



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 99–25

ОРИ

А.Г. Алексеев¹, Н.Н. Бараненков, В.П. Крючков,
Ю.Д. Мамонтов²

**МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
С ПОМОЩЬЮ ПАССИВНОГО МОНИТОРА
НА ОСНОВЕ ТЛД**

¹E-mail:alexeev@m10.ihep.su,

²Калининская АЭС, г.Удомля

Протвино 1999

Аннотация

Алексеев А.Г. и др. Метод измерения характеристик нейтронного излучения с помощью пассивного монитора на основе ТЛД: Препринт ИФВЭ 99–25. – Протвино, 1999. – 13 с., 10 рис., 3 табл., библиогр.: 16.

Рассматривается метод оценки угловых и спектральных характеристик нейтронного излучения. В качестве детекторов используются пары ТЛД типа Li^6F и Li^7F , которые помещаются на разной глубине шарового полиэтиленового замедлителя. Расчет функций чувствительности выполнен по программе MCNP-4a. Представлены результаты измерений в поле излучения опорных полей нейтронного излучения в ИФВЭ на ускорителе У-70, в гермообъеме 1-го блока Калининской АЭС. Рассматривается вопрос оценки градуировочных коэффициентов для индивидуального альбедного нейтронного дозиметра по результатам измерений с помощью пассивного радиационного монитора.

Abstract

Alexeev A.G. et. al. Measurement Method of Neutron Field Characteristics with the Passive Radiation Monitor Based on TLD: IHEP Preprint 99–25. – Protvino, 1999. – p. 13, figs. 10, tables 3, refs.: 16.

The method to measure neutron angle intensity and neutron spectra is presented. The TLD Li^6F and Li^7F dosimeters are used. They are located at different depths of a spherical polyethylene moderator. The calculation of neutron energy response was carried out with a MCNP4a code. The measurement results for the IHEP reference fields, U-70 accelerator fields and at unit 1 of Kalinin NPP are presented. The use of measurement results with this passive radiation monitor to estimate systematic uncertainty of albedo personal dosimeter in real neutron fields is discussed.

Введение

Характеристики нейтронного излучения, такие как спектральный состав и угловое распределение, являются необходимой информацией при интерпретации показаний дозиметров. Такая информация позволяет существенно уменьшить погрешность измерения эквивалентной дозы нейтронов. При проведении индивидуального радиационного контроля погрешность измерения индивидуальной эквивалентной дозы нейтронов довольно часто трудно оценить. В то же время информация о характеристиках поля нейтронов в местах пребывания персонала позволяет свести эту погрешность к приемлемой величине. В особой мере это касается случая, когда используется индивидуальный дозиметр нейтронов альбедного типа. Дозиметр данного типа обладает большой дополнительной погрешностью за счет энергетической зависимости чувствительности.

Традиционная градуировка в единицах эквивалентной дозы нейтронов в поле излучения стандартных радионуклидных источников нейтронов типа Pu-Be или ^{252}Cf , как правило, может приводить к погрешности измерения индивидуальной эквивалентной дозы нейтронов от 200 до 2000%. Для решения этой проблемы традиционно предлагают два альтернативных способа:

1. Непосредственная градуировка индивидуальных дозиметров на рабочих местах [1], для чего необходимо иметь только дозиметрическое сопровождение, позволяющее корректно выполнить эту процедуру. Спектрометрия нейтронов в данном случае необязательна, хотя дает дополнительную информацию.
2. Градуировка индивидуальных дозиметров в опорных полях нейтронов. Спектры образцовых полей имеют такие характеристики, что создавая суперпозицию из них, облучая дозиметр последовательно в каждом, можно моделировать реальное поле излучения, в котором используется дозиметр [2]. Градуировочный коэффициент для реального поля рассчитывается как суперпозиция коэффициентов по набору опорных полей. Для данного способа необходимо проводить достаточно корректное измерение спектров нейтронов в местах облучения персонала.

В нашем случае при выполнении работы по разработке индивидуального нейтронного дозиметра альбедного типа был выбран первый путь.

Существуют множество методов и детекторов для измерения спектров нейтронов [3]. Каждый обладает своими преимуществами и недостатками. Наиболее широкое распространение получил метод многошарового спектрометра, основанный на регистрации термализованных нейтронов в центре сферического водородосодержащего замедлителя. При этом используется набор из 5–6 сфер различного диаметра.

В данной работе рассматривается метод, основанный на том же принципе, но использующий только один замедлитель. Идея реализовать данный способ высказывалась ранее¹. В качестве детекторов тепловых нейтронов брались термолюминесцентные детекторы (ТЛД) типа LiF, обогащенные изотопом Li⁶. ТЛД располагались на разной глубине полиэтиленового замедлителя (пассивного радиационного монитора), что позволило реализовать принцип измерения, который лежит в основе многосферного спектрометра.

Метод был апробирован в радиационном контроле на ускорителе ИФВЭ. Одновременно он был использован для выполнения работ, связанных с испытаниями и тестированием индивидуального нейтронного дозиметра в реальных полях на АЭС с ВВЭР. При проведении измерений шаровой замедлитель пассивного радиационного монитора (ПРМ) служил одновременно фантомом, на котором облучались индивидуальные альбедные дозиметры нейтронов ДВН-А-1. Выполнение одновременного облучения ПРМ и ДВН-А-1 позволило получить градуировочные коэффициенты, учитывающие разницу в чувствительности ДВН-А-1 для поля эталонного нейтронного источника (обычно радионуклидные источники Pu-Be или ²⁵²Cf) и реального поля ядерно-физической установки (например, в гермообъеме АЭС с ВВЭР) и с учетом углового распределения нейтронов в месте облучения.

