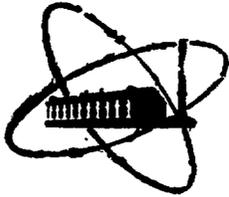


8118401425

ФЭИ-1324



ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

*А. А. ДУБНИН, Ю. А. КУРАЧЕНКО, В. Е. КОЛЕСОВ*

**Исследование параметров  
приближенной модели „ВЫВЕДЕНИЕ  $-P_1$ “  
в задачах переноса нейтронов в воде**

Обнинск — 1982

УДК 621.039.538

А. А. Дубинин, Ю. А. Кураченко, В. Е. Колесов.

Исследование параметров приближенной модели «ВЫВЕДЕНИЕ +  $P_1$ » в задачах переноса нейтронов в воде.

ФЭИ-1324. Обнинск: ФЭИ, 1982. — 20с.

Рассмотрены задачи численной оптимизации параметров переноса нейтронов («сечений выведения») в водороде и кислороде. Исследована аддитивность оптимизационного эффекта в расчетах прохождения нейтронов спектра деления в сферическом слое воды большой оптической толщины. Выполнен анализ качества расчетов функционалов потока нейтронов в воде по программе REMPI, реализующей приближенную модель «выведение +  $P_1$ ».

## Введение

Программы для ЭВМ, реализующие эффективные алгоритмы приближённого расчёта характеристик полей излучений, являются основным инструментом на начальных этапах проектирования идеинотехнических установок. Объединение этих программ с программами оптимизации характеристик защиты позволяет обеспечить автоматический отбор субоптимальных вариантов защитной композиции, которые подлежат дальнейшему всестороннему анализу с привлечением более точных алгоритмов решения уравнения переноса излучений.

При использовании приближённых методов исходное кинетическое уравнение переноса излучений заменяется на его сгруппированный аналог, основанный на некоторых априорных предположениях об общих закономерностях прохождения излучений. Такая редукция исходной модели даёт возможность построить эффективные быстродействующие алгоритмы расчёта характеристик защиты, применимость которых целесообразно оценивать сопоставлением получаемых результатов с результатами более точного приближения кинетического уравнения. На основе этого сопоставления можно попытаться повысить точность расчётов по сгруппированной модели и расширить диапазон её применимости. Так возникает оптимизационная задача: посредством варьирования параметров, характеризующих сгруппированную модель прохождения излучений, приблизить вычисляемые значения функционалов поля излучения к их значениям, полученным с использованием более точной модели. При этом предполагается, что основные закономерности переноса правильно описываются сгруппированной моделью, а варьируемые параметры характеризуют "точную структуру" модели, причём изменения параметров лежат в физически осмысленных диапазонах и сохраняют основные особенности сгруппированной модели. Далее сгруппированная модель с уточнёнными параметрами может быть использована для решения задач оптимизации состава и формы защитной композиции. Важно, что уточнённые параметры сгруппированной модели должны "лучше"

эту модель во всём диапазоне возможных при оптимизации изменений толщины слоев и состава композиции.

Задачи оптимизации параметров сгруппированной модели переноса нейтронов рассмотрены в работах [1, 2] применительно к функционалам потока в одномерной композиции большой оптической толщины, состоящей из железа. В этих работах получены оптимальные наборы параметров приближенной модели "выведение +  $P_1$ " для нескольких формулировок задачи оптимизации, т. е. для разных типов функционалов потока. В настоящей работе приводятся результаты исследования возможности повышения точности аппроксимации пространственно-энергетического распределения нейтронов в воде.

#### Постановка задачи.

В качестве реферных привлекались результаты, полученные из расчетов по программе КОЗ-6 [3]. Программа КОЗ-6 предназначена для решения многогрупповых уравнений переноса нейтронного и  $\gamma$ -излучений в плоских, сферических и цилиндрических одномерных композициях; используемые результаты получены из расчетов по одному из вариантов  $DS_n$ -метода в сферической композиции.

Приближенная модель переноса излучений реализована в программе КЕМН [1] также для одномерных композиций всех трех геометрий. Программа КЕМН обладает высоким быстродействием, что позволяет широко её использовать для решения различных оптимизационных задач (см., напр., [5 - 7]). Суть метода "выведение +  $P_1$ ", реализованного в алгоритмах программы КЕМН, состоит в выделении квазинерассеянного компонента излучения (параметры при этом служат оконструированные специальным образом "сечения выведения"); отражение рассеянного излучения описывается в  $P_1$ -приближении метода сферических гармоник. Рассматриваемая модификация метода характеризуется тем, что используемые параметры - групповые "сечения выведения" - не вносятся явно, а получаются из сечений, фигурирующих в уравнении переноса [1].

Запишем многогрупповые уравнения для расчёта квази-рассеянного компонента излучения по данной модификации для расчётной системы, изображённой на Рис. 1 :

$$\vec{\Omega} \nabla \Phi_{\vec{n}}^j(r, \vec{\Omega}) + \sum_{zem}^j(r) \Phi_{\vec{n}}^j(r, \vec{\Omega}) = S^j(r, \vec{\Omega}),$$

$$j = 1, \dots, J. \quad (I)$$

Здесь  $\Phi_{\vec{n}}^j(r, \vec{\Omega})$  - групповое значение пространственно-угловой плотности потока "нерассеянных" нейтронов;

$\sum_{zem}^j(r)$  - групповое значение макроскопического "сечения выведения",

$$\sum_{zem}^j(r) = \sum^j(r) - \sum_{S2}^{j \rightarrow j}(r), \quad \text{где}$$

$\sum^j(r)$  - сечение взаимодействия нейтронов;

$\sum_{S2}^{j \rightarrow j}(r)$  - второй момент разложения внутригрупповой матрицы рассеяния в ряд по полиномам Лежандра;

$S^j(r, \vec{\Omega})$  - групповое значение интенсивности источников нейтронов.

