



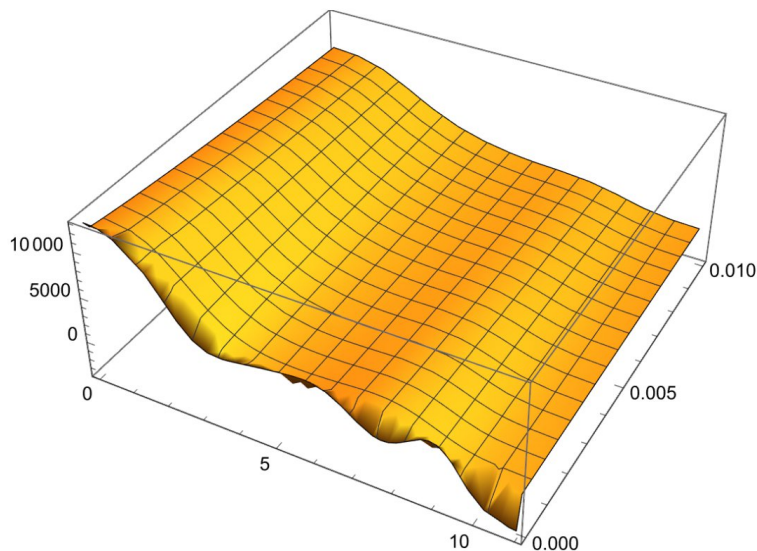
Восстановление спектров нейтронов по показаниям многошарового спектрометра Боннера методом разложения спектра по полиномам Лежандра с применением регуляризации Тихонова

К.А. Чижов

Лаборатория радиационной биологии

Объединённый институт ядерных исследований,

г. Дубна



Введение

- Высокоэнергетические ускорители с энергиями \sim ГэВ/нуклон требуют новых методов для оценки доз персонала.
- Радиационный контроль на ускорителях не может быть произведен только с помощью стандартных дозиметров и радиометров нейтронов, поскольку их рабочий диапазон ограничен максимальной энергией нейтронов около 10 МэВ.
- При этом нейтроны, с энергиями более 0,1 МэВ дают основной вклад в эффективную дозу за защитами ускорителей.



Виды ИДК облучения персонала нейтронами

Согласно МУ 2.6.5.052-2017 для контроля индивидуальной дозы профессионального облучения персонала нейтронами применяются:

- ИДК внешнего облучения с применением индивидуальных дозиметров, заключающийся в определении индивидуального эквивалента дозы облучения работника с помощью учетных (накопительных) дозиметров за определенный промежуток времени;
- ИДК по результатам ДКРМ, включающий измерение мощности амбиентного эквивалента дозы или интегральной амбиентной дозы (за период контроля) нейтронного излучения при контроле непрерывных полей излучения, а также времени пребывания работника в этих условиях; для импульсных и изменяющихся во времени полей излучения учитывается корреляция времени пребывания работника в этих условиях и характера измерения уровня излучения во времени;
- **ИДК по результатам ДКРМ, состоящего в определений энергетического распределения плотности потока нейтронов при контроле непрерывных полей излучения, а также времени пребывания работника в этих условиях.**