1. Метод измерения

1.1. Расчет функций чувствительности

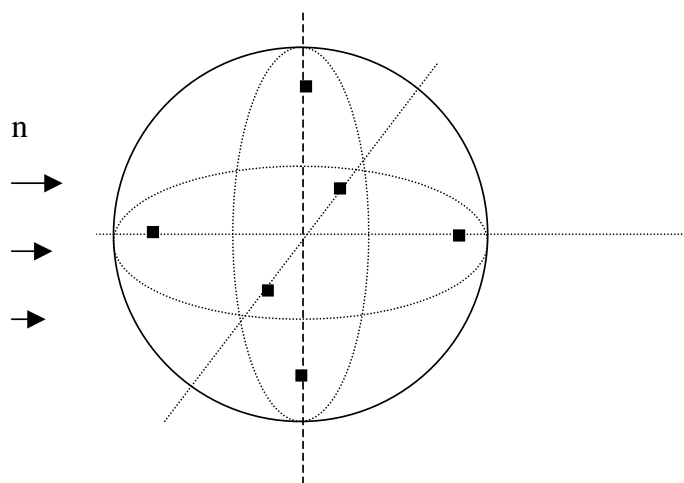


Рис. 1. Геометрия расчета функции чувствительности ТЛД в замедлителе.

Пассивный радиационный монитор представляет собой полиэтиленовый шаровой замедлитель диаметром 24.7 см. С внешней стороны замедлитель покрыт слоем кадмия (1 мм) для уменьшения чувствительности к тепловым нейтронам. В шести перпендикулярных направлениях (от центра шара) по осям шара на разной глубине от поверхности (0.1; 1.; 3.; 6.; 9 см) и в центре (всего 31 точка измерения в замедлителе) помещаются (рис. 1) ТЛД, чувствительные к тепловым нейтронам.

Расчету чувствительности детекторов тепловых нейтронов в шаровых полиэтиленовых замедлителях (так называемый спектрометр Боннера, или многосферной спектрометр) посвящено много работ. Однако спектрометр Боннера, обладающий сферической симметрией, является детектором с изотропной чувствительностью. В нашем случае чувствительность каждого детектора существенно зависит от углового распределения нейтронов.

¹Головачик В.Т., Санников А.В., Харлампиев С.А. — Частное сообщение, ИФВЭ, 1987 г.

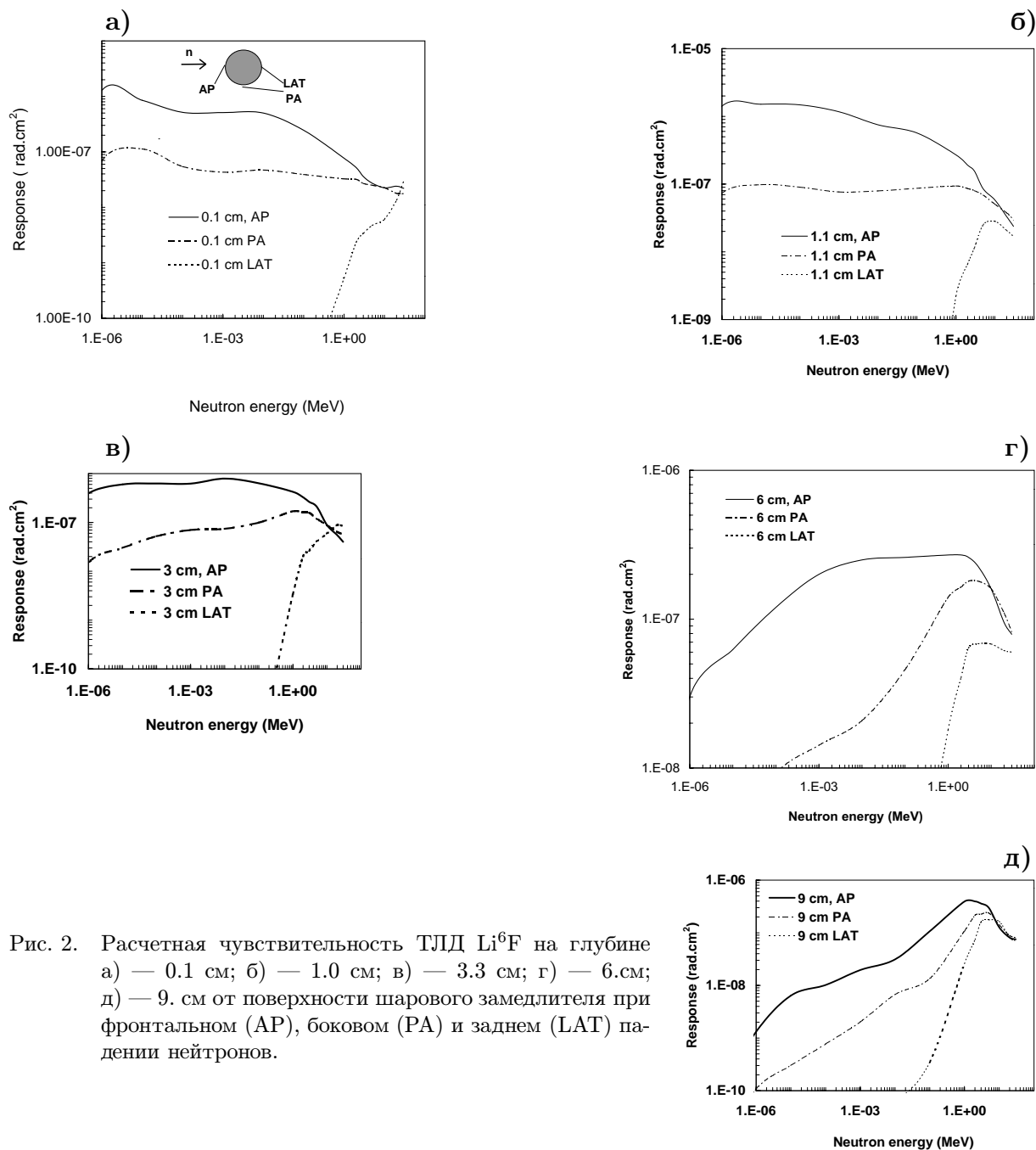


Рис. 2. Расчетная чувствительность ТЛД Li^6F на глубине а) — 0.1 см; б) — 1.0 см; в) — 3.3 см; г) — 6.0 см; д) — 9.0 см от поверхности шарового замедлителя при фронтальном (AP), боковом (PA) и заднем (LAT) падении нейтронов.