Соответствующие уравнения  $P_2$ -приближения метода сферических гармоник для расчёта рассеянного компонента излучения записываются следующим образом:

$$\text{div} [\Phi_{P_1}^j(r) \vec{n}] + \sum_0^j(r) \Phi_{P_0}^j(r) = \sum_{l=1}^{L-1} \sum_{S_0}^{i \rightarrow j}(r) \Phi_l^i(r) + [\sum_{S_0}^{i \rightarrow j}(r) - \sum_{S2}^{j \rightarrow j}(r)] \Phi_{N_0}^j(r),$$

$$\frac{1}{3} q \text{grad}_{\vec{n}} \Phi_{P_0}^j(r) + \sum_1^j(r) \Phi_{P_1}^j(r) = \sum_{l=1}^{L-1} \sum_{S1}^{i \rightarrow j}(r) \Phi_l^i(r) + [\sum_{S1}^{i \rightarrow j}(r) - \sum_{S2}^{j \rightarrow j}(r)] \Phi_{N_1}^j(r),$$

$$j = 1, \dots, J. \quad (2)$$

В уравнениях (2) :

$\Phi_{P_0}^j(r), \Phi_{P_1}^j(r)$  - групповые значения нулевого и первого моментов разложения плотности

потока рассеянного излучения;

$$\Phi_0^i(z) = \Phi_{n_0}^i(z) + \Phi_{p_0}^i(z); \quad \Phi_1^i(z) = \Phi_{n_1}^i(z) + \Phi_{p_1}^i(z),$$

где

$$\Phi_{n_0}^i(z) = \int_{4\pi} d\Omega \Phi_n^i(z, \vec{n}), \quad \Phi_{n_1}^i(z) = \int_{4\pi} \vec{n} d\Omega \Phi_n^i(z, \vec{n});$$

$$\Sigma_0^i(z) = \Sigma^i(z) - \Sigma_{s_0}^{i \rightarrow j}(z), \quad \Sigma_1^i(z) = \Sigma^i(z) - \Sigma_{s_1}^{i \rightarrow j}(z).$$

Уравнения (2) дополняются граничными условиями  $P_2$ -приближения (см. Рис. I):

$$2 \Phi_{p_1}^j(R_0) + \Phi_{p_0}^j(R_0) = 0;$$

$$2 \Phi_{p_1}^j(R) + \Phi_{p_0}^j(R) = 0, \quad j=1, \dots, J. \quad (3)$$

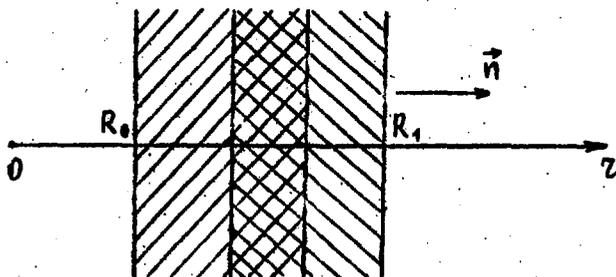


Рис. I. Пояснение к уравнениям (I) - (3), записанным для всех трёх одномерных геометрий.

Система уравнений (I) - (3) решается в такой последовательности: сначала рассчитывается квазинерассеянный компонент излучения (I), а затем методом прогонки решаются разностные аналоги уравнений (2) с учётом граничных условий (3). В реализованной версии метода "выведение +  $P_1$ " границы энергетических групп в уравнениях (I) - (2) совпадают. Решением системы уравнений (I) - (3) являются групповые значения плотностей потока  $\Phi_0^i(z)$  и тока  $\Phi_1^j(z)$  излучения.

В рассматриваемой модификации метода "выведение +  $P_I$ " форма "сечения выведения" в уравнениях (1) и, соответственно, форма поправки на квазиэнергетическое малучение в правых частях уравнений (2) зависит от аппроксимации разложения индикатором рассеяния (см. [1]). Так, если перейти к модификации "выведение + диффузия" (такая возможность реализована в программе НЕМР), то "сечение выведения" будет выглядеть несколько иначе:

$$\sum_{\tau_{em}}^j (\tau) = \sum^j (\tau) - \sum_{s_1}^{j \rightarrow i} (\tau),$$

и соответствующим образом изменится правая часть в диффузионных уравнениях. Из этого следует, что параметром рассматриваемой приближенной модели "выведение +  $P_I$ " можно считать "поправку" к сечению взаимодействия  $\xi^j$ , определяющую "сечение выведения" и дополнительные источники в  $P_I$ -уравнениях.

Запишем уравнения (1) и (2) для однородной среды, рассматривая второй момент разложения внутригрупповой индикатором как групповой параметр:

$$\begin{aligned} \vec{\Omega} \nabla \Phi_{\vec{n}}^j(\tau, \vec{\Omega}) + [\Sigma^j - \xi^j] \Phi_{\vec{n}}^j(\tau, \vec{\Omega}) &= S^j(\tau, \vec{\Omega}); \\ \text{div} [\Phi_{\rho_1}^j(\tau) \vec{n}] + \sum_0^j \Phi_{\rho_0}^j(\tau) &= \sum_{i=1}^{j-1} \sum_{s_0}^{i \rightarrow j} \Phi_{s_0}^i(\tau) + [\Sigma_{s_0}^{i \rightarrow j} - \xi^j] \Phi_{n_0}^j(\tau), \\ \frac{1}{3} \text{grad}_{\vec{n}} \Phi_{\rho_0}^j(\tau) + \sum_1^j \Phi_{\rho_1}^j(\tau) &= \sum_{i=1}^{j-1} \sum_{s_1}^{i \rightarrow j} \Phi_{s_1}^i(\tau) + [\Sigma_{s_1}^{i \rightarrow j} - \xi^j] \Phi_{n_1}^j(\tau); \\ j &= 1, \dots, J. \end{aligned} \quad (4)$$

Располагая решением уравнения переноса в однородной среде (программа РОБ-6), можно попытаться посредством варьирования параметров  $\xi^j$ ,  $j = 1, \dots, J$  приблизить

значения функционалов потока, получаемых с использованием программы КЕМРГ, к их "точным" значениям. Именно таким образом сформулированы и решены задачи определения оптимальных параметров модели "выведение +  $P_1$ " применительно к переносу нейтронов в железе (см. [1, 2]).

