

Из расчета следует, что вторичное радиоактивное загрязнение воды Енисея невелико и для ^{137}Cs существенно меньше фоновой концентрации, наблюдаемой выше сброса комбината — $1\text{--}3\text{ Бк/м}^3$.

Единичные измерения, выполненные в 1994 г. в створах пос. Предивинск и Стрелка, не выявили существенного отличия концентрации ^{137}Cs в воде от фоновых, наблюдаемых выше сброса комбината. Это не противоречит результатам расчета. Точнее определить масштаб вторичного радиоактивного загрязнения Енисея инструментальным путем сложно, так как в настоящее время окончательно не прекращен радиоактивный сброс в реку, и кроме того измерение малой концентрации радионуклидов в воде сопряжено с большими погрешностями.

В заключение следует отметить, что предлагаемую модель можно использовать для оценки вторичного загрязнения воды в реках не только радиоактивными веществами, но и химическими, к которым относятся тяжелые металлы, фенолы и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носов А.В., Мартынова А.М. Анализ радиационной обстановки на р. Енисее после снятия с эксплуатации прямоточных реакторов Красноярского ГХК. — Атомная энергия, 1996, т. 81, вып. 3, с. 226—232.
2. Караушев А.В., Меерович Л.Н. Метод расчета диффузионного растворения вещества на дне потока. — Труды ГГИ, 1983, вып. 237, с. 110—115.
3. Маккавеев В.Н., Коновалов И.М. Гидравлика. Л.: Речиздат, 1940. 643 с.
4. Методические основы оценки антропогенного влияния на качество поверхностных вод. Под ред. А.В. Караушева. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 175 с.
5. Носов А.В., Ашанин М.В., Иванов А.Б., Мартынова А.М. Радиоактивное загрязнение р. Енисея, обусловленное сбросами Красноярского горно-химического комбината. — Атомная энергия, 1993, т. 74, вып. 2, с. 144—149.
6. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. Изд. 2-е. М.: Наука, 1967. 491 с.
7. Lerman A., Brunskill G. Migration of major constituents from lake sediments into lake water and its bearing on lake water composition. — Limnol. Oceanogr. 1971, v. 16(6), p. 880—890.
8. Бурков А.И., Возжеников О.И., Морозько Е.Н. Моделирование десорбции ^{90}Sr и ^{137}Cs с затопленной поймы. — В сб.: Экология регионов атомных станций. Под ред. Ю.А. Егорова. 1995, вып. 3, с. 98—103 (Атомэнергопроект).

Поступила в Редакцию 20.02.97

УДК 539.125.42

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ПРОТОНОВ В СРЕДЕ С НЕОДНОРОДНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ВЕЩЕСТВА

Ефремов Е.В., Иванов Н.А. (ЦФТИ МО РФ), Москалев О.Б. (ИПМ РАН)

Под действием протонов в аппаратуре космических аппаратов накапливаются радиационные повреждения, что отрицательно сказывается на ее работоспособности и сроке службы. Степень такого негативного воздействия определяется флюенсом протонов и вторичных частиц, а также создаваемой ими дозой и мощностью дозы в конструкционных материалах аппаратуры. Поэтому такие характеристики представляют значительный интерес, а экспериментальные и расчетные методы их исследования постоянно развиваются.

В настоящей работе описан комплекс программ для расчета указанных характеристик в объектах сложной геометрии с учетом неоднородности распределения конструкционных материалов в блоках и приведены результаты расчетно-экспериментального исследования профиля энергосвечения протонов энергией 100 МэВ в модельной преграде. Под неоднородностью здесь понимается наличие множества элементов разной конфигурации с размерами, намного меньшими размера блока. Эти

