



СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

16-16

P16-2016-16

Ю. В. Мокров, С. В. Морозова

ИССЛЕДОВАНИЕ АДЕКВАТНОСТИ ПОКАЗАНИЙ  
ДОЗИМЕТРА НЕЙТРОНОВ  
НА ОСНОВЕ БОРНОГО СЧЕТЧИКА  
В КОМБИНИРОВАННОМ ЗАМЕДЛИТЕЛЕ  
АМБИЕНТНОЙ ДОЗЕ ЗА ЗАЩИТОЙ МЦ-400 ЛЯР

3498

## ВВЕДЕНИЕ

При работе различных ядерно-физических установок (ЯФУ), таких, например, как ускорители заряженных частиц, за их защитой возникает ионизирующее излучение, состоящее из набора различных элементарных частиц: протонов, нейтронов, мезонов, фотонов, электронов и др. Персонал, работающий на таких установках, подвергается воздействию этих частиц. Но в зависимости от вида ЯФУ, типа и энергии генерируемых частиц, конфигурации и материала биологической защиты, мест пребывания персонала основной вклад в дозу вносит более ограниченный класс частиц, который состоит в основном из вторичного излучения, возникающего в защите. Как правило, это фотонное излучение и нейтроны с энергией до 20 МэВ. На циклотронах Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ заметный вклад в дозу при работе этих установок (до 50 % общей дозы) вносят нейтроны с энергией до 20 МэВ. Причем за защитой этих установок в местах пребывания персонала при работающих установках поля нейтронного излучения характеризуются спектрами, у которых средняя энергия составляет несколько сотен кэВ и в большинстве случаев ниже 1 МэВ.

Основной операционной величиной, которая определяется при проведении инспекционного радиационного контроля, является амбиентный эквивалент дозы. В соответствии с Нормами радиационной безопасности эта операционная величина служит для консервативной оценки нормируемой величины — эффективной дозы.

В дозиметрии нейтронов большое распространение получили приборы, основанные на использовании детекторов тепловых нейтронов, помещенных в замедляющие среды различных размеров и конфигураций. Как правило, в качестве замедлителей используется полиэтилен в форме шаров или цилиндров, в центре которых располагаются детекторы тепловых нейтронов. Это могут быть активные детекторы — ионизационные или сцинтилляционные, и пассивные — термомюлюминесцентные или активационные. К достоинствам такого метода регистрации нейтронов относится довольно высокая чувствительность, низкий собственный фон, возможность использования в полях высокого уровня фотонного излучения и потоков заряженных частиц. Особенно важным достоинством данного метода является возможность изменять энергетическую зависимость чувствительности (ЭЗЧ) приборов, меняя толщину замедляющего слоя. Это позволяет создавать приборы, ЭЗЧ которых соответствует требуемой зависимости. Например, дозиметры той или иной дозы

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
БИБЛИОТЕКА  
ОИЯИ

или радиометры нейтронов с постоянной чувствительностью в нужном диапазоне энергий.

Другим достоинством такого метода регистрации и средств измерений на его основе является относительная простота приборов, стабильность их работы в течение длительного времени, доступность и невысокая стоимость. Все это сделало такие средства измерений одними из основных как в радиационном контроле, так и при проведении радиационных исследований.

## 1. ТРЕБОВАНИЯ К ЭЗЧ ДОЗИМЕТРОВ НЕЙТРОНОВ

Правильность и точность получаемой с рассматриваемых приборов дозиметрической информации во многом обусловлена соответствием их ЭЗЧ требуемой зависимости. Как сказано выше, у дозиметров, предназначенных для измерения тех или иных видов доз нейтронов (максимальной эквивалентной, амбиентной, индивидуальной и др.), их ЭЗЧ должна быть подобна энергетической зависимости данной дозы на единичный флюенс нейтронов от энергии. Зависимость амбиентного  $h^*(10)$  и индивидуального  $h_p(10)$  эквивалентов дозы нейтронов на единичный флюенс на глубине 10 мм от энергии для фантома в виде плоской тканеэквивалентной пластины представлена на рис. 1 [1].