В настоящей работе исследованы возможности "улучшения" параметров используемой модели для расчётов прохождения нейтронов в воде. Известно, что модель "выведение +  $P_1$ " хорошо описывает характеристики нейтронных полей в воде при достаточно больших ослаблениях (см., напр., [4]). В соответствии с этим обстоятельством цели настоящей работы формулировались следующим образом.

1. Исследовать приближённую модель по отношению к расчёту прохождения нейтронов в однородных средах, состоящих из водорода и кислорода.
2. Получить оптимальные наборы параметров  $\xi^{i(\text{opt})}$  для водорода ( $\xi_n^{i(\text{opt})}$ ) и кислорода ( $\xi_o^{i(\text{opt})}$ ) посредством решения оптимизационных задач с привлечением результатов решения уравнения переноса по программе РСЗ-6.
3. Выяснить, аддитивен ли "оптимизационный эффект", сопоставив результаты расчётов прохождения нейтронов в воде:
  - а) по модели "выведение +  $P_1$ " со стандартными параметрами  $\xi_n^{i(\text{std})} = \sum_{j \rightarrow i} s_{2n}^{j \rightarrow i}$ ,  $\xi_o^{i(\text{std})} = \sum_{j \rightarrow i} s_{2o}^{j \rightarrow i}$ ;
  - б) по модели "выведение +  $P_1$ " с оптимальными параметрами  $\xi_n^{i(\text{opt})}$  и  $\xi_o^{i(\text{opt})}$с решением уравнения переноса, полученным по программе РСЗ-6.

Для решения оптимизационных задач использовалась модифицированная программа метода "скользящего допущения" [8], объединённая с программой КЕМРГ в оптимизационный комплекс МСД - КЕМРГ [5]. Целевая функция в задачах оптимизации параметров конструировалась из групповых плотностей потоков

нейтронов в однородной среде (состоящей из водорода или кислорода), полученных при помощи программы F03-6 ( $\psi^j(z)$ ,  $j = 1, \dots, 7$ ) и NEMPI ( $\psi^j(z) \equiv \phi_0^j(z)$ ,  $j = 1, \dots, 7$ ). В расчётах использовалась 28-групповая система нейтронных констант АРАМАКО - 2 Г [9].

Расчётная модель представляла собой однородный шар радиусом  $R = 200$  см с практически точечным ( $R_0 = 0.1$  см) изотропным источником нейтронов, распределённых по спектру нейтронов деления  $^{235}\text{U}$  (см. Табл. 2). Поскольку в обычно используемых спектрах деления отсутствуют нейтроны с энергиями в диапазоне  $14.5 \text{ Мэв} > E > 14.0 \text{ Мэв}$  (первая группа 28-группового разбиения), реально в расчётах фигурировало 27 энергетических групп, начиная с групп  $14.0 \text{ Мэв} + 10.5 \text{ Мэв}$ .

В Табл. I приводятся характеристики пространственных и угловых сеток, принятых в расчётах по программам F03-6 и NEMPI.

Целевая функция в задачах оптимизации параметров конструировалась из групповых значений плотностей потоков в точках внутри и на внешней поверхности шара:

$$F = \sum_{j=1}^{27} \sum_{k=1}^5 d_{jk} \frac{|\varphi_k^j - \psi_k^j|}{\psi_k^j} \quad (5)$$

где  $d_{jk}$  - весовые множители;

$$\varphi_k^j \equiv \psi^j(z_k), \quad \psi_k^j \equiv \Psi^j(z_k), \quad k = 1, \dots, 5; \quad j = 1, \dots, 27;$$

$$z_1 = 25 \text{ см}, \quad z_2 = 50 \text{ см}, \quad z_3 = 100 \text{ см}, \quad z_4 = 150 \text{ см},$$

$z_5 = 200$  см - для среды из водорода;

$$z_1 = 10 \text{ см}, \quad z_2 = 50 \text{ см}, \quad z_3 = 100 \text{ см}, \quad z_4 = 150 \text{ см},$$

$z_5 = 200$  см - для среды из кислорода.

В оптимизационных расчётах ядерные плотности элементов соответствовали их ядерным плотностям в воде при нормальных условиях:  $\rho_H = .037 \times 10^{24} \text{ яд./см}^3$ ;  $\rho_O = .0335 \times 10^{24} \text{ яд./см}^3$ .

Как видно из выражения (5), минимизируемая функция представляет собой сумму абсолютных величин относительных невязок плотностей потоков в реперных пространственных узлах. Целевая функция, составленная таким образом, чувствительна к дифференциальным (пространственно-энергетическим) характеристикам поля излучения при больших кратностях ослабления, поэтому наборы параметров, получаемых в результате решения оптимизационных задач, должны быть достаточно универсальными по отношению к разнообразным функционалам, характеризующим защиту от излучений. С целью получения наиболее равномерной аппроксимации весовые множители в (5) были выбраны постоянными по обоим индексам:  $\alpha_{jk} = 1$ ,  $j = 1, \dots, 27$ ;  $k = 1, \dots, 5$ .

Окончательно оптимизационные задачи формулировались таким образом:

посредством варьирования параметров  $\xi^j$ ,  $j = 1, 2, \dots, 12$  минимизировать функцию невязок  $F$  в однородной среде, состоящей из ядер водорода (кислорода). Размерность оптимизационных задач ( $N = 12$ ) определяется числом групп выведения, которое равно числу групп источника деления.