Для расчета функций чувствительности использовалась монте-карловская программа MCNP-4a [4] с библиотекой сечений ENDF/B(V). Для расчета чувствительности ТЛД Li^6F к нейтронам были взяты данные по керма-фактору [5]. На рис. 2а, б, в, г, д представлены расчетные зависимости чувствительности детекторов Li^6F в диапазоне энергий нейтронов от 1 эВ до 20 МэВ на разных глубинах замедлителя и в зависимости от угла падения нейтронов. Для энергии нейтронов ниже 1–2 МэВ чувствительность сильно зависит от угла падений нейтронов и различается больше чем на порядок для фронтального и бокового падения нейтронов. Для нейтронов с энергией выше 5 МэВ чувствительность

при боковом падении сравнима и может быть даже выше, чем при фронтальном падении. При энергии нейтронов порядка 20 МэВ и выше чувствительность при заднем падении нейтронов сравнима или выше, чем при фронтальном. Таким образом, метод имеет существенное ограничение в верхнем диапазоне энергии для оценки углового распределения поля нейтронов.

1.2. Градуировка

Для калибровки и тестирования расчетных значений функций чувствительности ТЛД в замедлителе использовались измерения в опорных нейтронных полях ИФВЭ [6], [8]:

- радионуклидного источника Pu-Be;
- радионуклидного источника ^{252}Cf ;
- модифицированного спектра радионуклидного источника ^{252}Cf , помещенного в сферический стальной замедлитель диаметром 30 см (Cf+Fe);
- модифицированного утечки радионуклидного источника ^{252}Cf , помещенного в сферический полиэтиленовый замедлитель диаметром 30 см (Cf+CH₂).

Геометрия расположения источника и детектора воспроизводилась строго в соответствии с условиями аттестации опорных полей [6].

В работе использовались ТЛД типа ДТГ-4, одни с обогащением по изотопу Li⁶ и другие — по Li⁷. Измерения с ТЛД выполнялись на ТЛД-считывателе ДТУ-01. Градуировка ТЛД проводилась на образцовой установке в поле излучения ^{137}Cs -источника. Чувствительность Li⁶F к тепловым нейтронам определялась как разность измеренной дозы между ТЛД Li⁶F и Li⁷F.

Спектр Pu-Be-источника брался в качестве градуировочного. Градуировка состояла в том, что определялись поправочные коэффициенты, полученные следующим образом:

$$f_d = D_n \cdot \left(\int R_n(E_n, d) \cdot F(E_n) dE_n \right)^{-1}, \quad (1)$$

где D_n — измеренная величина чувствительности Li⁶F на глубине d ; $R_n(E_n, d)$ — расчетная чувствительность для энергии нейтронов E_n на глубине d ; $F(E_n)$ — спектр нейтронов опорного поля.

Спектр нейтронов опорного поля является экспертной оценкой на основе данных измерений, полученных с помощью детекторов с изотропной чувствительностью. Следовательно, без учета углового распределения использование этих данных для градуировки детектора с неизотропной чувствительностью не всегда корректно. Поэтому для градуировки, а затем для восстановления спектра использовались два набора данных:

- На глубинах 0.1; 1.; 3.; 6.; 9.; 12.7 см в прямом направлении на прямой, соединяющей центры источников и замедлитель, т.е. выбрано направление, где было максимальное значение чувствительности на всех глубинах, кроме 0.1 см (вариант А).
- Использовались данные на тех же глубинах, только усредненные по всем 6 направлениям (в этом случае поле облучения является изотропным) (вариант I).

На рис. 3 и в табл. 1. приведены данные по чувствительности Li⁶F к нейтронам, полученные после проведения градуировки и используемые в дальнейшем в процедуре восстановления спектров нейтронов.

Таблица 1. Чувствительность ТЛД Li^6F в замедлителе (10^{-6} сГр/(н.см $^{-2}$)). δE — граница энергетической группы; d — глубина (от поверхности) расположения ТЛД (см).

δE	0.1 cm	1.0 cm	3.0 cm	6.0 cm	9.0 cm	12.7 cm
1.49E+07	8.56E-04	6.70E-03	1.40E-02	2.86E-02	2.75E-02	3.05E-02
9.04E+06	1.51E-03	9.88E-03	2.15E-02	4.15E-02	4.46E-02	3.75E-02
5.48E+06	2.57E-03	1.31E-02	3.37E-02	5.97E-02	6.73E-02	4.31E-02
3.32E+06	5.07E-03	1.67E-02	4.66E-02	6.91E-02	8.07E-02	4.44E-02
2.01E+06	6.44E-03	2.01E-02	5.90E-02	7.05E-02	8.98E-02	4.32E-02
1.22E+06	6.93E-03	2.41E-02	7.04E-02	6.89E-02	8.68E-02	3.52E-02
7.42E+05	8.66E-03	2.94E-02	7.57E-02	6.82E-02	6.81E-02	1.76E-02
4.50E+05	1.11E-02	3.62E-02	7.98E-02	6.76E-02	5.09E-02	7.71E-03
2.73E+05	1.43E-02	4.45E-02	8.42E-02	6.71E-02	3.80E-02	3.37E-03
1.64E+05	1.89E-02	5.54E-02	8.91E-02	6.65E-02	2.75E-02	1.41E-03
8.65E+04	2.64E-02	6.43E-02	9.44E-02	6.63E-02	1.72E-02	7.18E-04
2.47E+04	3.73E-02	7.11E-02	9.97E-02	6.61E-02	9.07E-03	4.59E-04
7.10E+03	4.31E-02	7.95E-02	1.02E-01	6.52E-02	5.93E-03	2.68E-04
2.03E+03	4.36E-02	8.96E-02	1.02E-01	6.07E-02	4.55E-03	1.46E-04
5.83E+02	4.38E-02	1.01E-01	1.00E-01	4.54E-02	3.28E-03	8.78E-05
1.67E+02	4.65E-02	1.15E-01	9.72E-02	3.07E-02	2.34E-03	5.01E-05
4.78E+01	5.87E-02	1.27E-01	9.57E-02	2.13E-02	1.78E-03	1.71E-05
1.37E+01	5.73E-02	1.36E-01	9.25E-02	1.48E-02	1.21E-03	5.65E-06
3.92E+00	5.98E-02	1.39E-01	8.55E-02	1.00E-02	5.52E-04	3.16E-06
1.12E+00	2.95E-02	1.41E-01	7.90E-02	5.07E-03	1.28E-04	1.07E-06