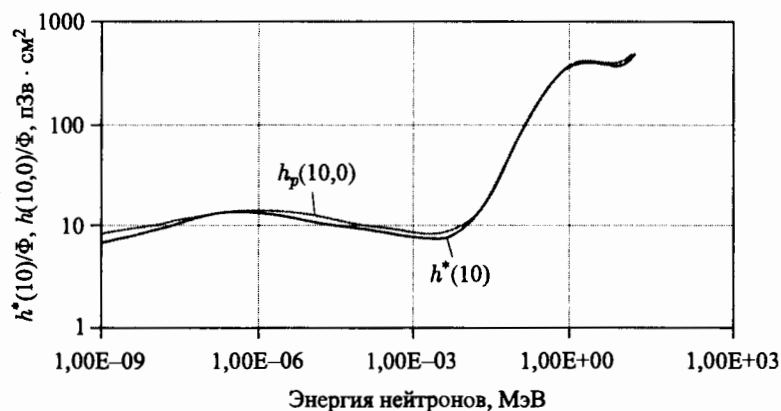


Рис. 1. Зависимость от энергии амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы на единичный флюенс нейтронов

## 2. ДОЗИМЕТР НА ОСНОВЕ БОРНОГО СЧЕТЧИКА В КОМБИНИРОВАННОМ ЗАМЕДЛИТЕЛЕ

В ОИЯИ был создан дозиметр нейтронов [2], состоящий из борного счетчика с  $^{10}\text{B}$  (СНМ-14), расположенного в комбинированном полиэтиленовом

замедлителе, и выносного блока с различным набором электронных узлов (высоковольтного преобразователя для питания счетчика, усилителя и формирователя импульсов, пересчетного прибора и т. п.). Конструкция датчика прибора (замедлителя и счетчика) представлена на рис. 2.

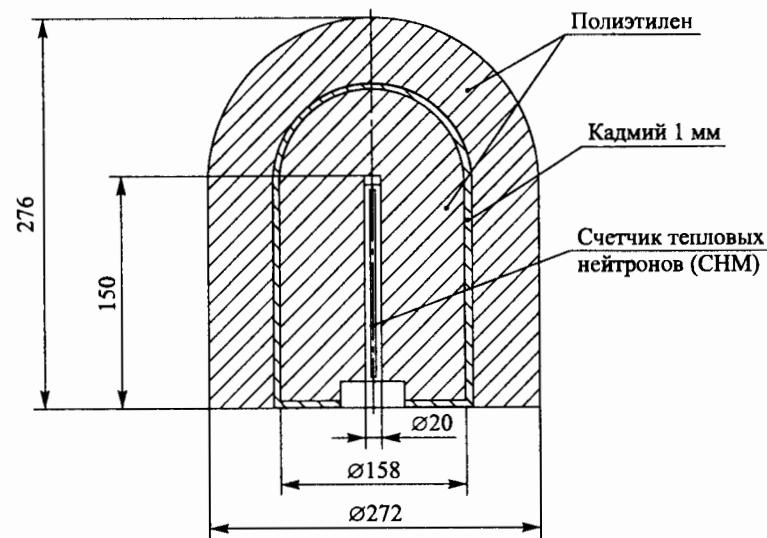


Рис. 2. Комбинированный замедлитель нейтронов с борным счетчиком СНМ-14

ЭЗЧ дозиметра представлена на рис. 3. Причем здесь показана ЭЗЧ как при наличии кадмиевой прослойки внутри замедлителя (сплошная линия), с которой она используется в радиационном контроле, так и без кадмиевой прослойки (штрихпунктир). Рис. 3 иллюстрирует влияние кадмиевой прослойки на работу дозиметра. Задача прослойки — поглотить тепловые нейтроны, которые образовались во внешних слоях замедлителя от замедления промежуточных нейтронов, чтобы они не зарегистрировались детектором

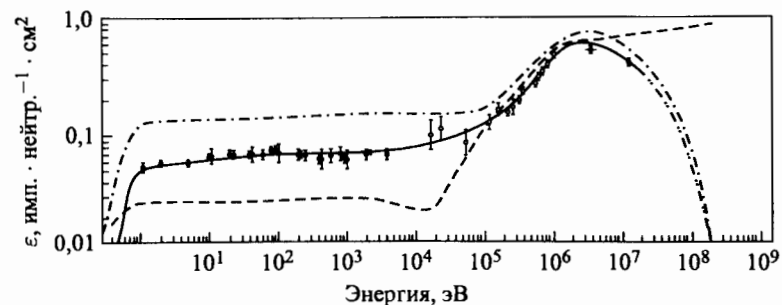


Рис. 3. ЭЗЧ счетчика СНМ-14 с комбинированным замедлителем

тепловых нейтронов. Это позволяет приблизить ЭЗЧ прибора к требуемой зависимости.