#### Результаты решения задач оптимизации параметров.

Решение оптимизационных задач позволило существенно уменьшить невязки плотностей потоков, получаемых по программой КЕМРГ и РСВ-6. Исходные и оптимальные наборы параметров  $\xi^j$ , а также соответствующие значения целевой функции  $F$  представлены в Табл. 2. В Табл. 3 приведены значения "сечений выведения"  $\sum_{rem}^j = \sum^j - \xi^j$  для исходных и оптимальных наборов параметров. Табл. 4 и 5 содержат информацию об отклонениях дифференциальных характеристик поля нейтронов, полученных по программе КЕМРГ с использованием исходных и оптимальных наборов параметров, от соответствующих величин, полученных по программе РСВ-6.

Представленные результаты, касающиеся "поправок"  $\xi^j$ , при расчёте водорода, демонстрируют определяющее влияние на

пространственно-энергетическое распределение излучения нейтронов первых пяти энергетических групп ( $1.4 \text{ МэВ} < E < 14 \text{ МэВ}$ ). Из Табл. 2 видно, что наибольшее отличие  $\xi_n^{i(\text{опт})}$  от  $\xi_n^{i(\text{исх})}$  наблюдается в пятой энергетической группе ( $1.4 \text{ МэВ} < E < 2.5 \text{ МэВ}$ ), где оно составляет  $\sim 60\%$  (что соответствует  $\sim 13\%$  различия в "сечении выведения", см. Табл. 3). Отметим, что максимум интенсивности спектра нейтронов деления лежит также в пятой энергетической группе. Очевидно, что пространственно-энергетическое распределение нейтронов ниже лежащих групп чувствительно к константам ( $\sum \tau_{emn}^5, \xi_n^5$ ) этой группы и "оптимизационный эффект" достигается значительным изменением первоначального значения  $\xi_n^{5(\text{исх})}$ . Параметры  $\xi_n^{i(\text{опт})}$ ,  $j = 6, \dots, 12$  отличаются от исходных незначительно, поскольку роль нейтронов этих групп в формировании пространственно-энергетического распределения менее существенна. Указанная особенность объясняется резким ростом сечения взаимодействия нейтронов с ядрами водорода с уменьшением энергии (для первых девяти групп при переходе в соседнюю группу сечение возрастает на  $\sim 40\%$ ), а также ростом интенсивности источника при переходе от первой к пятой группе, в которой эта интенсивность максимальна. Как следует из таблицы относительных невязок плотностей потоков (см. Табл. 4), эти невязки для исходного набора  $\xi_n^{i(\text{исх})}$  отрицательны, т. е. результаты расчёта по программе БЕМРГ занижены для нейтронов практически всех групп во всех пространственных узлах (исключением являются  $\Psi^i(\tau_k)$ ,  $i = 1 + 7$ ,  $\tau_k = 200 \text{ см}$ ). Переход от  $\xi_n^{i(\text{исх})}$  к  $\xi_n^{i(\text{опт})}$  в результате решения оптимизационной задачи обеспечил некоторое уменьшение  $\sum \tau_{emn}^i$  (см. Табл. 3), что привело к сближению результатов расчёта по программе БЕМРГ с результатами, полученными по программе РОЗ-6. Это сближение довольно существенно в узлах 50 см, 100 см, и 150 см; невязки в узлах 25 см и 200 см уменьшились незначительно. По-видимому, дальнейшее уменьшение "сечения выведения" ведёт к резкому возрастанию невязок для ведущих групп ( $i = 2 + 7$ ) на поверхности  $R = 200 \text{ см}$ , поэтому "улучшить" значение целевой функции таким путём не

удаётся.

На ядрах кислорода сечение взаимодействия растёт не так быстро с уменьшением энергии; кроме того, потеря энергии при рассеянии нейтрона на ядре кислорода относительно невелика. Поэтому роль нейтронов первых ведущих групп в формировании пространственно-энергетического распределения в кислороде существенно меньше соответствующей роли нейтронов ведущих групп при переносе в водороде. Это иллюстрируется совокупностью данных, приведённых в Табл. 2, 3 и 5. Константы  $\sum_{i \in m_0}^j$  и  $\xi_0^j$  несмежных групп слабо коррелируют между собой; это отражается и в поведении относительных невязок. Наибольшим изменениям подвергались "сечения выведения" 7 + 12 энергетических групп, т. е. по мере замедления нейтронов роль их в формировании потоков 13 + 27 групп возрастает. "Оптимизационный эффект", достигнутый при решении задачи оптимизации параметров переноса нейтронов в кислороде, существенно больше соответствующего эффекта, достигнутого в задаче оптимизации параметров переноса в водороде, что также объясняется слабой зависимостью потоков нейтронов в несмежных энергетических группах, т. е., в конце концов, малой потерей энергии при рассеянии нейтронов на ядрах кислорода.

Результаты, представленные в Табл. 6, демонстрируют неаддитивность "оптимизационного эффекта", т. е. уменьшение точности аппроксимации пространственно-энергетического распределения нейтронов при переходе от исходных наборов параметров модели "выведение + P<sub>1</sub>" к наборам параметров, полученным в результате решения оптимизационных задач. Следует сделать вывод о том, что хорошее описание пространственно-энергетического распределения нейтронов в воде моделью "выведение + P<sub>1</sub>" со стандартными параметрами в большой степени обусловлено взаимной компенсацией ошибок, допускаемых при расчёте взаимодействия нейтронов с ядрами водорода и кислорода. Этот вывод подтверждается различием знаков

$$\xi_0^j(\text{исх}) \equiv \sum_{i \in m_0}^{j-1} \xi_i^j \quad \text{и} \\ \xi_0^j(\text{опт}) \equiv \sum_{i \in m_0}^{j-1} \xi_i^j(\text{опт})$$

невязок, наблюдающихся в узлах  $\tau_k$  для водорода и кислорода для большинства энергетических групп (см. Табл. 4 и 5).

