировать процесс переноса нейтронов и вычислить все $J_{j\,\text{вых}}(t)$-выходы через все m-грани в каждый малый промежуток времени. Как и в диффузионном приближении, здесь имеются в виду средние потоки на гранях. Поскольку элемент среды подкритичен, то выходящие потоки с какого-то времени стремятся к 0. Для заданных геометрических размеров можно определить время, после которого выходящими потоками можно пренебречь с заданной точностью. Назовем его временем существования отклика τ. Построив этим методом все отклики для импульсов, падающих с разных граней, можем смоделировать процесс переноса нейтронов в большой области среды с дискретным временным шагом и пространственной дискретизацией по заранее выбранным геометрическим элементам.

Введем временную сетку с шагом, меньшим в M раз времени существования отклика $\left(\frac{\tau}{M}\right)_{раз}$, а рассматриваемую геометрическую область разобъем на N одинаковых элементов с m-гранями.

Пусть в течение времени, равного времени существования отклика, известны входящие потоки на всех гранях как внутри среды, так и на границе. Пусть заданы также входящие потоки на гранях границы для любого момента времени t.

Обозначим через $\varphi_{jk}(t)$ отклик на импульс нейтронов, падающих на j-ую грань, который получается на к-той грани. Тогда для каждой грани элемента можно записать следующее соотношение:

$$J_{вых\ j}(t)=\sum_{k=1}^{m}\int_{\tau}^{t} J_{вхк}(x)\varphi_{jk}(t-x)dx. \qquad (1)$$

К этим соотношениям добавляются условия равенства между выходящими потоками и входящими на смежных гранях.

При дискретном шаге времени интегрирование по τ сводится к суммированию по моментам времени. Полученная система уравнений является аналогом интегрального уравнения теории переноса. Однако дискретизация времени позволяет найти выходящие потоки на всех гранях в момент времени $t+\tau$ (если они известны для промежутка времени, равного времени существования отклика τ до момента $t+\tau$). Сдвигая пределы интегрирования мы можем вычислить выходящие потоки для любого момента времени t.

Таким образом, решение нестационарной задачи сводится к вычислению сумм в выражении (1), если свойства среды, т. е. вид отклика $\varphi_{jk}(t)$ не изменяется со временем. Временной шаг, время длительности отклика, а также размер геометрического элемента подбираются для удовлетворения заданной точности в зависимости от физических и геометрических характеристик среды. Если свойства среды изменяются со временем, то возможны 2 варианта: когда характерные времена этих изменений либо меньше или порядка длительности существования отклика, либо много больше длительности существования отклика. В первом случае отклик $\varphi_{jk}(t)$ будет непрерывно изменяться, и метод теряет свой смысл. Однако это соответствует сильным нейтронным потокам, когда свойства среды могут измениться за время нескольких пробегов. При слабых потоках, что имеет место в реакторах, изменение свойств среды удовлетворяет второму условию. Поэтому учет этих изменений по времени можно также дискретизировать с шагом, намного большим времени существования отклика, и смоделировать $\varphi(t)$, учитывающий изменение свойств среды. Методом Монте-Карло можно получить набор функций $\varphi(t)$, учитывающий изменение свойств среды, а также его аппроксимацию. Поскольку при таком подходе методом Монте-Карло моделируется не весь временной процесс, а только его маленькие отрезки, притом один раз для получения отклика φ, то расчетное время отдельной задачи будет достаточно мало.

В данном случае методом Монте-Карло обсчитывается маленький кусок среды, размер которого всегда можно подобрать, а при вычислении выходящих потоков по известным $\varphi(t)$ количество элементов в одном массиве равно полному числу граней, получающихся при разбиении среды на элементы. Поэтому объем требуемой оперативной памяти будет значительно меньше, чем при расчете, осуществляемом полностью методом Монте-Карло.

Для иллюстрации метода решена одномерная задача переноса нейтронов для отрезка длиной l.

Пусть нейтроны могут двигаться только вдоль отрезка, в котором имеют место процессы рассеяния, поглощения и рождения. Отрезок l — однородный, и его свойства не изменяются со временем. Размеры отрезка больше среднего свободного пробега λ. Разобьем отрезок l на 10 равных кусков. Рассмотрим теперь один кусок отрезка и пронумеруем его концы. Пусть на 1 конец упал один короткий по сравнению со временем пробега импульс нейтронов.

С помощью метода Монте-Карло можно построить отклики $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ на концах отрезка. Эти отклики имеют вид, приведенный на рис. 1.