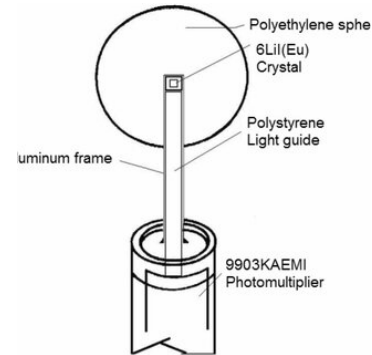
МУ - методические указания

ДКРМ- дозиметрический контроль рабочих мест

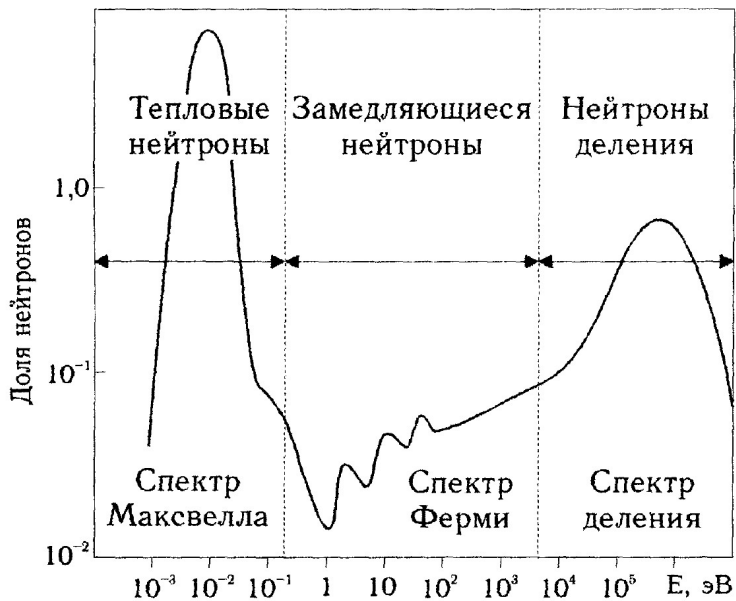
ИДК- индивидуальный дозиметрический контроль

Многошаровой спектрометр Боннера

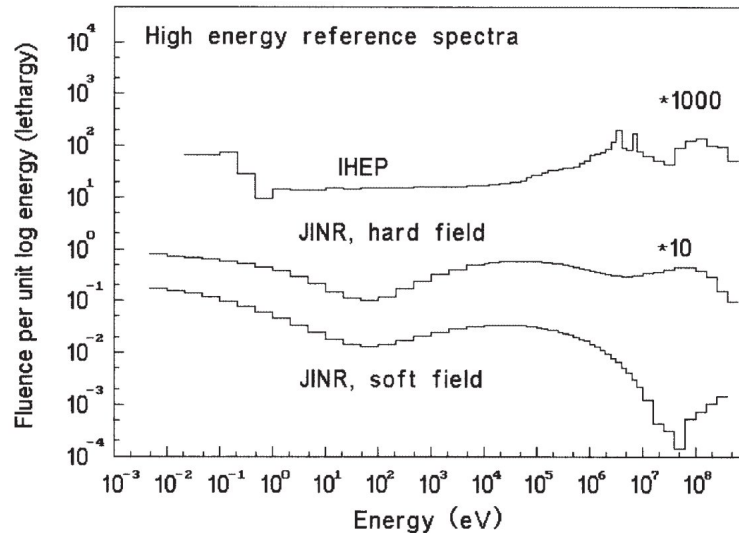
- Для измерения плотности потока нейтронов применяется многошаровой спектрометр Боннера.
- Метод измерения основан на замедлении быстрых нейтронов в полиэтиленовых шарах-замедлителях различного диаметра.
- Для обнаружения тепловых нейтронов используются различные детекторы, например, неорганические сцинтилляторы, такие как ${}^6\text{LiI}$.



Типовые спектры нейтронов



для реакторов



для ускорителей*

*Compendium of Neutron Spectra and Detector Response for Radiation Protection Purpose: Technical Report Series. Vienna: IAEA, 2001. No. 403. P. 154-163

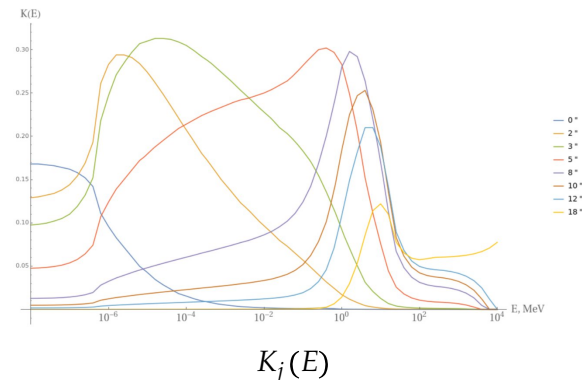
Восстановление спектра

Чтобы по результатам нескольких измерений восстановить полный спектр $\varphi(E)$, необходимо решить систему интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода:

$$Q_j = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} K_j(E) \cdot \varphi(E) dE, \quad j = 1, \dots, M,$$

где Q_j – показание спектрометра Боннера для j -го шара; $K_j(E)$ – ядро j -го уравнения, являющееся функцией чувствительности (отклика) детектора на нейтроны различных энергий; M – количество используемых для измерения спектра шаров-замедлителей. Пределы интегрирования E_{\min} и E_{\max} определяются областью определения спектра (E) и используемого для измерений набора детекторов.