В заключение остановимся на качестве расчётов пространственно-энергетического распределения нейтронов спектра деления в ядре из воды по модели "выведение +  $P_I$ " со стандартным набором параметров  $\xi_k^{j(nk)} = \sum_{i=1}^{j-1} \psi^i$  и  $\xi_0^{j(nk)} = \sum_{i=2}^{j-1} \psi^i$ . Значения невязок (см. Табл. 6) малы во всех пространственных узлах для всех энергетических групп, причём с увеличением координаты  $\tau$  внутри ядра наблюдается тенденция к их уменьшению. Эта тенденция проявляется особенно ярко в функциях, представленных в двух первых позициях Табл. 7. В этой таблице сопоставлены значения:

а) плотностей потоков нейтронов с энергией  $E > 1.4$  Мэв

$$\Phi_k^{1-5} = \sum_{i=1}^5 \Psi^i(\tau_k), \quad F_k^{1-5} = \sum_{i=1}^5 \Psi^i(\tau_k);$$

б) плотностей потоков нейтронов с энергией  $E > 0.1$  Мэв

$$\Phi_k^{1-9} = \sum_{i=1}^9 \Psi^i(\tau_k), \quad F_k^{1-9} = \sum_{i=1}^9 \Psi^i(\tau_k);$$

в) интегралов захвата

$$I_k = \sum_{i=1}^{27} \Psi^i(\tau_k) \sum_c^i \Sigma_{c, H_2O}, \quad J_k = \sum_{i=1}^{27} \Psi^i(\tau_k) \sum_c^i \Sigma_{c, H_2O};$$

г) мощностей эквивалентной дозы

$$P_k = \sum_{i=1}^{27} \Psi^i(\tau_k) D^i, \quad Q_k = \sum_{i=1}^{27} \Psi^i(\tau_k) D^i,$$

полученные по программам РОЗ-6 и КЕМР со стандартным набором параметров для ядра из воды радиусом  $R = 200$  см. Следует отметить, что невязки, представленные в Табл. 6, зачастую сопоставимы по величине с сеточными эффектами вычисления по программе РОЗ-6 (этот факт был обнаружен варьированием пространственно-угловых сеток); в большинстве случаев они заведомо лежат в коридоре ошибок, обусловленных погрешностями в групповых константах переноса нейтронов.

Общий вывод, вытекающий из результатов выполненной работы, состоит в следующем:

1. Приближённая модель "выведение +  $P_I$ ", реализованная в программе КЕМР, хорошо описывает пространственно-энергети-

ческое распределение нейтронов в широком диапазоне толщин слоев воды.

2. Параметры приближенной модели "выведение +  $P_I$ ", характеризующие взаимодействие нейтронов с ядрами водорода и кислорода, взаимно согласованы и являются в известной степени оптимальными.

Табл. I. Характеристики пространственно-угловых сеток, принятых в расчетах по программам P03-6 и NEMPI.

Пространственная сетка в расчетах по программе P03-6						
номер геометр. зоны	1	2	3	4	5	
координаты зоны по Z, см	0.1-0.6	0.6-2.0	2.0-10.	10.-30.	30.-200.	
толщ.зон, см	0.5	1.4	8.0	20.0	170.0	
число узлов сетки, группы I + I2	35	15	30	20	85	
число узлов сетки, группы I3 + 27	10	14	10	15	85	
Пространственная сетка в расчетах по программе NEMPI						
номер геометр. зоны	1	2	3	4	5	
координаты зоны по Z, см	0.1-0.6	0.6-2.0	2.0-7.0	7.0-30.	30.-200.	
число интер- валов, группы I + 27	10	14	15	23	85	
Угловая сетка в расчетах по программе P03-6						
Группы I + I2			Группы I3 + 27			
интервалы по $\mu = \cos \theta$	-1.+0.	0.+0.9	0.9+1.	-1.+0.	0.+0.9	0.9+1.
число уз- лов квад- ратуры Гаусса	6	5	10	5	5	6

Табл. 2 . Групповые значения интенсивности источника нейтронов на поверхности  $R_0 = 0.1$  см ; исходные и оптимальные наборы параметров для водорода и кислорода.

№ групп	энергетич. диапазон, МэВ	$S_0^j$ , н/см <sup>2</sup> с	$\xi_N^{j(иск)}$ , см <sup>-1</sup>	$\xi_N^{j(опт)}$ , см <sup>-1</sup>	$\xi_0^{j(иск)}$ , см <sup>-1</sup>	$\xi_0^{j(опт)}$ , см <sup>-1</sup>
1	14.0-10.5	6.00+05	3.88-03	4.01-03	9.21-03	1.25-02
2	10.5-6.5	1.57+08	9.07-03	1.01-02	5.68-03	9.21-03
3	6.5-4.0	8.73+08	1.53-02	2.34-02	1.14-02	1.72-02
4	4.0-2.5	1.82+09	2.24-02	1.23-02	1.55-02	2.03-02
5	2.5-1.4	2.70+09	3.64-02	5.84-02	4.95-02	5.20-02
6	1.4-0.8	2.03+09	4.86-02	5.58-02	2.70-02	3.63-02
7	0.8-0.4	1.42+09	7.64-02	7.71-02	2.28-02	3.04-02
8	0.4-0.2	6.15+08	1.09-01	1.22-01	-2.65-03	-5.74-02
9	0.2-0.1	2.41+08	1.49-01	1.57-01	-5.96-04	-5.16-02
10	0.1-0.0465	9.50+07	2.02-01	2.15-01	-4.04-05	-2.02-02
11	.0465-.0215	3.10+07	2.42-01	2.46-01	-1.10-03	-2.35-02
12	.0215-.0100	1.00+07	2.67-01	2.82-01	-8.07-05	-1.94-02
13 - - 27	0.100 - -2.53-08	0 - - 0	Н Е В А Р Ь И Р О В А Д И С Ь			
Значение функции невязок $\mathcal{F}$			29.5	16.2	25.3	7.0

Примечание. Границы энергетических интервалов для групп 13 + 27 совпадают с границами стандартного 26- группового разбиения для групп 12 + 26 соответственно.

Табл. 3 . Групповые значения сечений взаимодействия, исходных и оптимальных "сечений выведения" для водорода и кислорода.