Как видно из рис. 3, ЭЗЧ прибора все же отличается от требуемой для использования его в качестве дозиметра нейтронов, что может приводить к отличию зарегистрированной прибором дозы от ее действительного значения. При этом степень этого отличия будет зависеть от спектра нейтронов в месте измерений. Вследствие этого возникает задача количественной оценки адекватности показаний данного прибора измеряемой величине — AMBIENTному эквиваленту дозы. Решению данной задачи был посвящен ряд работ [2–6]. Однако в них отсутствует информация об адекватности показаний прибора за защитой работающих в настоящее время циклотронов ЛЯР. Данная работа восполняет этот пробел — в ней представлены результаты исследования адекватности его показаний за защитой МЦ-400.

### 3. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ АДЕКВАТНОСТИ ПОКАЗАНИЙ ДОЗИМЕТРА И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СПЕКТРЫ НЕЙТРОНОВ НА МЦ-400

Как было показано выше, ЭЗЧ гипотетического идеального дозиметра в имп./нейт./см<sup>2</sup> должна быть подобна энергетической зависимости AMBIENTного эквивалента дозы на единичный флюенс нейтронов. ЭЗЧ дозиметра, показанные на рис. 3, определялись по формуле

$$\varepsilon(E) = \frac{\varepsilon_{\text{Pu-Be}} h^*(10, E)}{h_{\text{Pu-Be}}^*},$$

где  $h^*(10, E)$  — зависимость удельного AMBIENTного эквивалента дозы от энергии, Зв·см<sup>2</sup> [1];  $\varepsilon_{\text{Pu-Be}}$  — чувствительность СНМ-14 в комбинированном замедлителе для Pu-Be источника, имп.·нейтр.<sup>-1</sup>·см<sup>2</sup>, равная по результатам градуировки 0,47 имп./нейтр.·см<sup>2</sup>;  $h_{\text{Pu-Be}}^*$  — удельный AMBIENTный эквивалент дозы нейтронов для Pu-Be-источника, равный  $3,8 \cdot 10^{-10}$  Зв·см<sup>2</sup>.

Отличие показаний исследуемого прибора в полях с различными спектрами нейтронов от значения AMBIENTного эквивалента дозы  $H^*(10)$  в этих полях будет зависеть от спектра нейтронов в месте измерений. Чтобы получить численные значения этого отличия для различных спектров нейтронов, расчетным путем были определены и сравнивались между собой две величины:

— AMBIENTный эквивалент дозы, который зарегистрировал бы рассматриваемый дозиметр нейтронов с чувствительностью  $\varepsilon(E)$  в поле со спектром нейтронов  $\Phi(E) - H_m^*(10)$ ;

— действительные значения AMBIENTного эквивалента дозы для этого спектра  $H_r^*(10)$ . Значения  $H_m^*(10)$  рассчитывались по формуле

$$H_m^*(10) = \frac{h_{\text{Pu-Be}}^*}{\varepsilon_{\text{Pu-Be}}} \int_{E_1}^{E_2} \varepsilon(E) \Phi(E) dE,$$

где  $E_1$  и  $E_2$  — границы энергетического диапазона спектра нейтронов;  $\Phi(E)$  — энергетический спектр нейтронов, нейтр./МэВ·см<sup>2</sup>.

Действительные значения AMBIENTного эквивалента дозы рассчитывались по формуле

$$H_r^*(10) = \int_{E_1}^{E_2} h^*(10, E) \Phi(E) dE.$$

Сравнение величин  $H_m^*(10)$  и  $H_r^*(10)$  проведено путем расчета и анализа коэффициентов  $K1$ , представляющих собой их отношения.