Такая задача является некорректно поставленной.



Функции чувствительности (ФЧ)* для шаров диаметром 0", 2", 3", 5", 8", 10", 12", 18".

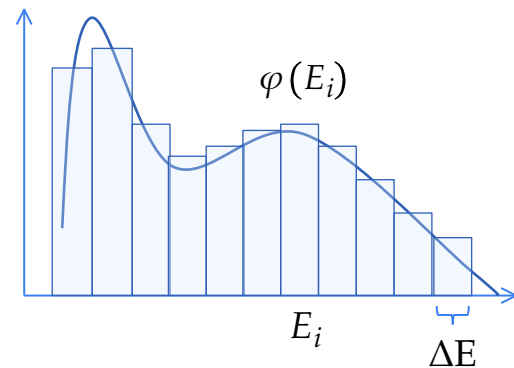
*[Awschalom](#), Miguel, and Robert S. [Sanna](#). Applications of Bonner sphere detectors in neutron field dosimetry. No. [FNAL-TM--1209](#). Fermi National Accelerator Lab., 1983.

Применяемые методы

- Восстановление спектра через численное решение интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода с разбиением $\varphi(E)$ по дискретной сетке и применением регуляризации Тихонова:

$$Q_j = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} K_j(E) \cdot \varphi(E) dE \approx \sum_{i=1}^N R_{ji} \Phi_i \Delta E, \quad j = 1, \dots, M,$$

где $\Phi_i \equiv \varphi(E_i)$ – вектор, являющийся дискретным аналогом непрерывной величины $\varphi(E)$ – спектра нейтронов (спектр в точках $E = E_i, i = 1, \dots, N$); R_{ji} – матрица, получающаяся из ядра интегрального уравнения при переходе к численному интегрированию.