№ энерг. гр.	$\sum_{H, I}^j$ , см <sup>-1</sup>	$\sum_{\tau_{em H, I}}^{j (иск)}$ , см <sup>-1</sup>	$\sum_{\tau_{em H, I}}^{j (опт)}$ , см <sup>-1</sup>	$\sum_{O, II}^j$ , см <sup>-1</sup>	$\sum_{\tau_{em O, II}}^{j (иск)}$ , см <sup>-1</sup>	$\sum_{\tau_{em O, II}}^{j (опт)}$ , см <sup>-1</sup>
I	5.60-02	5.21-02	5.20-02	4.79-02	3.87-02	3.54-02
2	7.96-02	7.06-02	6.96-02	3.48-02	2.91-02	2.56-02
3	1.12-01	9.67-02	8.86-02	4.30-02	3.16-02	2.58-02
4	1.50-01	1.28-01	1.38-01	5.26-02	3.71-02	3.23-02
5	2.03-01	1.67-01	1.45-01	6.97-02	2.02-02	1.77-02
6	2.77-01	2.28-01	2.21-01	1.33-01	1.06-01	9.67-02
7	3.88-01	3.12-01	3.11-01	1.49-01	1.26-01	1.19-01
8	5.51-01	4.42-01	4.29-01	1.27-01	1.30-01	1.84-01
9	7.50-01	6.01-01	5.93-01	1.17-01	1.17-01	1.69-01
10	9.57-01	7.56-01	7.42-01	1.19-01	1.19-01	1.39-01
11	1.13+00	8.88-01	8.84-01	1.21-01	1.22-01	1.44-01
12	1.24+00	9.73-01	9.58-01	1.22-01	1.22-01	1.41-01
13 - - 27	ПАРАМЕТРЫ НЕ ВАРИРОВАЛИСЬ					

Табл. 4. Относительные невязки  $\Delta_{ik} = \frac{\psi_k^i - \psi_k^l}{\psi_k^l} \cdot 100$ ,  $i = 1, \dots, 27$   
 в узлах  $\tau_k$  для исходных и оптимальных наборов параметров  
 (водород,  $\rho_H = .067 \times 10^{24}$  яд./см<sup>3</sup>).

№ энерг гр.	$\tau_1 = 25\text{см}$		$\tau_2 = 50\text{см}$		$\tau_3 = 100\text{см}$		$\tau_4 = 150\text{см}$		$\tau_5 = 200\text{см}$	
	исх.	опт.	исх.	опт.	исх.	опт.	исх.	опт.	исх.	опт.
I	-30.	-31.	+1.5	+0.8	-0.1	+0.1	-1.1	0.0	+1.3	+3.3
2	-33.	-32.	-0.2	+4.2	-4.5	+3.5	-2.8	+7.7	+27.	+37.
3	-35.	-23.	-5.3	+26.	-20.	+17.	-19.	+6.8	+14.	+30.
4	-32.	-35.	-8.8	-2.9	-24.	+0.4	-18.	+2.4	+10.	+25.
5	-35.	-25.	-14.	+2.1	-26.	-0.9	-19.	+0.9	+4.7	+19.
6	-34.	-28.	-13.	+1.4	-24.	+1.3	-17.	+3.4	+5.9	+20.
7	-35.	-30.	-14.	0.0	-26.	-0.8	-19.	+1.4	+0.1	+14.
8	-36.	-30.	-14.	0.0	-26.	-1.4	-20.	+0.6	-6.5	+6.0
9	-36.	-30.	-14.	-0.1	-26.	-2.0	-20.	-0.2	-12.	-0.4
10	-36.	-30.	-13.	+0.2	-26.	-2.2	-20.	-0.5	-18.	-7.0
11	-36.	-31.	-13.	0.0	-27.	-3.0	-21.	-1.4	-24.	-14.
12	-36.	-30.	-13.	+0.7	-27.	-2.9	-21.	-1.4	-28.	-18.
13	-36.	-30.	-12.	+1.5	-27.	-2.6	-21.	-1.2	-31.	-21.
14	-36.	-30.	-12.	+1.8	-27.	-2.8	-21.	-1.5	-32.	-23.
15	-35.	-30.	-10.	+3.1	-26.	-2.2	-21.	-1.0	-33.	-24.
16	-34.	-29.	-9.4	+4.3	-26.	-1.6	-21.	-0.5	-34.	-25.
17	-34.	-29.	-8.8	+4.8	-26.	-1.7	-21.	-0.7	-35.	-26.
18	-34.	-28.	-7.6	+6.2	-26.	-1.0	-20.	-0.1	-35.	-26.
19	-33.	-28.	-6.5	+7.4	-25.	-0.5	-20.	+0.3	-35.	-26.
20	-33.	-28.	-6.0	+7.8	-25.	-0.7	-20.	0.0	-36.	-27.
21	-32.	-27.	-4.7	+9.3	-25.	0.0	-20.	+0.6	-36.	-26.
22	-31.	-26.	-3.4	+11.	-24.	+0.7	-19.	+1.2	-36.	-26.
23	-31.	-26.	-2.8	+11.	-24.	+0.6	-20.	+1.0	-36.	-27.
24	-30.	-25.	-1.4	+13.	-24.	+1.2	-19.	+1.5	-36.	-27.
25	-30.	-24.	-0.2	+14.	-23.	+1.8	-19.	+2.0	-36.	-27.
26	-31.	-25.	-0.9	+13.	-24.	+0.4	-20.	+0.4	-39.	-30.
27	-25.	-20.	+2.9	+17.	-26.	-2.5	-20.	+0.2	-59.	-52.

Табл. 5. Относительные невязки  $\Delta_{i,k} = \frac{\psi_k^i - \psi_k^i}{\psi_k^i} \cdot 100, i = 1, \dots, 27$   
 в узлах  $z_k$  для исходных и оптимальных наборов параметров  
 (кислород,  $\rho_0 = .0335 \times 10^{24}$  яд./см<sup>3</sup>).