элементы могут состоять из разных материалов и только частично заполняют объем блока. В частности, радиоэлектронная аппаратура при исследовании радиационных эффектов может быть представлена в виде блока с описанной неоднородностью. Эксперименты и расчеты (см., например, статью Митрикаса В.Г., Сахарова В.М. и Семенова В.Г. «Прохождение первичных протонов через защиту, характеризующую случайным распределением вещества», опубликованную в журнале в 1985 г., т. 59, вып. 6, с. 425—428) показывают, что глубинное распределение дозы, создаваемой потоком высокоэнергетичных протонов, и амплитуда профиля энерговыделения в таких объектах существенно отличаются от аналогичных характеристик для однородных сред. Это обстоятельство необходимо учитывать при определении стойкости и срока службы в условиях космоса радиоэлектронной аппаратуры. Расчетно-экспериментальное моделирование энерговыделения показывает возможности комплекса программ при решении таких задач и демонстрирует степень различия распределения дозы в средах с однородным и неоднородным заполнением веществом.

Алгоритмические основы комплекса программ. Комплекс решает аналоговым методом Монте-Карло многогрупповую систему уравнений переноса

$$\Phi_j(r, i, \Omega, t, \tau, k) = \int_0^{s(\Gamma)} ds \exp \left\{ - \int_0^s d\xi \Sigma_j^t |r - \xi \Omega, m(\xi)| \right\} \left\| \sum_{j_1} G_{jj_1} \Phi_{j_1} + \right. \\ \left. + Q_j \right\} (r - s\Omega, m(s), \Omega, t - \sum_m \Delta s_m / v_{jm}, \tau, k); j = 1, \dots, j_{\max}.$$

Для простоты рассмотрен случай стабильных частиц, однако возможность распада частицы может быть учтена. Это значит, что частица в некоторой точке пробега с некоторой вероятностью, которая зависит от времени, прошедшего с момента ее рождения, может поглотиться, но при этом могут родиться другие частицы.

Здесь $\Phi_j(r, i, \Omega, t, \tau, k)$: j, i — тип частицы и номер группы; τ — признак стабильности или нестабильности частицы; k — признак ее заряженности или нейтральности; $\tau = \tau(j)$, $k = k(j)$ — однозначные функции, и эти лишние аргументы введены только для удобства; $s(\Gamma)$ — расстояние от точки r до границы области вдоль направления — Ω ; Δs_m — часть пути s , $0 < s < s(\Gamma)$, которую частица проходит со скоростью v_{jm} .

Зависимость скорости v_{jm} от типа частицы и энергии (в граничных точках отрезков Δs_m частица переходит из одной энергетической группы в другую) означает, что групповое разбиение для разных типов частиц может быть различным.

Аргумент $m(\xi)$ функции Σ_j^t , а также подынтегральных функций определяется так (для краткости опустим индексы материальной зоны и типа частицы):

$$m(\xi) = \begin{cases} i, & \text{если } \xi < \min[s(\Gamma), l(i-1, i)], \\ i-1, & \text{если } l(i-1, i) < \xi < \min[s(\Gamma), l(i-2, i-1) + l(i-1, i)] \\ \text{и т.д.} \end{cases}$$

Здесь $l_{jn}(i-1, i)$ — расстояние, на котором заряженная частица j -го типа за счет кулоновских взаимодействий в материальной зоне n из группы $i-1$ попадет в группу i (индексы j, k , и n опущены). Если частица электронейтральна, то $l_{jn}(i-1, i) = \infty, \forall n, i$.

Плотность источников рассеяния $G_{jj_1} \Phi_{j_1}$ и независимых источников Q_j определяется обычным образом:

$$(G_{jj_1} \Phi_{j_1})(r, i, \Omega, t, \tau, k) =$$

$$= \sum_{j_1} \int d\Omega_1 \Sigma^s(r, j_1 \rightarrow j, i_1 \rightarrow i, \Omega_1 \rightarrow \Omega) \Phi_{j_1}(r, i_1, \Omega_1, t, \tau, k);$$

$$Q_j = Q_j(r, i, \Omega, t, \tau, k).$$

Неоднородности распределения материалов описываются функцией $P_L(x)$, задающей зависимость плотности вероятности от геометрического размера L и толщины вещества x . В расчетах блок с неоднородным заполнением принимается заполненным материалом, который характеризуется усредненными по объему плотностью и химическим составом вещества. При каждом попадании сюда частицы следующий переход на траекторию выбирается с использованием функции $P_L(x)$, которая определяет случайным образом массовую толщину блока. При расчете функционалов используется оценка по пробегу.