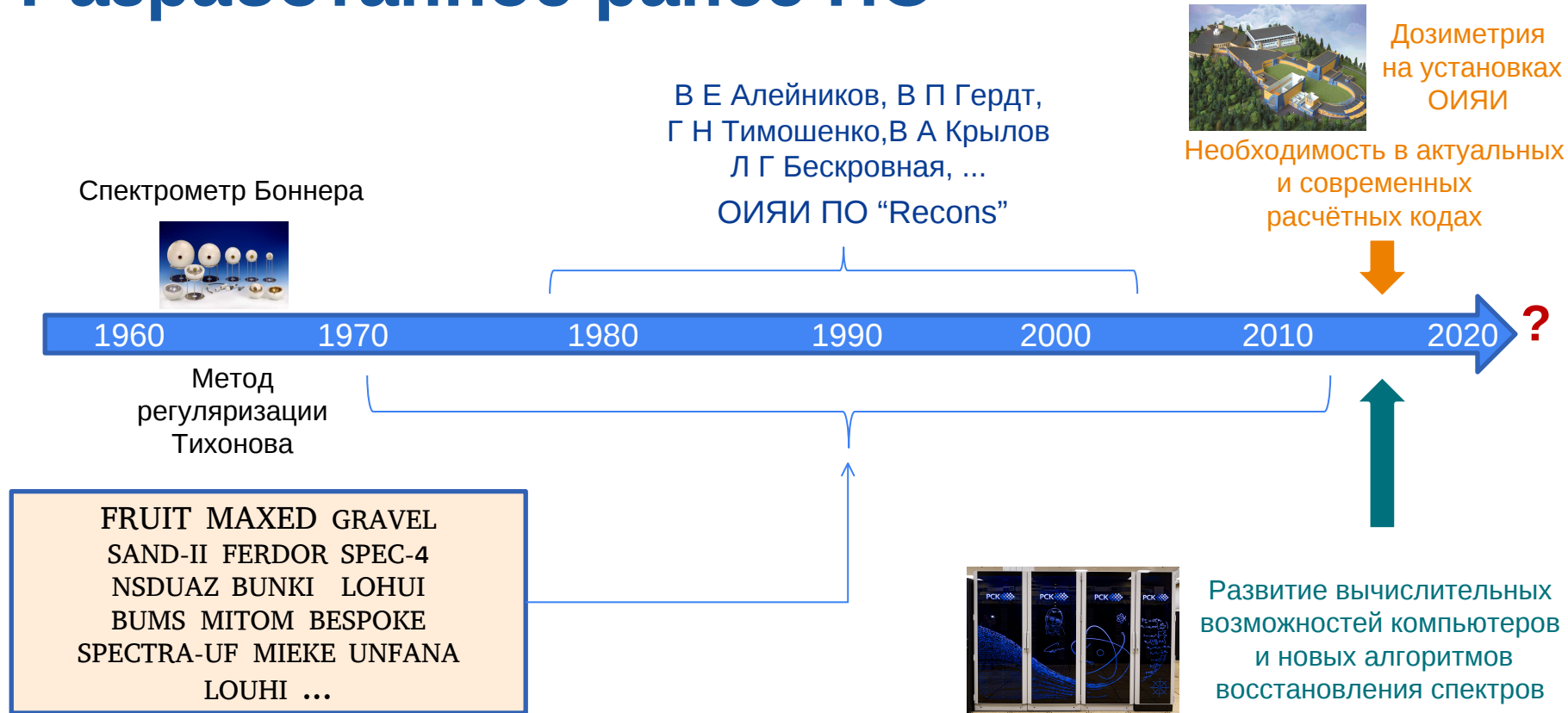


- Представление спектра в виде линейной комбинации L пробных функций, когда коэффициенты разложения C_i находятся по формуле:

$$\varphi(E) = \sum_{i=1}^L C_i \cdot F_i(E) \rightarrow Q_j = \sum_{i=1}^L A_{ji} \cdot C_i, \quad A_{ji} = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} K_j(E) \cdot F_i(E) dE.$$

- и другие методы (Brooks F. D., Klein H. Neutron spectrometry – historical review and present status, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 476, 2002, p.111).

Разработанное ранее ПО

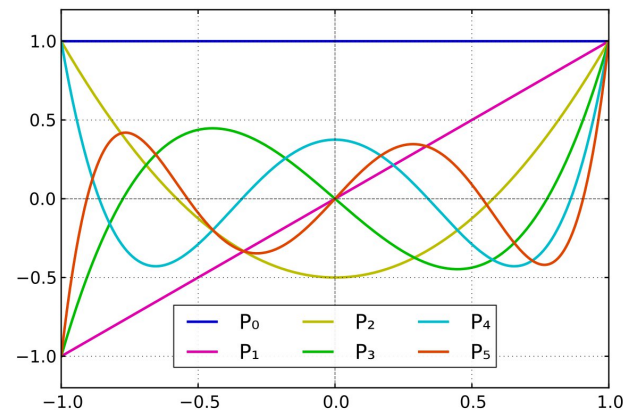


Метод функционального разложения плотности потока по полиномам Лежандра с регуляризацией Тихонова

Нами предложен метод разложения плотности потока нейтронов по полиномам Лежандра:

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \cdot \frac{d^n}{dx^n} (x^2 - 1)^n,$$

где P_n определены на интервале $[-1, 1]$, где n – номер полинома.