№ энерг. гр.	$z_1 = 10\text{см}$	$z_2 = 50\text{см}$	$z_3 = 100\text{см}$	$z_4 = 150\text{см}$	$z_5 = 200\text{см}$
	исх. опт.	исх. опт.	исх. опт.	исх. опт.	исх. опт.
I	+8.4 -1.0	+30. +1.6	+16. 0.0	-4.7 -1.0	-16. +2.2
2	+6.2 -3.4	+37. -0.4	+37. +1.4	+20. -0.1	+9.4 +1.1
3	+1.6 -13.	+42. -6.0	+49. 0.0	+36. -2.5	+37. +3.8
4	-10. -22.	+26. -6.2	+35. +0.2	+30. -2.4	+6. +9.2
5	-2.0 -9.1	+8.6 -19.	+28. -8.0	+32. -3.2	+35. 0.0
6	-7.5 -20.	+6.1 -17.	+24. -9.8	+31. -3.8	+50. +11.
7	-9.0 -3.5	+8.3 -12.	+22. -11.	+31. -4.2	+53. +13.
8	-11. -1.0	+9.4 -7.4	+20. -12.	+30. -5.1	+51. +12.
9	-16. -0.2	+9.0 -2.5	+16. -12.	+28. -6.5	+52. +12.
10	-15. -3.7	+7.8 +0.1	+15. -9.3	+25. -7.4	+51. +12.
11	-13. -4.5	+6.1 +0.6	+14. -7.2	+23. -8.1	+49. +10.
12	-9.9 -4.4	+5.0 +0.6	+13. -5.2	+21. -7.9	+47. +9.3
13	-7.9 -4.9	+3.7 -0.2	+12. -4.3	+18. -8.0	+44. +7.9
14	-5.3 -3.9	+3.5 -0.4	+11. -3.0	+18. -7.0	+42. +8.2
15	-3.3 -3.2	+3.5 -0.4	+11. -2.0	+17. -5.9	+41. +8.8
16	-1.7 -2.6	+3.7 -0.4	+11. -1.2	+16. -4.7	+40. +9.7
17	-0.4 -2.0	+4.0 -0.3	+11. -0.6	+16. -3.6	+39. +11.
18	+0.8 -1.6	+4.4 -0.2	+11. 0.0	+16. -2.6	+39. +12.
19	+1.8 -1.2	+4.9 0.0	+11. +0.4	+16. -1.7	+38. +13.
20	+2.8 -0.7	+5.4 +0.2	+11. +0.8	+15. -0.9	+38. +14.
21	+3.6 -0.4	+5.9 +0.4	+11. +1.1	+15. -0.1	+38. +16.
22	+4.4 0.0	+6.4 +0.7	+11. +1.4	+15. +0.5	+38. +17.
23	+5.2 +0.4	+6.9 +1.0	+11. +1.7	+15. +1.1	+38. +18.
24	+5.9 +0.8	+7.5 +1.3	+11. +2.0	+15. +1.6	+37. +17.
25	+6.6 +1.2	+8.0 +1.6	+12. +2.4	+15. +2.1	+37. +19.
26	+7.2 +1.5	+8.5 +1.9	+12. +2.7	+15. +2.6	+37. +20.
27	+9.5 +1.6	+9.9 +1.7	+11. +1.9	+12. +1.8	+32. +20.

Табл. 6. Относительные поправки  $\Delta_{ik} = \frac{\psi_k^i - \psi_k^l}{\psi_k^l} \cdot 100$ ,  $i = 1, \dots, 27$   
 в узлах  $Z_k$  для исходного набора параметров и наборов,  
 полученных в результате решения оптимизационных задач  
 (вода,  $\rho_H = .067 \times 10^{24}$  яд./см<sup>3</sup>,  $\rho_0 = .0335 \times 10^{24}$  яд./см<sup>3</sup>)

№ энерг. гр.	$Z_1 = 25$ см		$Z_2 = 50$ см		$Z_3 = 100$ см		$Z_4 = 150$ см		$Z_5 = 200$ см	
	исх.	опт.	исх.	опт.	исх.	опт.	исх.	опт.	исх.	опт.
I	-31.	-38.	+2.5	0.0	-13.	+5.0	-16.	+22.	-13.	+48.
2	-26.	-34.	+14.	+12.	+1.0	+31.	+3.8	+72.	+19.	+134.
3	-27.	-40.	+6.3	+15.	-16.	+41.	-18.	+61.	+1.1	+118.
4	-27.	-35.	+5.7	+3.2	-17.	+27.	-16.	+57.	+4.0	+120.
5	-16.	-22.	+22.	+27.	-11.	+37.	-9.9	+66.	+13.	+136.
6	-20.	-26.	+22.	+24.	-10.	+37.	-9.5	+66.	+4.7	+119.
7	-20.	-27.	+23.	+24.	-10.	+37.	-9.8	+66.	+1.2	+111.
8	-22.	-29.	+21.	+22.	-12.	+33.	-12.	+61.	-6.6	+94.
9	-22.	-29.	+21.	+23.	-12.	+34.	-12.	+61.	-11.	+84.
10	-22.	-29.	+23.	+24.	-12.	+34.	-12.	+61.	-17.	+73.
II	-23.	-30.	+23.	+24.	-12.	+33.	-13.	+60.	-22.	+62.
12	-23.	-30.	+24.	+25.	-12.	+33.	-13.	+60.	-25.	+55.
13	-23.	-30.	+26.	+26.	-12.	+34.	-12.	+60.	-27.	+51.
14	-23.	-30.	+27.	+27.	-12.	+34.	-12.	+60.	-28.	+48.
15	-22.	-29.	+29.	+29.	-11.	+35.	-12.	+61.	-29.	+47.
16	-22.	-29.	+31.	+31.	-10.	+36.	-11.	+62.	-29.	+46.
17	-22.	-29.	+32.	+32.	-9.9	+36.	-11.	+62.	-30.	+45.
18	-21.	-28.	+34.	+34.	-9.0	+37.	-11.	+64.	-30.	+45.
19	-21.	-28.	+36.	+36.	-8.4	+38.	-10.	+64.	-30.	+45.
20	-21.	-28.	+38.	+37.	-8.3	+38.	-10.	+64.	-30.	+44.
21	-20.	-27.	+40.	+39.	-7.4	+39.	-9.4	+65.	-30.	+44.
22	-20.	-27.	+42.	+41.	-6.5	+40.	-8.8	+66.	-29.	+45.
23	-19.	-27.	+44.	+42.	-6.3	+40.	-8.8	+66.	-29.	+45.
24	-19.	-26.	+45.	+44.	-5.5	+41.	-8.1	+68.	-29.	+46.
25	-18.	-26.	+48.	+46.	-4.7	+42.	-7.6	+69.	-29.	+46.
26	-19.	-26.	+48.	+45.	-5.8	+41.	-8.6	+67.	-33.	+38.
27	-17.	-25.	+55.	+51.	-2.8	+44.	-16.	+53.	-42.	+18.

