

# Сравнение результатов расчета прохождения быстрых нейтронов через слои водорода и углерода

БРОДКИН Э. Б., КОЖЕВНИКОВ А. Н., МАДЕЕВ В. Г., УТКИН В. А., ХРУСТАЛЕВ А. В.

Несмотря на достаточно полное теоретическое понимание процесса переноса излучения в среде и современные возможности реализации наиболее строгих методов решения уравнения переноса, при расчете защиты энергетических реакторов по одной программе возникает вопрос о достоверности получаемых результатов. Простейший способ оценки неопределенности расчета — сравнение результатов, полученных с помощью нескольких программ, значительно разного класса, использующих независимые системы констант.

Как показывает опыт, основной причиной расхождения результатов являются используемые в расчете исходные микроконстанты, способы их преобразования и модель, принятая для описания переноса излучения. Анализ влияния на результат перечисленных факторов — актуальная задача. Его целесообразно проводить в условиях простейшей геометрии источника излучения с тем, чтобы исключить действие других менее значимых факторов. В настоящей работе рассчитана зависимость плотности потока быстрых нейтронов от толщины слоев водорода и углерода.

Среды из водорода ( $\rho = 0,111 \text{ г/см}^3$ ) и углерода ( $\rho = 1,65 \text{ г/см}^3$ ) представлялись в виде бесконечной пластины толщиной 120 см, а источник нейтронов — в виде беско-

нечной пластины толщиной 1 см с равномерно распределенными по объему изотропными источниками  $\rho_i = 10^{-4} \text{ г/см}^3$ . Энергетическое распределение нейтронов источника соответствовало спектру деления. Расчеты проводили с помощью программ, краткое описание которых дано ниже.

Программа РОЗ-5 [1] предназначена для решения в многоугольниковом приближении задач о прохождении нейтронов (нейтронные задачи), первичного (возникающего в процессе деления урана) и вторичного (образующегося при захвате и неупругом рассеянии нейтронов)  $\gamma$ -излучения в одномерной плоской геометрии, а также для решения соответствующих сопряженных задач и расчета функционалов теории возмущений. В основу РОЗ-5 положен метод дискретных ординат. Решение конечно-разностных уравнений осуществляется итерационным методом с использованием ускорения сходимости по методу средних потоков. Расчеты по программе РОЗ-5 проводили с системой констант АРАМАКО-2F, обеспечивающей представление сечений упругого рассеяния в  $P_5$ -приближении. Интервал энергии нейтронов (от тепловой до 10,5 МэВ) представлялся в виде 26 групп.

Программа МОКДИФ [2] предназначена для расчета пространственно-энергетического распределения нейтронов в гетерогенной среде, одномерной геометрии (сфера, бесконечный цилиндр, пластина). Алгоритм программы базируется на сочетании метода Монте-Карло и метода сферических гармоник ( $P_1$ -приближение). Программа сопряжена с системой групповых (52 группы) констант НЕДАМ [3] для расчета методом Монте-Карло (при энергии  $> 0,1 \text{ МэВ}$ ) и 21-групповой системой (при энергии  $\leq 0,1 \text{ МэВ}$ ).

Программа SABINE-3 [4] предназначена для расчета пространственно-энергетического распределения нейтронов и  $\gamma$ -квантов в гетерогенной среде, одномерной геометрии (сфера, цилиндр, пластина).

В основе алгоритма нейтронной задачи — модель выведения — диффузия. Плотность потоков выведения рассчитывается в 19 энергетических группах численным интегрированием по объему источника. Уравнения диффузии для каждой из 26 групп решаются методом факторизации линейного оператора второго порядка с несколькими типами граничных условий. При решении гамма-задачи использован метод интегрирования по объему источника с экспоненциальным ослаблением и фактором накопления. Программа снабжена собственной библиотекой, содержащей ядерные константы взаимодействия нейтронов и  $\gamma$ -квантов для 33 элементов.

На рис. 1, 2 представлены результаты расчета пространственного распределения нейтронов разных энергетических групп в водороде и углероде для одной и той же постановки задачи по перечисленным выше программам. Видно, что результаты расчетов для обоих материалов расходятся с ростом толщины (более чем в 2 раза для толщины свыше 100 см). Как и предполагалось, достаточно убедительно причину расхождения результатов удалось проанализировать для водорода, поскольку для этого элемента с хорошей точностью известно сечение взаимодействия нейтронов практически во всем рассматриваемом интервале энергии, нейтроны рассеиваются только упруго, а дифференциальное сечение рассеяния выражается простой формулой.