Метод разложения функции плотности потока нейтронов по полиномам Лежандра с применением регуляризации Тихонова

$$Q_j = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} K_j(E) \cdot \varphi(E) dE, \quad j = 1, \dots, M,$$

Широкий диапазон по энергии от 10^{-8} до 10^3 МэВ, переходим к интегрированию по логарифму энергии $u(E) = \lg(E/E_{\min})$:

$$Q_j = \ln 10 \cdot \int_0^{l_E} K_j(u) \cdot \varphi(u) E(u) du, \quad j = 1, \dots, M, \quad l_E = \lg(E_{\max}/E_{\min}).$$

В нашем методе задача восстановления спектра сводится к поиску коэффициентов разложения по полиномам Лежандра C_i :

$$\varphi(u) E(u) = \sum_{i=1}^N C_i P_{i-1}(2u/l_E - 1), \quad u \in [0, l_E].$$

Из системы интегральных уравнений получаем систему линейных алгебраических уравнений, представленную в матричной форме как

$$AC = Q$$

где элементы матрицы A определяются как $A_{ji} = \ln 10 \cdot \int_0^{l_E} K_j(u) \cdot P_{i-1}(2u/l_E - 1) du$.

Метод разложения функции плотности потока нейтронов по полиномам Лежандра с применением регуляризации Тихонова

Используя схему построения регуляризирующего алгоритма А.Н.Тихонова, из условия минимума стабилизирующего функционала

$$M^\alpha [C] = \|AC - Q\|^2 + \alpha \int_0^{l_E} \left\{ [\varphi(u) E(u)]^2 + \left(\frac{d}{du} [\varphi(u) E(u)] \right)^2 \right\} du =$$

$$= \sum_{j=1}^M \left(\sum_{i=1}^N A_{ji} C_i - Q_j \right)^2 + \alpha \sum_{i,k=1}^N C_i C_k \int_0^{l_E} [P_i(u) P_k(u) + P'_i(u) P'_k(u)] du$$

приходим к регуляризованной системе линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов разложения C^α спектра нейтронов:

$$(A^T A + \alpha B) C^\alpha = A^T Q,$$

$$B_{ik} = \left[\frac{l_E}{2i-1} + \frac{2i(i-1)}{l_E} \right] \delta_{ik} + \frac{2}{l_E} \sum_{j=1}^{[N/2]-1} [i(i-1) \delta_{k-i,2j} + k(k-1) \delta_{i-k,2j}]$$

$\alpha > 0$ – параметр регуляризации, $[N/2]$ – целая часть числа $N/2$, δ_{ij} – символ Кронекера.

$$\begin{pmatrix} l_E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l_E}{3} + \frac{4}{l_E} & 0 & \frac{4}{l_E} & 0 & \frac{4}{l_E} \\ 0 & 0 & \frac{l_E}{5} + \frac{12}{l_E} & 0 & \frac{12}{l_E} & 0 \\ 0 & \frac{4}{l_E} & 0 & \frac{l_E}{7} + \frac{24}{l_E} & 0 & \frac{24}{l_E} \\ 0 & 0 & \frac{12}{l_E} & 0 & \frac{l_E}{9} + \frac{40}{l_E} & 0 \\ 0 & \frac{4}{l_E} & 0 & \frac{24}{l_E} & 0 & \frac{l_E}{11} + \frac{60}{l_E} \end{pmatrix}$$

Графическое представление коэффициентов (симметричной)

матрицы $B_{N \times N}$

Выбор параметра регуляризации

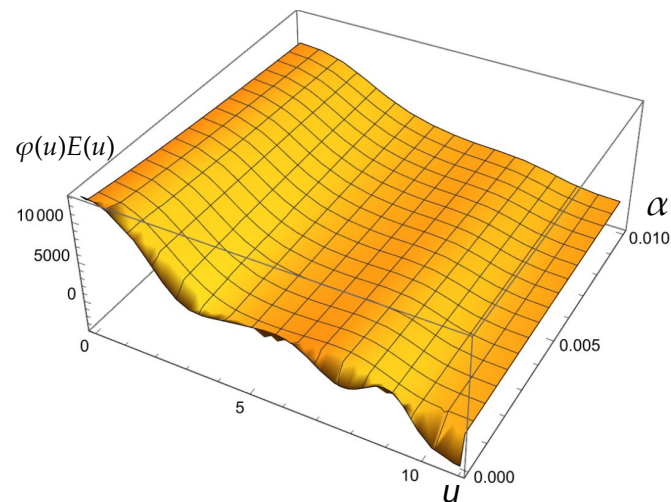
Параметр регуляризации α находится в соответствии с принципом обобщённой невязки из уравнения