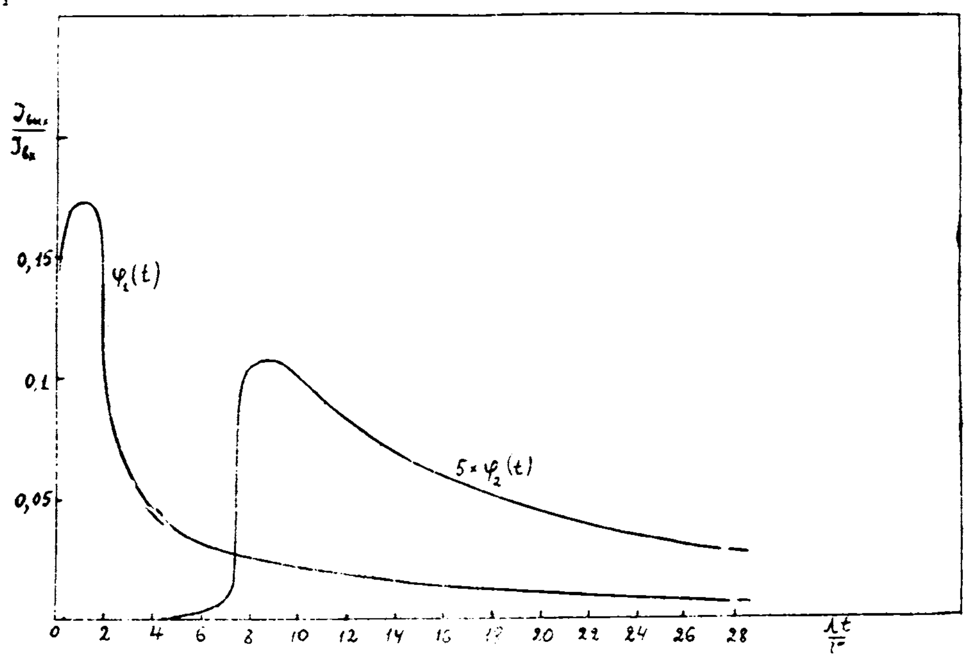

Рис. 1. Функции отклика на импульс $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ для отрезка $\Delta l = 4\lambda$.

Как видно из рис. 1, время существования отклика можно ограничить 20 пробегами.

Для дальнейшего применения $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ можно хранить таблицу их значений или же можно использовать их аналитическую аппроксимацию. Сформулируем задачу переноса нейтронов для отрезка l. На концах отрезка известны падающие потоки в зависимости от времени (см. рис. 2), а также все $\vec{J}_j$, $\overleftarrow{J}_j$ для отрезка времени t, $t-\tau$.

Требуется найти выходящие потоки $\overleftarrow{J}_1(t)$ и $\vec{J}_{11}(t)$, а также $\vec{J}_j$ и $\overleftarrow{J}_j$ внутри среды.

В качестве шага времени выберем время двух пробегов. Тогда можем записать для выходов на стыках отрезков $1 \div 10$ следующее условие:

$$\overleftarrow{J}_{\text{вых}_1} = \int\limits_{t-\tau}^{t} J_{1\text{вх}}(x)\varphi_1(t-x)dx + \int\limits_{t-\tau}^{t} J_2(x)\varphi_2(t-x)dx,$$

$$\vec{J}_{\text{вых}_2} = \int\limits_{t-\tau}^{t} \overleftarrow{J}_2(x)\varphi_1(t-x)dx + \int\limits_{t-\tau}^{t} J_{\text{вх}_1}(x)\varphi_2(t-x)dx,$$

. . . .

. . . .

. . . .

$$\vec{J}_{\text{вых}_{11}} = \int\limits_{t-\tau}^{t} \overleftarrow{J}_{11}(x)\varphi_1(t-x)dx + \int\limits_{t-\tau}^{t} \vec{J}_{10}(x)\varphi_2(t-x)dx.$$

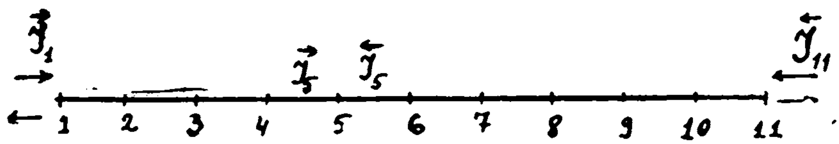

Рис. 2. Иллюстрация метода для одномерного случая.

Дискретизация времени позволяет последовательно вычислять выходящие потоки на всех стыках. Продолжая циклическое вычисление выходящих потоков во времени, можем получить решение нестационарной задачи в виде выходящих потоков на стыках, а по их данным составить картину нейтронного поля на отрезке.

Численное решение данной задачи, полученное этим методом, сравнивалось с решением, полученным чисто методом Монте-Карло, что и показало эффективность метода.