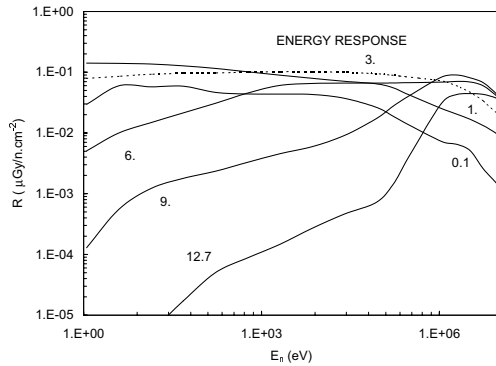


Рис. 3. Энергетическая зависимость чувствительности ТЛД Li^6 к нейтронам. Цифрами у кривых обозначена глубина расположения ТЛД в замедлителе.

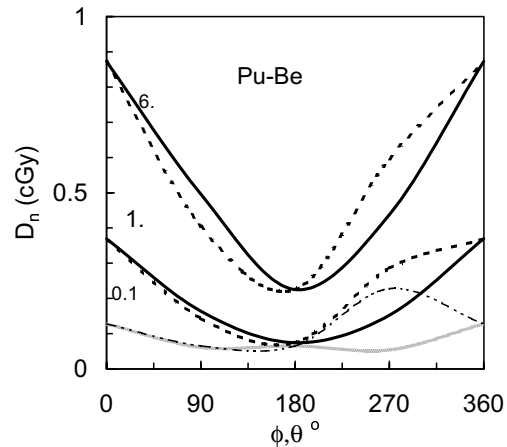


Рис. 4. Угловое распределение чувствительности ТЛД Li^6F к нейтронам на глубинах 0.1; 1.0 и 6.0 см. в поле излучения Pu-Be. Пунктирная линия — вертикальная плоскость, сплошная — горизонтальная.

1.3. Анализ углового распределения

Анализ углового распределения чувствительности ТЛД Li^6F в замедлителе сводится к следующему:

- выбор направления с максимальным значением чувствительности (вариант А);

- расчет средних значений по всем направлениям (вариант I);
- расчет коэффициента изотропности I ($I = \frac{D_I}{D_A}$, где D_I и D_A — чувствительность на глубине 6 см). В дальнейшем коэффициент I используется для расчета градуировочного коэффициента индивидуального дозиметра.

На рис. 4 представлена зависимость чувствительности Li^6F от расположения ТЛД в замедлителе (глубина и угол падения нейтронов) для градуировочного поля Pu-Be-источника. Угловое распределение зависимости имеет разный характер в вертикальной и горизонтальной плоскостях: в горизонтальной плоскости — симметричный характер, в вертикальной — асимметричный, причем степень асимметричности уменьшается с увеличением глубины расположения ТЛД. Такое поведение объясняется характеристиками рассеянного нейтронного излучения в помещении, где проводилось облучение. Характер распределения в вертикальной плоскости на глубине 0.1 и 1.0 см свидетельствует о том, что основной вклад дают промежуточные нейтроны, рассеянные от пола помещения (270°). Чувствительность ТЛД под этим углом выше, чем в прямом направлении (0°).

1.4. Восстановление спектра

Для восстановления спектра нейтронов использовалась хорошо известная программа *SAND-II* [7]. Метод *SAND-II* имеет ряд особенностей:

- использование априорного спектра в начале итерационной процедуры;
- нет методики оценки погрешности результата.

В качестве априорных спектров был взят следующий набор нейтронных спектров:

1. Спектры опорных полей ИФВЭ, описанные выше.
2. Спектры нейтронов из работы [9] (спектры 344; 390; 395; 328) (см. рис. 5а), которые являются типичными для разных групп низкоэнергетических спектров нейтронов для разных характеристик защиты ускорителя.
3. Для измерений в условиях гермообъема АЭС использовались спектры нейтронов, полученные расчетным путем с использованием комплекса КАСКАД-1/USCONS и MOSKIT [10], [11]. Расчеты выполнены для реальной геометрии реактора типа ВВЭР В-4М (НВАЭС, 3-й блок) [12]. Также использовалась библиотека классифицированных спектров нейтронов БКС-2 [13].