Методика проведения эксперимента. В качестве объекта для моделирования энерговыделения в неоднородной среде была использована составленная из пластин сборка, схема которой приведена на рис. 1. Каждая пластина состояла из 23 параллельных

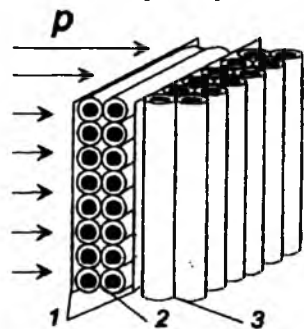


Рис. 1. Схема облучения модельной сборки в эксперименте (показаны первые две пластины): 1 — дозиметр цветовой пленочный; 2, 3 — 1-я и 2-я пластина соответственно

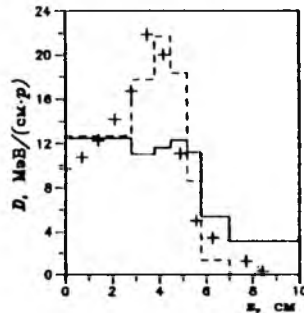


Рис. 2. Профиль энерговыделения протонов в модельной сборке, полученный в эксперименте (+) и расчете для композиции материалов плотностью $1,99 \text{ г/см}^3$ и эффективным атомным номером 9,07 при задании идеализированной (—) и случайно-неоднородной структуры сборки (---)

отрезков провода типа ППВ (радиус медной жилы $R_1 = 0,07 \text{ см}$, хлорвиниловой оплетки $R_2 = 0,15 \text{ см}$) длиной 7 см . Число пластин $N = 15$, причем оси отрезков провода рядом стоящих пластин различно ориентированы: вертикально либо горизонтально. Между пластинами устанавливали пленочные цветочные детекторы типа Ф2-2 (на большой глубине сборки — типа Ч-2). Полная толщина сборки составляла 10 см .

В эксперименте на линейном ускорителе И-100 ИФВЭ определяли распределение по длине сборки дозы протонов энергией 100 МэВ , падающих по нормали к поверхности пластин сборки. Последнюю при этом устанавливали на расстоянии 100 см от выходного фланца ускорителя и облучали в течение 10 мин протонами с длительностью импульса 10 мкс . Частота посылок составляла $0,25 \text{ Гц}$, ток в импульсе 20 мА . После облучения детекторы обрабатывали на считывателе дозы МСД-1. Полученный в эксперименте профиль энерговыделения, нормированный на единичный флюенс протонов, представлен на рис. 2. Относительная погрешность экспериментальных значений дозы составляет 20% .

Расчет профиля энерговыделения протонов. Для расчетных исследований профиля энерговыделения протонов методом Монте-Карло определена плотность вероятности реализации толщины в модельной сборке. Рассмотрены два варианта структуры сборки: идеализированная и случайно-неоднородная, в которой случайным образом учтены неизбежные в эксперименте отличия от идеальной геометрии, обусловленные погрешностями диаметра и прямолинейности провода, смещением осей отрезков провода и др.

Расчетная плотность вероятности представлена на рис. 3. Плотность вероятности для идеализированной структуры имеет минимумы, которые соответствуют толщине, реализующейся при прохождении частиц по диаметру, а также касательным к окружностям в сечении провода в каждом слое. Аналогичный результат дало и аналитическое рассмотрение, где плотность вероятности определяется из отношения

вероятности попадания частицы в элементарную площадку к соответствующему последнему интервалу значений толщины Δs , получаемому из геометрических построений. Например, плотность вероятности, полученная из указанного отношения для элементарного квадрата со стороной $l \ll R_2$ и максимальной толщины, соответствующей прохождению по диаметру,

$$P(s_{\max}) = \frac{l^2}{4R_2^2} \frac{1}{\Delta s} = \frac{1}{NR_2^2 \rho_2} \frac{1}{\frac{R_2}{R_1} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right) + 1} = 0,0133,$$

где ρ_1, ρ_2 — плотность меди и хлорвиниловой оплетки соответственно, а для малой толщины, соответствующей прохождению по касательным к окружностям сечения большего радиуса, $P(s_{\max}) \sim s^3$.