В первоначальном расчете по программе РОЗ-5 использовали 8-групповое представление спектра нейтронов в интервале 0,1—10,5 МэВ в соответствии с системой кон-

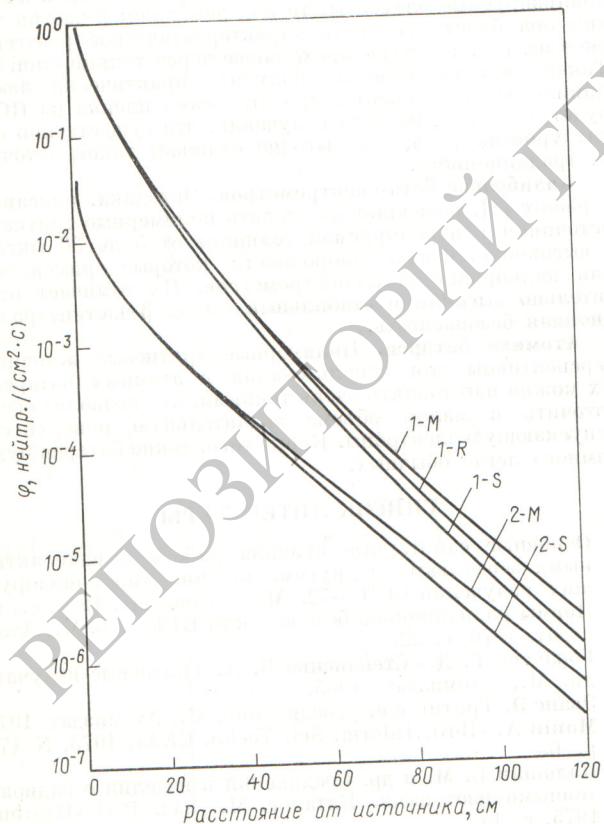


Рис. 1. Пространственное распределение плотности потока нейтронов в водороде: 1 —  $E > 0,1 \text{ МэВ}$ ; 2 —  $E > 6,5 \text{ МэВ}$ ; M — расчет по программе МОКДИФ с условием на границе слева от источника — вакуум; R — расчет по программе РОЗ-5 с тем же условием на границе источника — среда; S — расчет по программе САБИНЕ-3 с условием «отражение» на границе источника — среда

stant АРАМАКО-2F. Поскольку плотность потока нейтронов, рассчитанная по РОЗ-5 при таком представлении энергетического распределения, получилась меньше плотности потока тех же нейтронов, рассчитанной по программе МОКДИФ, то было сделано предположение, что 8 групп для представления спектра в этом интервале недостаточно.

Для проверки этого предположения по программе РОЗ-5 было рассчитано пространственное распределение плотности потока нейтронов в интервалах энергии 0,1—13,5 МэВ в 30-групповом представлении и 6,5—13,5 МэВ в 11-групповом представлении. Полные групповые сечения взаимодействия были вычислены на основе сечений, используемых в программе МОКДИФ. Групповые индикаторы рассеяния определяли по аналитической формуле для упругого рассеяния. Сравнение результатов расчета по программам МОКДИФ и РОЗ-5 с такой системой констант (см. рис. 1) показывает их хорошее совпадение во всем интервале толщины (0—120 см). Этот факт свидетельствует в пользу того, что в первую очередь причину расхождения результатов, получаемых с помощью программ, реализующих наиболее строгие модели переноса излучения в среде, следует искать в системе констант, используемой совместно с вычислительной программой.

Анализ причин расхождения, естественно, усложняется, когда сравниваются результаты, полученные с помощью программ, в которых с разной степенью строгости моделируется процесс переноса нейтронов или когда типов взаимодействия нейтронов с ядрами среды несколько, а их сечения не выражаются через простые зависимости. Именно этот случай имеет место при сравнении результатов, полученных с помощью программ SABINE-3, РОЗ-5 и МОКДИФ как для водорода (при сравнении SABINE-3 с РОЗ-5 и МОКДИФ), так и для углерода (при сравнении любой пары программ). Пока не удалось провести достаточно полного анализа расхождения результатов для рассчитанных вариантов пространственного распределения в углероде. Однако, придавая значение результату как таковому, мы сочли полезным его представить.