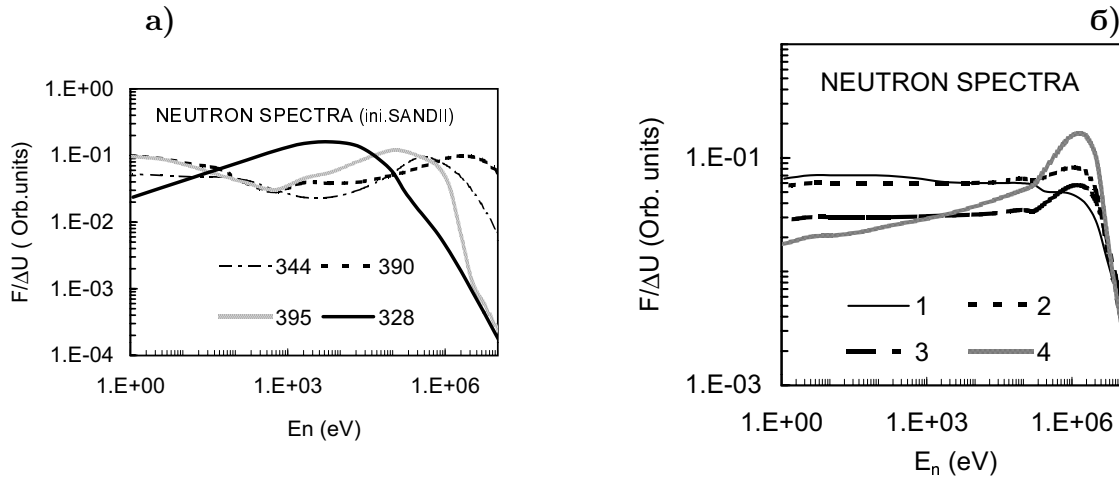


Рис. 5. Спектры нейтронов, используемые в качестве априорной информации в программе *SAND-II*: а) — ускорительные, б) — реакторные спектры.

Были выбраны:

- мягкие спектры нейтронов, испытавших многократное рассеяние в веществе защиты и оборудования, прошедшие через коммуникационные проемы (1, 2) (см. рис. 5б);
- спектры, характерные для рабочих помещений за толстой боковой защитой из бетона (3, 4) (рис. 5б).

Интервал изменения конечного результата (спектр нейтронов, эквивалентная доза) при использовании данного набора априорных спектров рассматривается нами как диапазон погрешности, связанной с использованием априорной информации. Безусловно, выбранный набор спектров нейтронов не является универсальным, и полученная оценка величины эквивалентной дозы является смещенной, так как метод получения результата — усреднение.

1.5. Анализ погрешности измерения эквивалентной дозы

Поправка для градуировочного коэффициента индивидуального нейтронного альбедного дозиметра на спектр нейтронов получалась следующим образом:

$$F = \frac{H^*(10) \cdot I}{H_{Pu-Be} \cdot 0.5}, \quad (2)$$

где H_{Pu-Be} — величина эквивалентной дозы по результатам измерений с индивидуальным дозиметром с использованием градуировки на Pu-Be-источнике, для которого коэффициент изотропности 0.5; $H^*(10)$ — результат измерений с помощью ПРМ; I — измеренный коэффициент изотропности с помощью ПРМ. Индивидуальный дозиметр облучается одновременно с ПРМ, причем последний служит в качестве фантома для первого.

На рис. 6 представлены восстановленный спектр нейтронов опорного поля ^{252}Cf источника, помещенного в полиэтиленовый шар (Cf+CH₂). Сплошные линии — огибающие область, внутри которой решение — восстановленный спектр, в зависимости от используемой априорной информации. Эталонный спектр (спектр опорного поля) лежит внутри огибающих, которые можно в первом приближении рассматривать как границы интервала погрешности. Как было отмечено выше, измерение спектра нейтронов не является целью данного метода и используется только для иллюстрации.

В табл. 2 представлены данные измерений с помощью ПРМ плотности потока и мощности эквивалентной дозы нейтронов в опорных полях в сравнение с экспертными данными. Оценка методическая дополнительной погрешности измерения эквивалентной дозы (вариант А и I; выбор априорного спектра) не превышает 13% для этих полей.

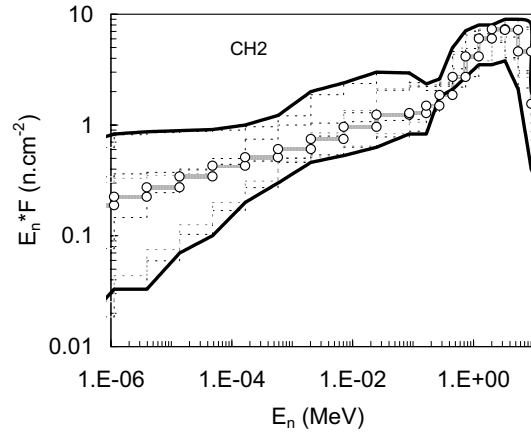


Рис. 6. Спектр нейтронов опорного поля Cf+CH₂: кривая с кружком — спектр эталона, пунктир — измерения с помощью ПРМ с использованием разных априорных спектров.

Таблица 2. Плотность потока (F) и мощность эквивалентной дозы (Hn) нейтронов в поле излучения опорных полей, измеренные с помощью ПРМ, и данные эталона.

Опорное поле		F (н.см ⁻²)/с	Hn (Зв/с)
Cf	ПМС	130.±6	$(3.6 \pm 0.3) \cdot 10^{-10}$
	эталон	128.	$3.7 \cdot 10^{-10}$
Cf+CH ₂	ПМС	29.±5	$(6.3 \pm 0.9) \cdot 10^{-11}$
	эталон	26.	$5.6 \cdot 10^{-11}$
Cf+Fe	ПМС	118.±9	$(2.5 \pm 0.4) \cdot 10^{-10}$
	эталон	127.	$2.7 \cdot 10^{-10}$

2. Результаты измерений

Ниже проведены результаты измерений с помощью ПРМ в разных условиях:

- экспериментальный зал У-70; выход из кабельного лабиринта в боковой бетонной защите; 1-й технологический сеанс 1998 г. (U1);
- экспериментальный зал У-70; вдали от боковой бетонной защиты, на крыше “французского домика”; 1-й технологический сеанс 1998 г. (U1);
- вдали от экспериментального зала У-70; здание 10, теристорный зал, 2-й физический сеанс 1998 г. (U3);
- 1-й блок Калининской АЭС, при работе реактора на мощности, внутри гермообъема, 18 м от активной зоны, у холодной нитки 2-ой петли I контура (k1);
- 1-й блок Калининской АЭС, при работе реактора на мощности, внутри гермообъема, на площадке над парогенератором (k2);