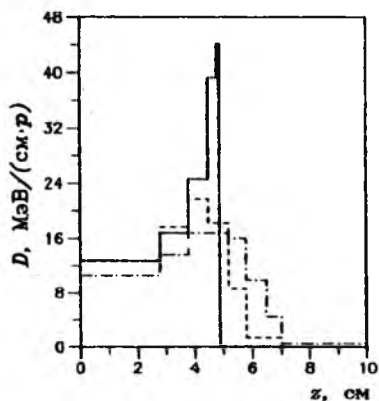
Для случайно-неоднородной структуры в соответствии с центральной предельной теоремой плотность вероятности принимает вид нормального распределения. Математическое ожидание и дисперсия данного распределения равны аналогичным параметрам распределения плотности вероятности для одной пластины идеализированной сборки, изображенной на рис. 1, умноженным на коэффициент, равный числу пластин в сборке.

С использованием разработанного комплекса программ рассчитаны профили энергосвечения протонов энергией 100 МэВ в модельной сборке с однородным и неоднородным заполнением медью либо композицией материалов с эффективным атомным номером провода типа ППВ, который равен 9,07. Плотность материала во всех расчетах задавалась равной средней плотности сборки, т.е. 1,99 г/см³. Результаты расчетов приведены на рис. 2, 4.

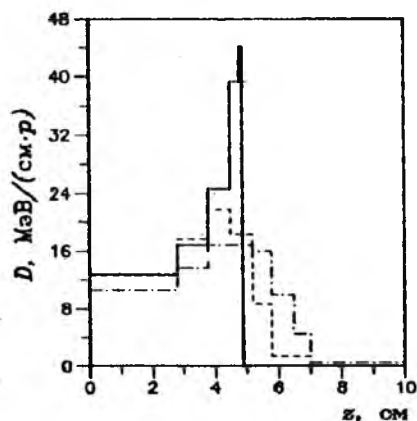
Анализ результатов показывает, что профили энергосвечения протонов в случайно-неоднородной и однородной средах имеют существенные различия, заключающиеся в том, что амплитуда профиля в первом случае ниже, а средний пробег — больше.

Наиболее удовлетворительно соответствует экспериментальным данным профиль энергосвечения, полученный в расчете для сборки со случайно-неоднородным заполнением композицией материалов. Различия дозы на толщине сборки, меньшей длины пробега протона энергией 100 МэВ, здесь составляют 30%. На большой толщине экспериментальные значения дозы выше расчетных не менее чем в 2 раза, что, по-видимому, вызвано наличием в пластинах реального образца щелей между отрезками провода. Это согласуется с тем, что на указанной толщине расчетные значения дозы для сборки с идеализированной структурой превышают данные эксперимента (см. рис. 2). Последнее есть следствие того, что вероятность реализации в идеализированной структуре прострелов с малой толщиной значительно выше, чем в реальном образце, структура которого ближе к случайно-неоднородной, хотя и не является таковой.

Поскольку при проведении расчетов необходимо определять степень детальности задания состава ма-



Р и с. 3. Плотность вероятности реализации толщины для идеализированной (—) и случайно-неоднородной структуры сборки (---)



Р и с. 4. Расчетный профиль энергосвечения протонов в модельной сборке для однородного (—) и случайно-неоднородного заполнения (---) композицией материала с эффективным атомным номером 9,07 и для случайно-неоднородного заполнения медью (-.-.)