В заключение следует отметить, что анализ идентичности результатов, получаемых по различным программам с той или иной системой констант, является одной из актуальных и недостаточно решенных задач в области исследования всевозможных характеристик поля излучения.

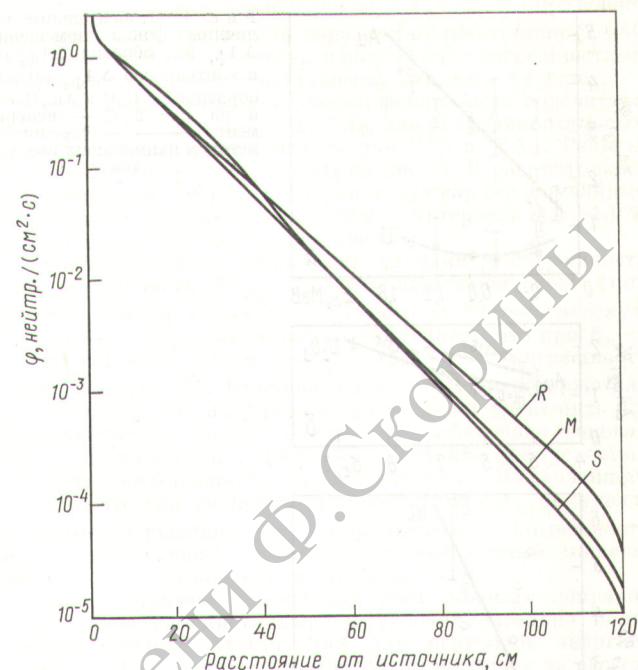


Рис. 2. Пространственное распределение плотности потока нейтронов в углероде при  $E > 0,1$  МэВ:  $M$  — расчет по программе МОКДИФ с условием на границе слева от источника — вакуум;  $R$  — расчет по программе РОЗ-5 с тем же условием;  $S$  — расчет по программе SABINE-3 с условием «отражение» на границе источник — среда

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гермогенова Т. Л. и др. В кн.: Вопросы физики защиты реакторов. Вып. 4. М., Атомиздат, 1972, с. 22.
- Кожевников А. Н. и др. Препринт ИАЭ-2877. М., 1977.
- Захаров Л. Н. и др. Препринт ИАЭ-2994. М., 1978.
- Никс П., Перлани Г., Понти К. В кн.: Физические проблемы защиты реакторов. М., Атомиздат, 1971, с. 5.

Поступило в Редакцию 23.03.79

УДК 539.125.5

## Анализ методики измерений сечений взаимодействия быстрых нейтронов активационным методом

ДАВЛЕТШИН А. Н., ТИПУНКОВ А. О., ТИХОНОВ С. В., ТОЛСТИКОВ В. А.

В экспериментальных данных разных авторов, полученных различными методами, даже для таких изученных нуклидов, как  $^{238}\text{U}$  и  $^{197}\text{Au}$ , до настоящего времени существуют значительные расхождения. Особенно это относится к энергии  $\geq 1$  МэВ. Расхождения имеют место не только между данными времязпролетных и активационных методик, но и в самом активационном методе между данными разных авторов. По нашему убеждению, это связано с некорректным учетом фоновых поправок на эффекты рассечения нейтронов.

При облучении образцов на электростатическом ускорителе необходимо определить активность  $N_{\gamma 0}$ , наведенную в образце нейтронами, попавшими в него непосредственно из мишени. Однако при облучении образца в него попадают и нейтроны, испытавшие после вылета из мишени различные взаимодействия в элементах конструкций, расположенных вблизи образца. Спектр этих нейтронов

может существенно отличаться от спектра нейтронов из мишени. Этим фоновым нейtronам соответствуют фоновые наведенные активности образца, которые в дальнейшем будем называть фонами образца. Имеются и другие причины, по которым экспериментально измеряемый эффект отличается от  $N_{\gamma 0}$ .

Опишем кратко источники фонов образца и способы их измерения.

1. Фон помещения  $A_{\phi 1}$ . Этот фон вызван нейтронами, рассеянными от стен экспериментального зала, и предполагается постоянным вдали от стен.

В случае больших периодов полураспада его удобно определять путем сравнения активностей образцов, одновременно облученных в нормальных условиях (расстояние от мишени  $\sim 4$  см) и на расстоянии  $\sim 2-3$  м от мишени или измерением зависимости активности образца от расстояния до мишени. Экстраполируя эту зависи-