$$\rho(\alpha) = \|AC^\alpha - Q\|^2 - \delta Q^2 - \mu^2(A, Q) = 0,$$

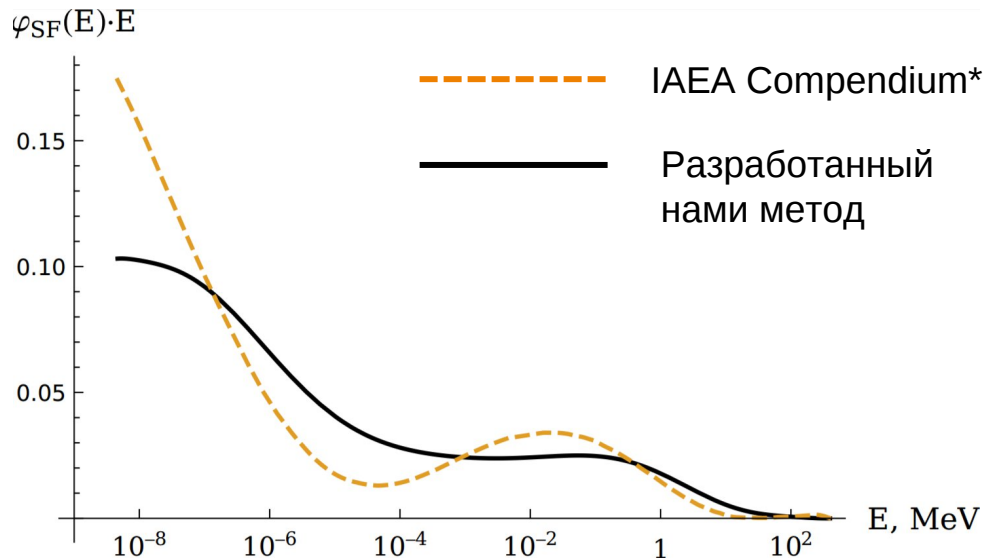
где δQ – погрешность детектора, $\mu(A, Q) = \inf \|AC - Q\|$ – мера несовместимости системы уравнений с учетом априорных ограничений на свойства спектра нейтронов: $\varphi(u)E(u)$ – неотрицательна, а матрица $A^T A + \alpha B$ является хорошо обусловленной.