Табл. 7 . Значения функционалов потока в узлах  $z_k$  , полученные из расчётов по программам РСЗ-6 и НЕМПИ (со стандартным набором параметров) для шара из воды с радиусом  $R = 200$  см.

Размерность функционалов:  $[\Phi]$  ,  $[F]$  - нейтр./см<sup>2</sup> с ;  
 $[I]$  ,  $[J]$  - нейтр./см<sup>3</sup> с ;  $[P]$  ,  $[Q]$  - мкбар/см<sup>2</sup> с .

Функционал	$z_1 = 25$ см	$z_2 = 50$ см	$z_3 = 100$ см	$z_4 = 150$ см	$z_5 = 200$ см
$\Phi_k^{1-5}$ (РСЗ-6)	4.580+03	5.340+01	4.964-02	1.238-04	4.108-07
$F_k^{1-5}$ (НЕМПИ)	3.525+03	5.947+01	4.393-02	1.115-04	4.439-07
$\frac{F_k^{1-5} - \Phi_k^{1-5}}{\Phi_k^{1-5}} \cdot 100$	-23.0	+11.4	-11.5	-9.85	+8.06
$\Phi_k^{1-3}$ (РСЗ-6)	8.354+03	8.578+01	7.292-02	1.760-04	5.285-07
$F_k^{1-3}$ (НЕМПИ)	6.510+03	9.893+01	6.465-02	1.582-04	5.605-07
$\frac{F_k^{1-3} - \Phi_k^{1-3}}{\Phi_k^{1-3}} \cdot 100$	-22.1	+15.3	-11.3	-10.1	+6.05
$I_k$ (РСЗ-6)	1.119+03	7.621+00	4.938-03	1.196-05	5.294-09
$J_k$ (НЕМПИ)	9.294+02	1.175+01	4.794-03	1.009-05	3.485-09
$\frac{J_k - I_k}{I_k} \cdot 100$	-16.9	+54.1	-2.92	-15.6	-34.2
$P_k$ (РСЗ-6)	3.304+02	3.280+00	2.783-03	6.797-06	1.945-08
$Q_k$ (НЕМПИ)	2.600+02	3.913+00	2.495-03	6.104-06	2.055-08
$\frac{Q_k - P_k}{P_k} \cdot 100$	-21.3	+19.3	-10.3	-10.2	+6.17

## Л и т е р а т у р а

1. Дубинин А.А., Кураченко Д.А. Поиск оптимальных параметров полуэмпирической модели прохождения излучений в защите. Препринт ФЭИ № П198, Обнинск, 1981.
2. Кураченко Д.А., Панфилова Е.И. Оптимизация параметров полуэмпирической модели расчёта прохождения излучений. - В кн.: Численное решение уравнения переноса в одномерных задачах. Сборник научных трудов под ред. д.ф.-и.н. Т.А.Гермогеновой. М., ИМ АН СССР, 1981, с.154 - 164.
3. Р08-6 - система программ для решения уравнения переноса в одномерных геометриях. Версия 2. ИМ АН СССР, М., 1980. Авт.: А.М.Волженко, Е.И.Костин, Е.И.Панфилова, В.А.Уткин.
4. Дубинин А.А., Кураченко Д.А., Петров Э.Е. Быстродействующий комплекс программ оптимизации защиты. Препринт ФЭИ № 817, Обнинск, 1978.
5. Оптимизация характеристик защиты от излучений. - В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика и техника ядерных реакторов. Вып. 4 (13), М., НИИЭТ, 1980, с.56-62. Авт.: А.А.Дубинин, В.И.Журавлёв, Д.А.Кураченко, В.А.Уткин.
6. Кураченко Д.А. Комплекс программ оптимизации защиты с температурными ограничениями. - В кн.: Третья всесоюзная научная конференция по защите от конизирующих излучений ядернотехнических установок. Тезисы докладов. Томск, ИМ ТГУ, 1981, с.18.
7. Задача аппроксимации характеристик защиты от излучений путём определения набора оптимальных параметров полуэмпирических моделей. - Там же, с. 18. Авт.: А.А.Дубинин, Д.А.Кураченко, В.М.Левченко, А.А.Тучицолобов.
8. Хинмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М., МИР, 1976.
9. АРМКО-2F - версия системы константного обеспечения расчётов переноса высокоэнергетических нейтронов. Препринт ФЭИ № 904, Обнинск, 1979. Авт.: М.Б.Вирский, А.А.Дубинин, А.А.Клинецов и др.

Технический редактор Н.П.Герасимова

---

Подписано в печать 6/3-1982 г. Т-10156 формат 60 x 90 1/16  
Офсетная печать Усл.п.л. 1,4 Уч.-изд.л. 0,8 Тираж 90 экз.

Цена 12 коп. Издано 3624 634-1324

---

Отпечатано на ротавристе 95И, г.Обнинск

**12 коп.**

**Индекс 3624**

**Исследование параметров приближенной модели «ВЫВЕДЕНИЕ +  $P_1$ » в задачах переноса нейтронов в воде.  
ФЭИ-1324, 1982, 20.**