Коэффициент  $K1$  определяется по формуле

$$K1 = \frac{H_r^*(10)}{H_m^*(10)} = \frac{\int_{0,4 \text{ эВ}}^{20 \text{ МэВ}} h^*(10, E) \Phi(E) dE}{\frac{h_{\text{Pu-Be}}^*}{\varepsilon_{\text{Pu-Be}}} \int_{0,4 \text{ эВ}}^{20 \text{ МэВ}} \varepsilon(E) \Phi(E) dE}.$$

Коэффициент  $K1$  фактически является поправочным коэффициентом, на который нужно умножить показания прибора, чтобы получить действительное значение AMBIENTного эквивалента дозы в диапазоне от 0,4 эВ до 20 МэВ при измерениях в поле нейтронов с данным спектром  $\Phi(E)$ . Если поправочный коэффициент не использовать, то разброс значений этого коэффициента характеризует дополнительную погрешность, с которой данный прибор измеряет AMBIENTный эквивалент дозы в том же диапазоне энергий.

В данной работе рассчитывались значения коэффициента  $K1$  для взятых из [7] спектров нейтронов на МЦ-400 ЛЯР.

### 4. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СПЕКТРЫ НЕЙТРОНОВ ЗА ЗАЩИТОЙ МЦ-400 И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис. 4 показаны точки измерений за защитой МЦ-400. Точка 2 располагалась в дверном проеме откатной двери Д22 в зал ускорителя, точка 3 напротив заложеного дверного проема Д25Б зала ускорителя за противоположной защитной стеной. Точка 4 находилась за откатной дверью в зал ускорителя в направлении ворот. Точка 5 находилась в дверном проеме двери Д21 в зал ускорителя в том же коридоре, что и точка 2. Во всех

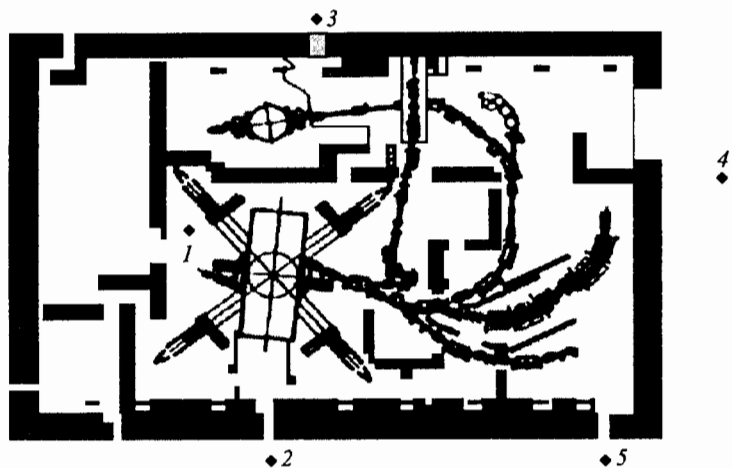


Рис. 4. Точки измерений на МЦ-400 ЛЯР

Результаты расчетов  $K_1$  на МЦ-400

№ п/п	Номер точки (спектра)	Место измерений	$K_1$	Средняя энергия, МэВ
1	2	МЦ-400 за дверью Д22	0,76	0,23
2	3	МЦ-400 за дверью Д25	1,07	0,39
3	5	МЦ-400 за дверью Д21	0,84	0,37

указанных точках измерений может находиться персонал как группы А, так и группы Б. Циклотрон работал в режиме ускорения ионов неона  $Ne_{20}^{7+}$  до энергии  $\sim 53$  МэВ/нуклон и вывода ионов на сепаратор АКУЛИНА и установку КОМБАС.

Спектры в точках измерений показаны на рис. 5.

Результаты расчетов представлены в таблице. В ней указаны номера точек, в которых проводились измерения спектров, место измерения, значения коэффициентов  $K_1$  и средние энергии спектров. В таблице приведены также краткие характеристики условий измерения спектров.

Анализ полученных результатов представлен ниже.

1. Значения  $K_1$  за защитой МЦ-400 находятся в узком диапазоне значений от 0,76 до 1,07.

2. Среднее значение  $K_1$  для МЦ-400 равно 0,89 при максимальном отклонении от среднего значения для всех точек  $-0,13$  и  $+0,18$ .

Таким образом, при введении поправки 0,89 в показания дозиметра погрешность измерения амбиентного эквивалента дозы за защитой МЦ-400 не превысит 20 %.