При этом, если выполнено условие

$$\|Q\|^2 \geq \delta Q^2 + \mu^2(A, Q),$$



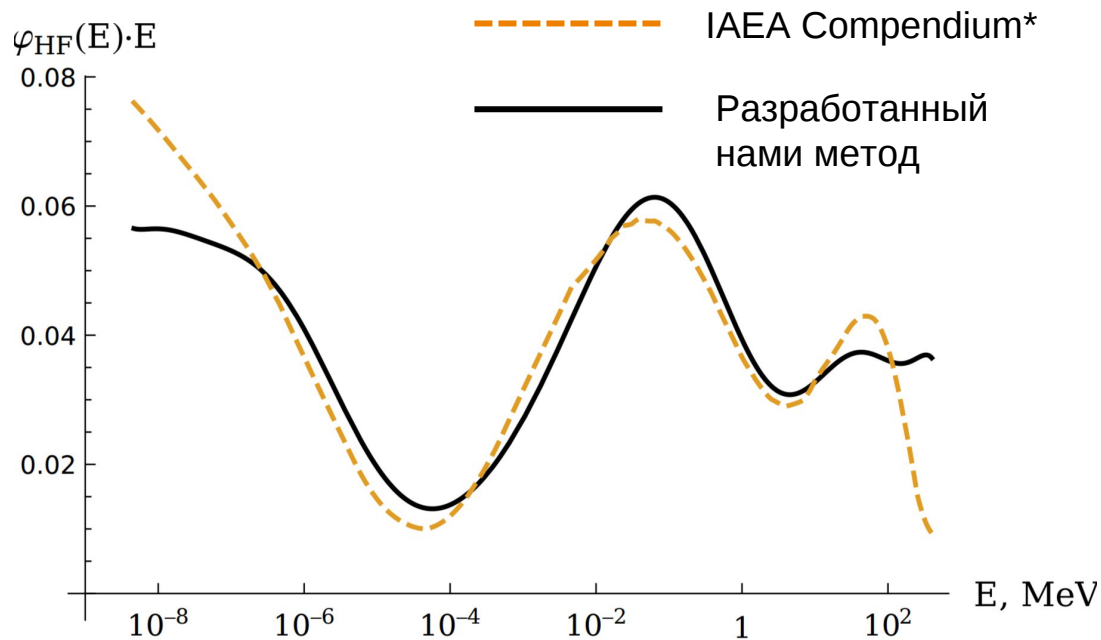
Результаты для “мягкого” опорного поля



"Мягкое" опорное поле нейтронов на фазотроне в лабиринте тоннеля в цокольном этаже под главным залом ускорителя

*Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes, Technical Reports Series,403,2001, ISBN 92-0-102201-8,INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: Vienna.

Результаты для “жесткого” опорного поля



“Жёсткое” опорное поле фазотрона (поле за 2-х метровой бетонной защитой фазотрона). Поле формировалось нейтронами утечки из защиты, облучаемой вторичным излучением из камеры установки.

*Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes, Technical Reports Series,403,2001, ISBN 92-0-102201-8,INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: Vienna.

Преимущества метода

1. Решение даёт коэффициенты разложения C_i по полиномам Лежандра а не прямой подбор значений функции $\varphi(E)E$, меньшая вероятность пропуска пиков.
2. Быстрая скорость работы алгоритма.

Недостатки

1. Неопределённость восстановления на краях выше, чем в центральной части спектра
2. Метод подходит для восстановления спектров в стационарных полях.
3. Ограниченный набор шаров спектрометра Боннера.
4. Достоверность восстанавливаемых нейтронных спектров существенно зависит от качества ФЧ.

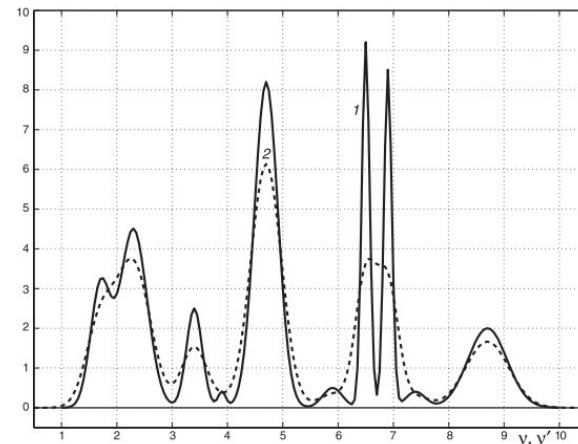


Рис. 3.7. Пример Q — модельный:
1 — точный спектр $z(\nu)$, 2 — измеренный спектр $u(\nu)$

Сизиков В.С. "Обратные прикладные задачи в Matlab"

Оценка дозы

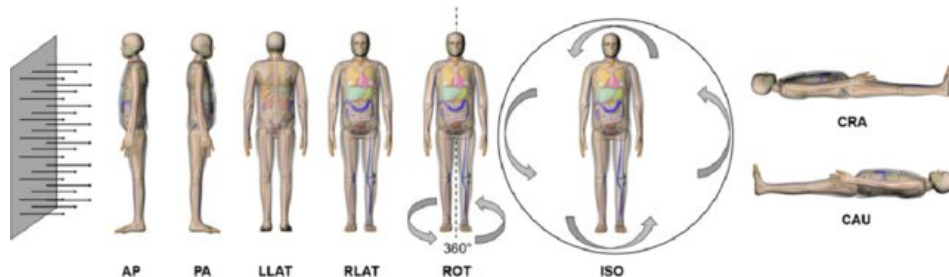
Многошаровый спектрометр Боннера применяется для измерения спектров нейтронов в стационарных полях, для оценки хронического облучения персонала.