териалов объекта, оценена погрешность результата, связанная с заменой конструкционных материалов сборки медным эквивалентом. Для этого проведен расчет профиля энергосвечения протонов в модельной сборке со случайно-неоднородным заполнением медью (см. рис. 4). Видно, что заполнение композицией материалов с усредненным химическим составом более предпочтительно, чем просто медью. Так, в последнем случае амплитуда зависимости ниже экспериментальной и рассчитанной для композиции на 20%, а доза на большой толщине значительно выше, что связано с большей длиной пробега протонов в веществе с более высоким атомным номером.

Профили энергосвечения протонов в случайно-неоднородной и однородной средах имеют существенные различия. Амплитуда профиля в первом случае ниже, средний пробег — больше.

Плотность вероятности набора дозы в элементе, экранированном неоднородной преградой. Так как случайно-неоднородная структура описывается вероятностно, то и рассчитываемые значения дозы носят вероятностный характер. Доза здесь может интерпретироваться как усредненная по поверхности, перпендикулярной направлению движения протонов. Поскольку конкретный радиоэлемент в соответствии с заданной плотностью вероятности может быть экранирован слоем любой толщины в заданном интервале, то можно определить зависимость плотности вероятности набора дозы $P(D)$. Усредненные значения дозы с данной плотностью для заданных интервалов тол-

щин приведены на рис. 2. Расчетная зависимость плотности $P(D)$ для модельной сборки приведена на рис. 5.

Плотность $P(D)$, определенная для блока радиоэлектронной аппаратуры, позволяет оценивать вероятность его реакции на облучение протонами, например, выхода из строя при заданном периоде нахождения на орбите:

$$W(D > D_0) = \int_{D_0}^{D_{\max}} P(D) dD,$$

где D_0 , $D_{\max}$ — критическая и максимальная доза соответственно.

Использование данного пространственно-вероятностного описания дозового поля позволит адекватно прогнозировать последствия воздействия потоков заряженных частиц на радиоэлектронную аппаратуру в космосе.

Поступила в Редакцию 12.02.97

Р е ф е р а т ы с т а т е й

УДК 621.039.7

Бергельсон Б.Р., Никитин А.А., Старостин В.Т., Чувило И.В., Крючков Э.Ф., Тихомиров Г.В., Шмелев А.Н. Подкритическая установка (мишень—бланкет) для трансмутации актиноидов. — Атомная энергия, 1997, т. 82, вып. 5, с. 341—347.

Представлены результаты расчетов и проектных проработок установки для трансмутации актиноидов. Рассмотрены два варианта blankets — с использованием и без использования энергии в процессе трансмутации. Рис. 3, табл. 4, список лит. 9 назв.

УДК 621.039.526

Тучков А.М., Шейнкман А.Г. Влияние способа отключения теплоотводящей петли на рас-

пределение поля энергосвечения БН-600. — Атомная энергия, 1997, т. 82, вып. 5, с. 348—351.

На основе проведения нестационарного трехмерного расчета БН-600 в квазистатическом приближении рассматривается режим отключения одной теплоотводящей петли при работе реактора на номинальной мощности. Рассмотрено несколько алгоритмов ввода рабочих органов СУЗ в активную зону. Определены темп снижения и перераспределения мощности по активной зоне. Проведен анализ локальных возмущений. Предложен режим, исключающий перекося мощности по петлям и обеспечивающий более плавное снижение мощности реактора. Рис. 2, табл. 2, список лит. 2.

Продолжение см. на с. 384

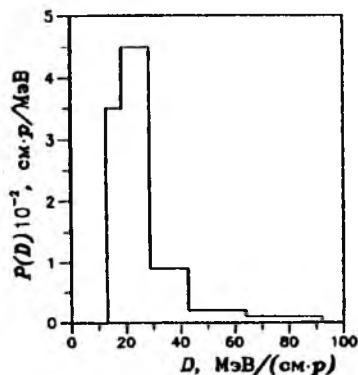


Рис. 5. Плотность вероятности набора дозы в сборке со случайно-неоднородным распределением материала на глубине 3,8 см