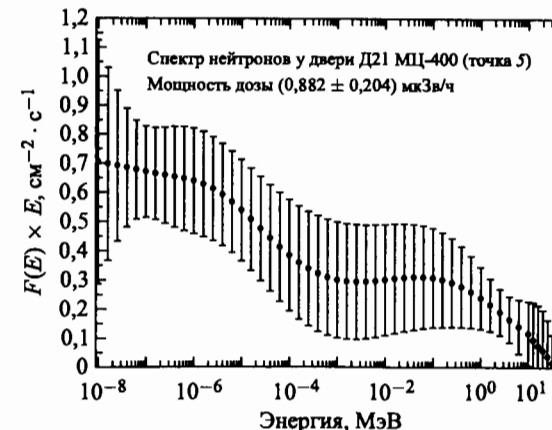
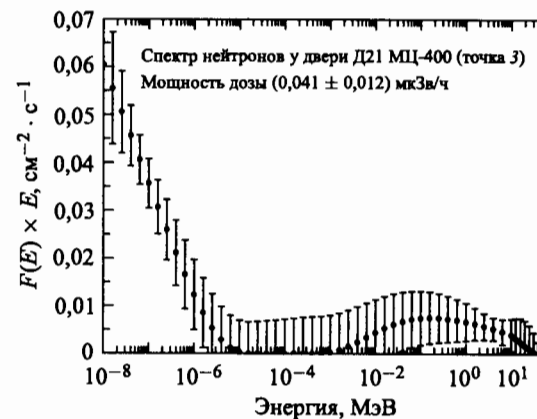
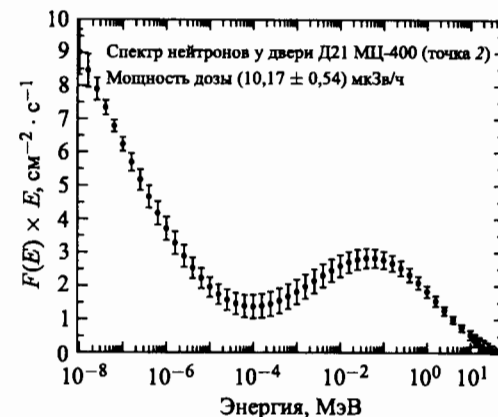


Рис. 5. Спектры нейтронов в точках 2, 3 и 5 на МЦ-400

1. Если не вводить поправку в показания дозиметров, то с погрешностью, не превышающей 25 %, прибор может измерять амбиентный эквивалент дозы в полях за защитой МЦ-400.

2. Описанные результаты получены при градуировке по Pu–Be-источнику нейтронов. Если использовать для градуировки дозиметра источники нейтронов с меньшей, чем у Pu–Be-источников, средней энергией, то указанные выше погрешности могут иметь другие значения.

3. В работе [6] представлены результаты расчета  $K_1$  для спектров нейтронов за защитой У-300 ЛЯР. Среднее значение коэффициента  $K_1$  при этом равно 0,91. Полученные результаты показывают, что для циклотронов ЛЯР значение поправочного коэффициента  $K_1$  может быть принято равным 0,9. При этом погрешность измерения амбиентного эквивалента дозы не превысит 20 %.

## ВЫВОДЫ

1. Показана возможность использования прибора на основе борного счетчика с комбинированным замедлителем для измерения амбиентного эквивалента дозы нейтронов в полях излучения за защитой МЦ-400 ЛЯР.

2. При введении поправки в показания дозиметра, равной 0,89, погрешность измерения амбиентной дозы не превышает 20 % при градуировке по Pu–Be-источнику нейтронов

3. Без введения поправки эта погрешность не превышает 25 %.

4. Результаты сравнения с литературными данными показывают, что для циклотронов ЛЯР значение коэффициента  $K_1$  может быть принято равным 0,9.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation, ICRU Report 57, Bethesda, 1998.
2. Комочков М. М., Мокров Ю. В. Сообщение ОИЯИ Р16-85-802. Дубна, 1985. 9 с.
3. Комочков М. М., Мокров Ю. В. Сообщение ОИЯИ Р3-86-184. Дубна, 1986. 6 с.
4. Бучнев В. Н. и др. Сообщение ОИЯИ Р3-85-428. Дубна, 1985. 4 с.
5. Алейников В. Е., Бескровная Л. Г., Мокров Ю. В. Сообщение ОИЯИ Р16-2008-46. Дубна, 2008. 20 с.
6. Алейников В. Е., Бескровная Л. Г., Мокров Ю. В. // Письма в ЭЧАЯ. 2009. Т. 6, № 1(150). С. 124–133.
7. Мокров Ю. В. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 6(190). С. 1243–1255.

Получено 3 марта 2016 г.