$$\dot{H} = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \varphi(E) \cdot h(E) dE \quad \longrightarrow \quad \dot{H} = \ln(10) \int_0^{l_E} \varphi(u) \cdot E \cdot h(E) du$$

\dot{H} - мощность дозы ($\dot{E}_{\text{eff_AP}}$, $\dot{E}_{\text{eff_ISO}}$, $\dot{H}^*(10)$, $\dot{H}_p(10,0^\circ)$)

$h(E)$ - соответствующий конверсионный коэффициент [$\text{pSv} \cdot \text{cm}^2$] для моноэнергетических частиц в различных геометриях облучения (до 20 МэВ - НРБ 99/2009; до 10 ГэВ - ICRP116),

Для эффективной дозы при консервативной оценке мы выбрали коэффициенты для направленного облучения со стороны груди (ПЗ), а также рассчитали для изотропного облучения (ИЗО).



Оценка дозы

Точка измерений	\dot{E}_{eff} ИЗО, пЗв/с	\dot{E}_{eff} ПЗ, пЗв/с	$\dot{H}^*(10)$, пЗв/с	$\dot{H}_p(10,0^\circ)$, пЗв/с
<u>Разработанный нами метод,</u> <u>Мягкое опорное поле</u>	13.7	26.2	36.5	37.2
<u>Разработанный нами метод,</u> <u>Жесткое опорное поле</u>	79	110	113	90.0
<u>Компендиум МАГАТЭ,</u> <u>Мягкое опорное поле</u>	9.7	19.7	31.6	32.8
<u>Компендиум МАГАТЭ,</u> <u>Жесткое опорное поле</u>	72.2	104.0	111.6	86.6

Для “жесткого” опорного поля годовая доза от нейтронов для персонала группы А при условии работы 1700 часов в год составит 0.67 мЗв/год. Во всех рассматриваемых случаях оценка дозы не превышает пределы допустимой дозы.

Исходя из того, что нейтроны для рассматриваемого случая вносят основной вклад в дозу, то суммарная годовая дозовая нагрузка от внешнего облучения на персонал не превысит пределы допустимой дозы по НРБ-99/2009.

Выводы

1. Разработан метод восстановления энергетических спектров плотности потока нейтронов методом разложения спектра по полиномам Лежандра с применением регуляризации Тихонова.
2. Разработанный метод позволил восстановить спектры "мягкого" и "жесткого" опорных полей на фазотроне ОИЯИ.
3. Оценённая по восстановленному спектру годовая эффективная доза для передне-задней и изотропной геометрий облучения не превышает пределы допустимой дозы по НРБ – 99/2009.

Спасибо за внимание!

kchizhov@jinr.ru

Другие наши статьи с применением методов решения обратных задач в области радиационной безопасности и радиобиологии:

1. Chizhov K *et al.* (2023) "Further development and application of a method for assessing radionuclide surface activity distribution and source location based on measurements of ambient dose equivalent rate", *Journal of Radiological Protection*, **43(4)**, 041505, **DOI** 10.1088/1361-6498/ad005b
2. Chizhov K *et al.* (2023) "Further development and application of a method for assessing radionuclide surface activity distribution and source location based on measurements of ambient dose equivalent rate. Examples for Andreeva Bay, Chernobyl NPP and Istiklol", *Journal of Radiological Protection*, **43(4)**, 041506, **DOI** 10.1088/1361-6498/ad005c
3. Chizhov K *et al.* (2019). The development and application of a method for assessing radionuclide surface contamination density based on measurements of ambient dose equivalent rate, *Journal of Radiological Protection*, 39(2), 354, **DOI** 10.1088/1361-6498/ab02aa