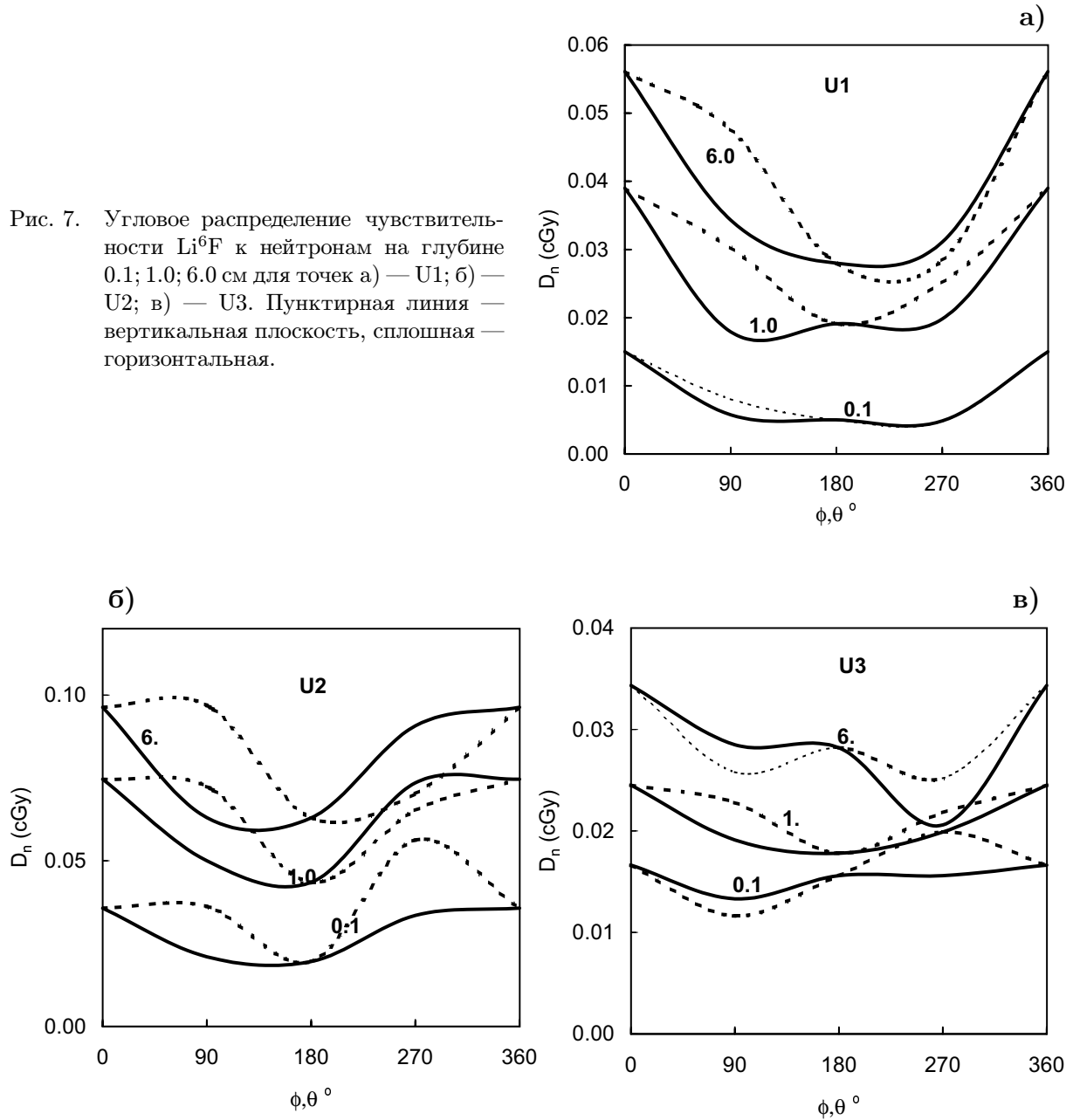
2.1. Угловое распределение

На рис. 7 и 8 представлено угловое распределение чувствительности Li^6F к нейтронам на глубинах 0.1; 1.0; 6.0 см в поле излучения ускорителя и реактора. В ряде случаев (U1 и K2) можно отчетливо увидеть направление на источник нейтронов. Для случая U1 (0°) это направление на выход из лабиринта в защите. В других случаях максимум для разных глубин имеет разное направление. Например для глубины 0,1 см (надкадмиевые медленные нейтроны), в большинстве случаев максимум — в направлении от пола (вертикальной плоскости 270°; вклад рассеянных нейтронов от пола; ПРМ в измерениях обычно располагается на полу или на подставке высотой 1 м). Для точки U2 замечен максимум сверху (вертикальная плоскость 90°), объясняемый вкладом от рассеянного излучения в воздухе (skyshine). Случай U2 является сложным с точки зрения выбора направления максимума интенсивности нейтронов: присутствуют два направления с равнозначным вкладом в чувствительность (сверху — skyshine и сбоку слева (270°) — вклад излучения от работающих каналов ускорителя). Вдали от источника излучения (точка U3) наблюдается слабо выраженный максимум в направлении к источнику (0°) (в сторону экспериментального зала). В целом из-за слабой зависимости от направления это распределение носит квазиизотропный характер.

На рис. 9. представлен коэффициент изотропности в зависимости от глубины расположения ТЛД в замедлителе. Для мононаправленных полей (опорные поля) он равен 0.5, в поле излучения ускорителя и реактора — 0.7...0.8. Надо отметить, что угловая зависимость чувствительности индивидуальных дозиметров, которые располагались на ПРМ, имеет квазиизотропный характер, в отличие от данных по ПРМ (рис. 8).

На рис. 10а,б представлены восстановленные спектры нейтронов для случая К2 (гермобъем 1-го блока КАЭС) и У-70 (УЗ).