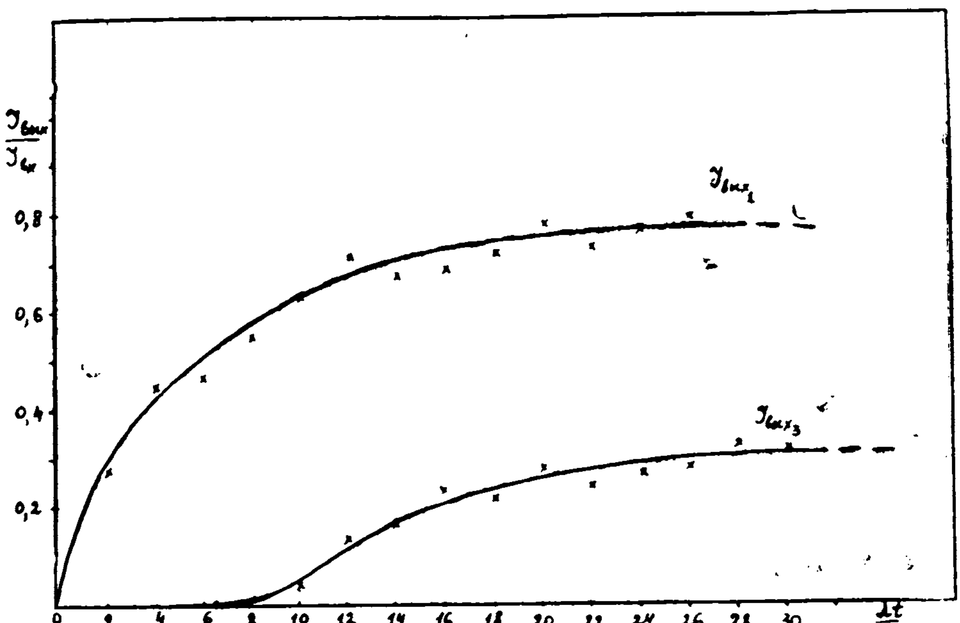

Рис. 3. Выходы через границы отрезка $2\Delta l$, на левый конец которого падает непрерывный поток нейтронов (x—результаты метода Монте-Карло).

На рис. 3 приведены выходящие потоки на границах отрезка $2\Delta l=8\lambda$, на левую грань которого непрерывно падает поток нейтронов. Сплошная кривая получена с помощью данного метода (кр. $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ на рис. 1), а крестиками обозначены результаты, полученные чисто методом Монте-Карло. Поскольку кривые $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ получены также методом Монте-Карло, причем использовалось то же число частиц, то данные рис. 3 свидетельствуют как о хорошем совпадении результатов, так и о несомненном преимуществе данного метода. Расчетное время меньше в 2 раза и более (уже при $l=2\Delta l$). Следует отметить, что для получения откликов не обязательно применение метода Монте-Карло, они могут быть получены любым другим подходящим методом [4, 5].

Кафедра ядерной физики,
Кафедра высоких энергий и элементарных частиц
Поступила 16.05.1980

ЛИТЕРАТУРА

1. **Соболь И. М.**, Численные методы Монте-Карло, изд-во «Наука», М., 1975.
2. **Золотухин В. Г., Усиков Д. А.**, Оценка реакторных параметров методом Монте-Карло, изд-во Атомиздат, М., 1978.
3. **Франк-Каменецкий А. Д.**, Моделирование траекторий нейтронов при расчете реакторов методом Монте-Карло, изд-во Атомиздат, М., 1978.
4. **Agresta J., Borst L. B.**, „Nucl. Sc. Eng", v. 7, p. 64, 1960.
5. **Nahavandi A. N., von Hollen R. F.**, Nucl. Sc. Eng., v. 18, p. 335, 1964.

Ա. Վ. ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ, Ի. Ն. ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ, Ռ. Ա. ՏԱՐԱՆՅԱՆ

ՀԱՇՎԱՐԿՄԱՆ ՄԵԹՈԴ ՆԵՅՏՐՈՆՆԵՐԻ ՈՉ ՍՏԱՑԻՈՆԱՐ ԱՆՑՄԱՆ ՀԱՄԱՐ ՍՈՒՊԵՐՊՈԶԻՑԻԱՅԻ ՍԿԶԲՈՒՆՔԻ ԿԻՐԱՌՈՒՄՈՎ

Ամփոփում

Առաջարկված է ոչ ստացիոնար պրոցեսների հաշվարկման մեթոդ Մոնտե-Կառլոյի մեթոդի օգտագործումով։ Այդ մեթոդը զգալիորեն կրճատում է մեքենայական հաշվարկման ժամանակը՝ համեմատած «մաքուր» Մոնտե-Կառլոյի մեթոդի հետ։