Рис. 7. Угловое распределение чувствительности Li^6F к нейтронам на глубине 0.1; 1.0; 6.0 см для точек а) — U1; б) — U2; в) — U3. Пунктирная линия — вертикальная плоскость, сплошная — горизонтальная.



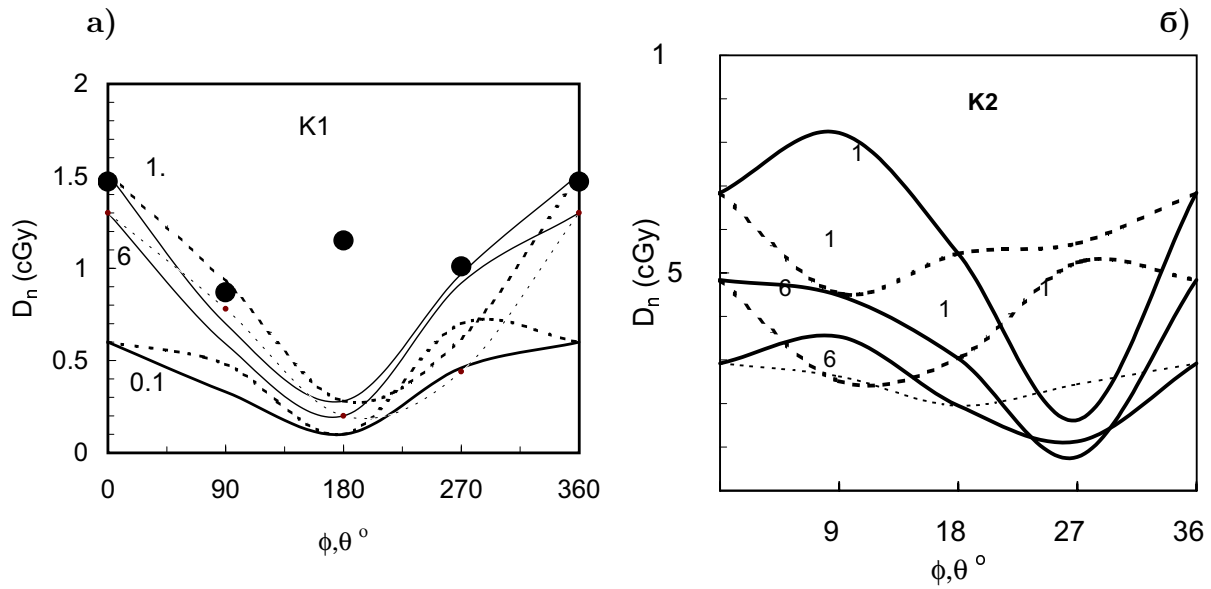


Рис. 8. То же, что и рис. 7, для измерений на АЭС: k1 и k2. Черные кружки — измерения с помощью индивидуального альбедного дозиметра.

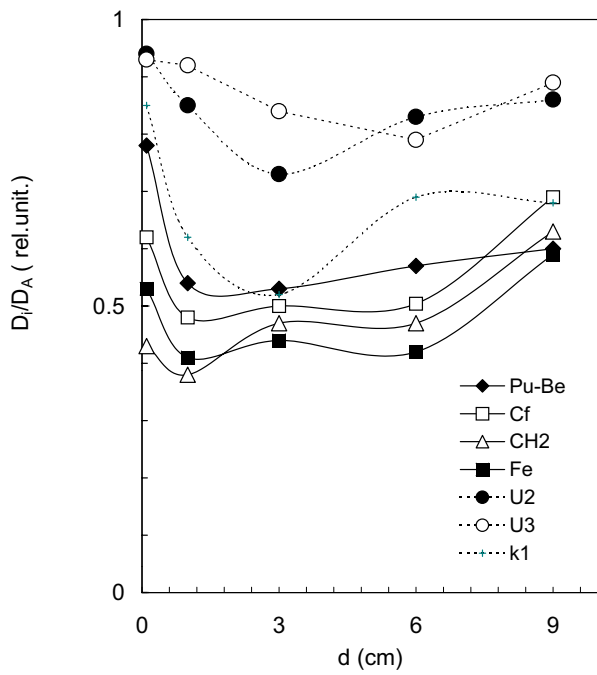


Рис. 9. Зависимость коэффициента изотропности от глубины расположения Li^6F в замедлителе для разных полей.

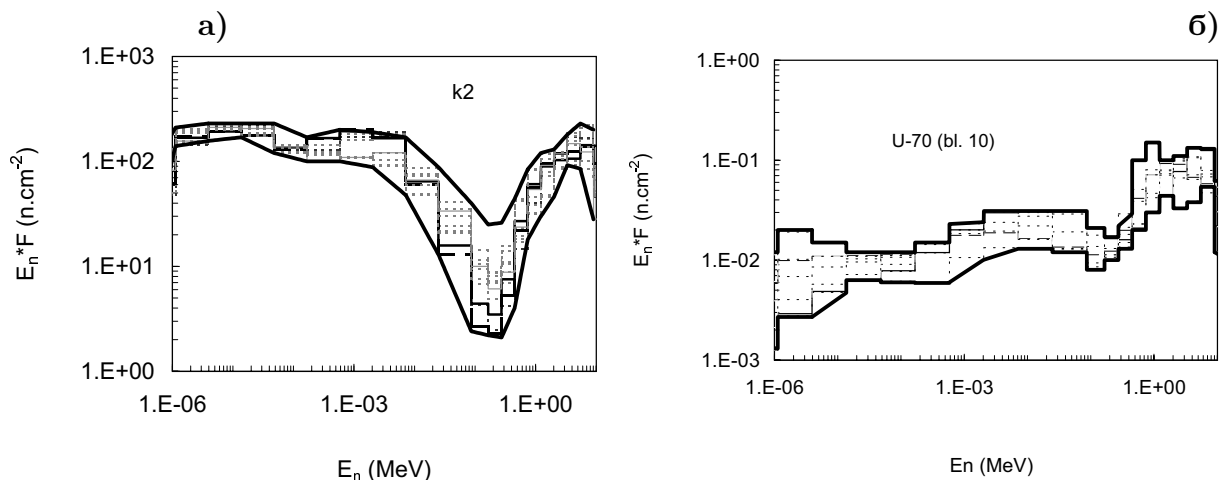


Рис. 10. Спектры нейтронов в гермообъеме КАЭС (а) и вдали от ускорителя У-70 (б).

2.2. Градуировка ПРМ и индивидуальных дозиметров в реальных полях

Одним из практических приложений рассматриваемого метода являются градуировка рутинных ПРМ и индивидуальных нейтронных дозиметров в реальных полях. ПРМ, используемый в рутинном зонном радиационном контроле в ИФВЭ, представляет собой сферический полиэтиленовый замедлитель диаметром 24.7 см, внутри (в центре), которого помещены пары ТЛД Li^6F и Li^7F . Как было показано в работе [14], систематическая погрешность измерения этого дозиметра (при градуировке в поле образцового Pu-Be источника) может достигать 100% и более в зависимости от типа спектра.

В работах [15], [16] рассматривается вопрос градуировки индивидуального нейтронного дозиметра альбедного типа в реальных полях. Систематическая погрешность в этом случае при использовании только градуировки на Pu-Be-источнике достигает 1000%.

Таблица 3. Результаты измерений — градуировочный коэффициент F для альбедного дозиметра.

Точка измерения	F	Основная погрешность (градуировка) %	Дополнительная погрешность (I/A)%	Дополнительная погрешность (априорный спектр)%
Pu-Be	1.	10	-	-
Cf	1.3	10	6	8
Cf+CH ₂	6.	10	6	12
Cf+Fe	2.3	10	6	12
K2	8	10	8	13
K1	16	10	10	15
U3	1.9	10	20	14
U2	1.7	10	15	12

В табл. 3 представлены результаты экспериментального определения градуировочного коэффициента F для альбедного дозиметра описанным методом. Там же приведен анализ погрешности. Следует заметить, что для полей излучения имеющие квазиизотропное угловое распределение, существенно возрастает вклад методической дополнительной

погрешности за счет степени изотропности, которая определяется как отношение эквивалентной дозы, полученная двумя способами (вариант А, вариант I). Методическая погрешность, которая связана с использованием разных априорных спектров, не превышает 12%.

Заключение

Рассмотренный метод измерения характеристик нейтронного излучения (угловых и спектральных распределений) имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами. Метод является:

- интегральным (нет проблем с импульсным характером излучения на ускорителе);
- простым (использование ТЛД дозиметров);
- дешевым (что имеет неоспоримое преимущество при использовании в рутинном радиационном контроле).

Метод позволяет решить вопрос градуировки индивидуальных дозиметров нейтронов в реальных полях излучения с приемлемой погрешностью.

Авторы выражают благодарность В.Н. Лебедеву, Б.А. Безрукову, А.А. Сорока и В.Н. Кустареву за поддержку работы, А.В. Санникову за полезные идеи и замечания, Е.Г. Спинову и И.Д. Долженкову, К.О. Яковлеву за оказанную помощь.

Работа выполнена в рамках договора 98/64/1367 для Концерна РОСЭНЕРГОАТОМ.

Список литературы

- [1] Комочков М.М., Мокров Ю.В. — Сообщение ОИЯИ Р16-94-178, Дубна, 1994.
- [2] Britvich G.I., Chumakov A.A. — Preprint ИИЕР 93-66, Protvino 1993.
- [3] Колеватов Ю.И., Семенов В.П., Трыков Л.А. Спектрометрия нейтронов и гамма-излучения в радиационной физике. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
- [4] MCNP4a. Manual LA-12625 M, CCC-200, ORML, 1993.
- [5] R.Caswell et al.//Rad.Res. V.83, p.217-254, 1980.
- [6] Бритвич Г.И. и др. — Препринт ИФВЭ 90-48, Протвино, 1990.
- [7] McElroy W.N., Berg S., Crockett T. and Hawking R.G. AFWL-TR-67-41, Vols.1-4. Air Force Weapon Laboratory (1967).
- [8] Abrosimov A.I. et al. — ИИЕР Preprint 93-43, Protvino, 1993.
- [9] Е.А.Белогорлов и др. — Препринт ИФВЭ 85-3148, Серпухов, 1985.
- [10] Voloschenko A.M., Shvetsov B. — In: Proc. Int. Top. Meet. Advances in Mathematics, Computation and Reactor Physis, Pittsburg, USA, 1991, V.5, p. 303.
- [11] Крючков В.П. и др. — Препринт ИФВЭ 92-132, Протвино, 1992.

- [12] Разработка системы индивидуального дозиметрического контроля нейтронного излучения на АЭС с ВВЭР. Итоговый отчет за 1997 год (ИФВЭ). — Протвино, 1997.
- [13] Григорьев Е.И. и др. — В кн.: Материалы III Всесоюзного совещания по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. — М.: ЦНИИАтоминформ, 1983, т.2, с. 21-227.
- [14] Алексеев А.Г. и др. — Препринт ИФВЭ 95-47, Протвино, 1995.
- [15] Sannikov A.V. et.al. — IHEP Preprint 89-211, Serpukhov, 1989.
- [16] Санников А.В. — Препринт ИФВЭ 90-133, Протвино, 1990.

Рукопись поступила 24 апреля 1999 года.

А.Г. Алексеев, Н.Н. Бараненков и др.

Метод измерения характеристик нейтронного излучения с помощью пассивного монитора на основе ТЛД.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 11.05.99. Формат $60 \times 84/8$. Офсетная печать.
Печ.л. 1,62. Уч.-изд.л. 1,3. Тираж 130. Заказ 98. Индекс 3649.
ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

